

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Bakalářská práce

Zhodnocení současných metod zpracování gastroodpadu

Daniel Lelák

© 2021 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Daniel Lelák

Procesní inženýrství
Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

Zhodnocení současných metod zpracování gastroodpadu

Název anglicky

Evaluation of current methods of gastro-waste processing

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je seznámit se s problematikou techniky a technologie zpracování gastroodpadu. Provést teoretický a laboratorní rozbor vybraných vzorků gastroodpadů pro jejich finální zpracování.

Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců gastroodpadu pro jejich finální zpracování a využití. Praktická část práce zahrnuje uskutečnit kvalitativní rozbor na vybraných vzorcích gastroodpadu.

Metodika

Bakalářská práce se bude skládat z těchto částí:

1. Úvod
 2. Cíl práce a metodika
 3. Charakteristika gastroodpadu
 4. Technologie a technika zpracování gastroodpadu
 5. Měření a dosažené výsledky
 6. Diskuse a závěry
 7. Seznam literatury
 8. Přílohy
-

Doporučený rozsah práce

40 – 50

Klíčová slova

gastroodpad, kompostování, bioplynová stanice, hydrotermální karbonizace, torrefikace

Doporučené zdroje informací

1. Filip, J.; Oral, J.: Odpadové hospodářství II. 1. vydání. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2003. 78 s. ISBN 80-7157-682-4
2. Juchelková, D.; Fibinger, V.; Mika, J.: Metody nakládání s odpady. 1. vydání. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 1996. 62 s. ISBN 80-7078-309-5
3. Juchelková, D.: Likvidace a využití odpadů. Ostrava, VŠB TU Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-747-3
4. Malaťák, J.; Vaculík, P.: Zpracování biologicky rozložitelných odpadů. ČZU v Praze, Technická fakulta, sk. Powerprint, Praha 2008, 168 s., ISBN: 978-80-213-1747-5
5. Pastorek, Z.; Kára, J.; Jevič, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 str., ISBN 80-86534-06-5
6. Straka, F.; a kolektiv.: Bioplyn. GAS s.r.o., Říčany 2003, s. 517, ISBN 80-7328-029-9

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 3. 10. 2019

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 02. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma "Zhodnocení současných metod zpracování gastroodpadu" vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. *o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů*, ve znění pozdějších předpisů především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., *o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů*, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze této práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 14/5/2021

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu doc. Ing. Janu Malaťákovi, Ph.D. za pomoc a poskytnuté rady při zpracování bakalářské práce. Zároveň bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Velebilovi za odbornou asistenci při měření spojeném s touto prací.

Zhodnocení současných metod zpracování gastroodpadu

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na rozličné možnosti zpracování gastroodpadů a kuchyňských odpadů. V práci jsou vysvětleny principy a požadavky používaných technologií. Práce je zaměřena hlavně na kompostování, anaerobní digesce a pyrolytické nebo hydrotermální procesy pro produkci druhotných surovin vhodných k energetickým nebo zemědělským účelům.

V rámci práce bylo provedeno měření a vyhodnocení vlastností vybraných potenciálních kuchyňských odpadů. Měřené veličiny zahrnovaly vlhkost materiálu, obsah hořlavin a popelovin, spalné teplo a výhřevnost. Proběhla také elementární analýza prvků C, H, N a S. Na základě výstupů získaných při měření byly předběžně určeny optimální metody využití vzorových odpadních materiálů.

Z vzorků chlebu typu šumava, mrkvových slupek, banánových slupek a žluklých plodů podzemnice olejné, nejvyšší výhřevnost vykazovaly vzorky plodů podzemnice olejné v průměru $23,63 \text{ MJ.kg}^{-1}$, vzhledem k nízkým obsahům popelovin a vázané vlhkosti a zároveň vysokému podílu hořlavin. Průměrné hodnoty poměru C:N byly pro materiály určeny 19,23; 58,42; 40,32 a 19,94 v příslušném pořadí.

Klíčová slova: Gastroodpad, kuchyňský odpad, kompostování, anaerobní digesce, bioplyn, pyrolýza, torrefakce, biouhlí, zplyňování, hydrotermální karbonizace

Evaluation of current methods of gastro-waste processing

Abstract

This bachelor's thesis is focused towards various options of processing food and kitchen waste. In this paper principles and conditions of prevalent technologies are explained. This work is focused mainly on composting, anaerobic digestion and pyrolytic or hydrothermal processes for production of secondary materials suitable for energetic or agricultural applications.

In regards with this work, properties of selected potential kitchen waste materials were measured and evaluated. Observed properties were moisture levels, combustible and ash contents, higher and lower heating values. Elemental determination of C, H, N, and S was also performed. Based on output values gained from measurement, preliminary determination of optimal method was made for each sampled waste material.

From samples of Czech-type bread, carrot peel, banana peels and rancid peanuts, largest lower heating value was determined in peanuts with $23,63 \text{ MJ.kg}^{-1}$ on average, due to low contents of ash and moisture and at the same time high combustibles content. Average C:N ratio values of measured samples were determined to be 19,23; 58,42; 40,32 and 19,94 respectively.

Keywords: Food waste, kitchen waste, composting, anaerobic digestion, biogas, pyrolysis, torrefaction, biochar, gasification, hydrothermal carbonization

Obsah

1. Úvod	14
2. Cíl práce a metodika	15
3. Charakteristika gastroodpadu a legislativa	16
4. Technologie a technika zpracování gastroodpadu	18
4.1. Kompostování	18
4.2. Anaerobní digesce	33
4.3. Pyrolýza	50
4.4. Zplyňování	61
4.5. Hydrotermální karbonizace (HTC)	64
5. Měření a dosažené výsledky	72
5.1. Měřené materiály	72
5.2. Úprava vzorků.....	74
5.3. Přístroje použité při analýze.....	75
5.4. Výsledky	79
6. Diskuze a závěry	86
6.1. Chléb	86
6.2. Mrkvové slupky	86
6.3. Banánové slupky.....	87
6.4. Arašídý.....	87
6.5. Závěr.....	88
7. Seznam použitých zdrojů	89

Seznam tabulek

Tabulka 1: Množství kompostovaných odpadů a BRKO na území ČR v letech 2008 – 18 [9], [10], [11].....	18
Tabulka 2: Limitní hodnoty koncentrace vybraných rizikových látek v jednotlivých skupinách [82].....	33
Tabulka 3: Vlhkosti vzorků chlebu.....	79
Tabulka 4: Vlhkosti vzorků slupek mrkve a slupek banánu.....	80
Tabulka 5: Hodnoty C+W+A pro suchý chléb.....	80
Tabulka 6: Hodnoty C+W+A pro mrkvové slupky, banánové slupky a arašídů.....	81
Tabulka 7: Výsledky elementární analýzy suchého chlebu a mrkvových slupek.....	82
Tabulka 8: Výsledky elementární analýzy banánových slupek.....	83
Tabulka 9: Výsledky elementární analýzy arašídů.....	83
Tabulka 10: Hodnoty spalného tepla a výhřevnosti pro měřené materiály.....	84
Tabulka 11: Shrnutí výsledků měření.....	85

Seznam obrázků

Obrázek 4.1: Průběh teploty a pH během kompostovacího procesu [20]	23
Obrázek 4.2: Vrstvy kompostovací plochy [21]	24
Obrázek 4.3: Zjednodušené schéma kompostovací hromady	25
Obrázek 4.4: Schéma pasivně provzdušňované hromady [84]	25
Obrázek 4.5: Schéma aktivně provzdušňované hromady [22]	26
Obrázek 4.6: Kompostovací žlab [42]	27
Obrázek 4.7: Schéma rotačního bubnového reaktoru	27
Obrázek 4.8: Příklady domácích zahradních kompostérů [12]	29
Obrázek 4.9: Schéma elektrického kompostéru [27]	30
Obrázek 4.10: Kuchyňský vermikompostér [85]	32
Obrázek 4.11: Schéma anaerobní digesce [41]	36
Obrázek 4.12: Způsoby zapojení reaktorů [40]	39
Obrázek 4.13: Separátor zbytků potravin složený ze šnekových dopravníků a kladivového mlýnu [49]	41
Obrázek 4.14: Zvonový reaktor [40]	42
Obrázek 4.15: Schéma komorového reaktoru [40]	42
Obrázek 4.16: Způsoby vytápění reaktorů [40]	43
Obrázek 4.17: Způsoby míchání reaktorů [40]	43
Obrázek 4.18: Mokrý (a) a dvoumembránový plynojem (b)	45
Obrázek 4.19: Schéma kogenerační jednotky [86]	48
Obrázek 4.20: Schéma palivového článku [87]	49
Obrázek 4.21: Schéma pyrolýzního procesu [69]	51
Obrázek 4.22: Schéma hmotnostní a energetické bilance při torrefakci [69]	51
Obrázek 4.23: Vývoj chemického složení pyrolýzního plynu v závislosti na teplotě [69]	54
Obrázek 4.24: Schéma BFB (a) a CFB (b) reaktorů [69]	56
Obrázek 4.25: Schéma rotačního kuželového reaktoru [69]	57
Obrázek 4.26: Schéma rotačního bubnového reaktoru s nepřímým ohřevem [69]	58
Obrázek 4.27: Schémata šachtového (a) a mikrovlnného reaktoru (b) [69]	58
Obrázek 4.28: Schéma různých typů zplyňovacích reaktorů s pevným ložem [88]	63
Obrázek 4.29: Schéma reakčních drah při HTC [97]	65
Obrázek 4.30: Schéma dávkového reaktoru HTC [103]	67
Obrázek 4.31: Schéma kontinuálního HTC reaktoru [zdroj: Grenol]	68
Obrázek 5.1: Banánové slupky syrové, sušené a namleté (zdroj: autor)	72

Obrázek 5.2: Slupky od mrkve čerstvé, sušené a namleté (zdroj: autor)	73
Obrázek 5.3: Chléb typu šumava čerstvý, suchý a namletý (zdroj: autor).....	73
Obrázek 5.4: Arašídý výchozí a namleté (zdroj: autor)	74
Obrázek 5.5: Sencot SHB 4465VT-EUE3 (zdroj: autor).....	74
Obrázek 5.6: Retsch SM 100 (zdroj: retsch.cz).....	75
Obrázek 5.7: ETA Fraganza 0066 90000 (zdroj: eta.cz).....	75
Obrázek 5.8: Analytická váha AND GF-3000 (zdroj: Industrialworld.com)	75
Obrázek 5.9: Pec Memmert UF30 (zdroj: Memmert.com).....	76
Obrázek 5.10: Váha Sartorius S124 S (zdroj: ebay.com).....	76
Obrázek 5.11: LECO TGA 701 (zdroj: LECO).....	77
Obrázek 5.12: LECO AC 600 s pracovním stojanem (zdroj: LECO)	78
Obrázek 5.13: LECO CHN 628 +S modul (zdroj: LECO)	79

Seznam použitých zkratk

Zkratky	Jednotky	Význam
A	%	Popeloviny
As		Arsen
BFB		Bubbling Fluidized Bed – fluidní lože
BRKO		Biologicky rozložitelný komunální odpad
C	%	Obsah uhlíku / hořavin
CBG		Zkomprimovaný bioplyn
Cd		Kadmium
CFB		Circulating Fluidized bed – cirkulovaná fluidní lože
C _x H _y		Uhlovodíky
CO		Oxid uhelnatý
CO ₂		Oxid uhličitý
Cr		Chrom
Cu		Měď
EU		Evropská unie
Fe ³⁺ - EDTA		Chelatonát železito-sodný
FeS		Sulfid železnatý
H	%	Vodík
H ₂ O		Voda
H ₂ S		Sulfan
HCN		Kyanovodík
Hg		Měď
HTC		Hydrotermální karbonizace
CH ₄		Methan
K		Draslík
KOH		Hydroxid draselný
LBG		Zkapalněný bioplyn
LBM		Zkapalněný biomethan
m	mg; g; kg	Hmotnost
Mg		Hořčík
N	%	Dusík
N ₂ O		Oxid dusný

Na ⁺		Kation sodíku
Na ₂ CO ₃		Uhličitan sodný
NaCl		Chlorid sodný
NaHCO ₃		Hydrogenuhličitan sodný
NaOH		Hydroxid sodný
NH ₃		Amoniak
NH ₄ ⁺		Amonný kation
Ni		Nikl
O	%	Kyslík
P		Fosfor
PAU		Polyaromatické uhlovodíky
Pb		Olovo
PCB		Polychlorované bifenyly
PSA		Pressure Swing Adsorbtion
S	%	Síra
SNG		Náhradní zemní plyn
Q _i ^r	kJ.kg ⁻¹ ; MJ.kg ⁻¹	Výhřevnost
Q _s ^r	kJ.kg ⁻¹ ; MJ.kg ⁻¹	Spalné teplo
USA		Spojené státy americké
W	%	Vlhkost
ZEVO		Zařízení na energetické využití odpadu
Zn		Zinek

1. Úvod

Manipulace s gastroodpadem současnosti představuje problém, jehož priorita postupně narůstá. Množství roční světové produkce kuchyňského odpadu se těžko odhaduje. Je však udáváno, že gastroodpad, odpad z kuchyní nebo nevyužité jídlo a potraviny tvoří třetinu až polovinu světové produkce potravin. Na území Evropské unie vznikne odhadem 57 milionů tun kuchyňského odpadu za rok [1]. Tento odpad většinou není vhodně nebo vůbec využit. Mimo oddělený sběr, který je v současnosti povinný pouze pro hromadná stravovací zařízení, neexistuje homogenní struktura pro shromažďování a svoz tohoto odpadu z domácností, které zaujímají většinu produkce tohoto odpadu. Podle průzkumu společnosti EKO-KOM tvoří biologický odpad průměrně 25 % podíl ve směsném komunálním odpadu napříč všemi typy zástaveb [2]. Vzhledem k růstu lidské populace lze předpokládat růst produkce tohoto odpadu, společně s poptávkou po potravinách a co nejrychlejší produkci. Užíváním minerálních hnojiv je možné rychle pěstovat plodiny, ale půda přichází o organické složky, které jsou důležité pro dlouhodobě udržitelné zemědělství. Gastroodpad má potenciál jak pro energetické využití, tak poskytnutí zdrojů živin pro navracení do půdy.

V této práci budou v teoretické části popsány metody, kterými je možné v současnosti nejen řešit zpracování gastroodpadu, ale i využití jako zdroj energie nebo živin pro pěstování nových potravin.

Vlastní část práce je zaměřena na měření charakteristik vybraných odpadů, které se mohou vyskytnout v gastroodpadech a předběžné určení vhodné metody zpracování.

2. Cíl práce a metodika

Cílem práce je charakterizovat současné možnosti zpracování gastroodpadu.

V teoretické části práce jsou popsány dostupné technologie současně užívané v praxi, společně s vybranými perspektivními metodami ve fázi výzkumu. Teoretická východiska uvedená v této práci byla čerpána z odborných zdrojů v češtině nebo v angličtině.

V praktické části práce jsou zpracovány výsledky měření vybraných charakteristik materiálů, které se mohou vyskytnout v kuchyňském odpadu. Na základě výsledků měření jsou představena řešení nakládání s těmito materiály podle východisek uvedených v teoretické části práce.

3. Charakteristika gastroodpadu a legislativa

Gastroodpad je biologický odpad vzniklý úpravou potravin při přípravě pokrmů nebo jejich konzumací. Zákon č. 541/2020 Sb. *o odpadech* definuje biologický odpad 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. [91]

Gastroodpad je podle vyhlášky č. 8/2021 Sb. *o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů* uveden pod kódem 20 01 08: Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven. Za předpokladu, že je v místě vzniku soustředován odděleně gastroodpad rostlinného původu, podle Katalogu je možné odpad kódovat 20 01 08 01. Jako složka odděleného sběru je odvážen z jídelen, restaurací, aj. gastronomických podniků. Obvykle bývá shromažďován v hnědých nádobách s těsnícím víkem, avšak záleží na konkrétní odpadové společnosti. Ačkoliv v kuchyních a gastronomických podnicích vzniká značné množství odpadního jedlého oleje, ten do této podskupiny nepatří a má vlastní podskupinu v Katalogu odpadů, 20 01 25: Jedlý olej a tuk. [3], [4]

Za gastroodpad jsou považovány zbytky potravin, ovoce, zeleniny, tepelně opracované maso, menší kosti, zbytky nedojedených jídel, sedliny z čaje nebo kávy atd. [4]

Do gastroodpadu nepatří větší kosti, syrové maso, kadávery, obaly od potravin a folie, odpadní tuk atd. [4]

Podstatné množství kuchyňského odpadu vzniklého v domácnostech končí ve směsném komunálním odpadu nebo v kanalizaci. Důsledkem přítomnosti kuchyňského odpadu ve směsném komunálním odpadu je snížení výhřevnosti odpadu ve spalovnách, vlivem vyššího obsahu vlhkosti. V tělesech skládek přispívá k aerobním či anaerobním rozkladným procesům, za vzniku skleníkových plynů. V kanalizaci mimo rozkladu může přispět k zanášení stokové sítě, množení škůdců nebo přetížení čistíren odpadních vod organickým znečištěním. Z tohoto důvodu jsou také kanalizačními řády zakázány kuchyňské drtiče. [5]

Podle vyhlášky č. 299/2003 Sb. *o opatřeních pro předcházení a zdolávání nálezů a nemocí přenosných ze zvířat na člověka* je zakázáno zkrmování kuchyňských odpadů hospodářským zvířatům. [89] Ve znění vyhlášky č. 389/2004 *o opatřeních pro tlumení slintavky a kulhavky a k jejímu předcházení* může v případě potřeby v souvislosti s šířením slintavky nebo kulhavky příslušný orgán veterinární správy rozšířit zákaz

zkrmování kuchyňských odpadů na všechna zvířata, bez ohledu na jejich využití nebo místo setrvání. [90]

Mezi cíle Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024 patří snižování množství kuchyňských odpadů ve směsném komunálním odpadu a správné nakládání s nimi pro minimalizaci negativních efektů na zdraví a životní prostředí. Strategii pro splnění těchto cílů je vytvoření systému sběru a pravidelného svozu z veřejných stravovacích zařízení a centrálních kuchyní do schválených zpracovatelských zařízení, společně s kontrolami. S kuchyňským odpadem vzniklým v domácnostech Plán odpadového hospodářství nepočítá, nicméně mezi další cíle patří snížení množství skládkovaného biologicky rozložitelného odpadu, společně s navýšením energetického využití odpadů nebo recyklace. Poplatky za uložení využitelného odpadu na skládku postupně narůstají, na konci platnosti Plánu se předpokládá zákaz skládkování biologicky nestabilizovaného směsného komunálního odpadu. [92]

4. Technologie a technika zpracování gastroodpadu

Mezi nejrozšířenější technologie patří kompostování a anaerobní digesce. Méně rozšířené nebo ve fázi výzkumu jsou pyrolytické a hydrotermální procesy.

4.1. Kompostování

Kompostování je aerobní biodegradabilní proces, při kterém dochází k přeměně biologicky rozložitelného materiálu (jeho stabilizaci) na humusové látky, které lze využít jako účinné organické hnojivo. Humus kladně ovlivňuje biologické, fyzikální a chemické vlastnosti půdy, dlouhodobě poutá živiny v půdě a tím brání jejich vyplachování do povrchových nebo podpovrchových vod. Absence adekvátního množství humusu a organických látek v půdě má za důsledek sníženou úrodnost půdy i za použití anorganických hnojiv. Vyčerpání organických látek z půdy také způsobuje horší jímavost vody. Nevsákne se dostatečně rychle a steče po povrchu, způsobující vodní erozi půdy nebo v horším případě povodně. Nemá-li srážková voda příležitost proniknout hlouběji do půdy, v extrémních případech může dojít k vysychání krajiny vlivem snížení hladiny podzemní vody. [6]

Kompostování je součástí lidské zemědělské činnosti již od nepaměti, zmínky o účelném kompostování lze dohledat v pramenech ze starověkých civilizací [7]. Na území České republiky bylo průmyslové kompostování zavedeno v roce 1915, v rámci dnes již historické čistírny odpadních vod v Praze-Bubenci. Byly zde kompostovány čistírenské kaly, popel, smetky z ulic nebo rašeliny. Mezi lety 1955 až 1989 bylo kompostování podporováno státem, po změně režimu se změnila preference v prospěch skládkování nebo později spalování biologicky rozložitelného odpadu. Od přelomu tisíciletí znovu narůstá zájem o kompostování odpadů, hlavně odpadů z údržby veřejné zeleně (viz. Tabulka 1). [8]

Tabulka 1: Množství kompostovaných odpadů a BRKO na území ČR v letech 2008 – 18 [9], [10], [11]

Veškeré odpady										
rok	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
[t.10 ³]	232	314	362	406	376	300	356	478	518	542
Z toho BRKO										
rok	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
[t.10 ³]	55,7	75,7	73,8	85,1	96,1	93,4	141,2	244,6	261,3	272,8

4.1.1 Fáze kompostovacího procesu

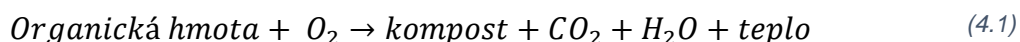
Pochody probíhající uvnitř kompostované hmoty [12]:

- Tlení: Aerobní rozklad organické hmoty za vzniku CO₂ a dalších plynů, vody a minerálních látek.
- Kvašení: Anaerobní rozklad organických uhlíkatých látek na kvasné produkty a CO₂ – v kompostu nežádoucí.
- Hnití: Rozklad dusíkatých organických látek za omezeného přístupu vzduchu, vzniká CO₂, H₂S, H₂ a NH₃. Proces užitečný v omezené míře.
- Humifikace: Mikrobiální a enzymatické procesy, vznikají huminové kyseliny – komplexní a nejdůležitější proces přeměny.

Na vzniku humusu se podílejí [12]:

- Mikroorganismy rozkládající bezdusíkaté organické sloučeniny.
- Mikroorganismy rozkládající dusíkaté organické sloučeniny – amonifikací vzniká NH₃, využitelný některými rostlinami. Další oxidací amoniaku vznikají dusitany nebo dusičnany (tzv. nitrifikace).

Zjednodušeně lze proces kompostování zapsat takto [12]:



Pochody probíhající v procesu kompostování probíhají spontánně a kontinuálně, nelze tedy přesně definovat jednotlivé časové úseky a průběhy procesů. Proces kompostování je obvykle rozdělován do tří fází [12]:

4.1.1.1. Rozkladná fáze (mineralizace)

V této fázi jsou rozkládány lehce rozložitelné látky jako například cukry, škroby a bílkoviny. Aktivitou mikroorganismů vzroste teplota uvnitř kompostu na 50 – 65 °C, ale může vystoupat až k 70 °C, podle složení kompostované biomasy. Vyšší teplota je výhodná pro hygienizaci; dojde k zahubení přítomných patogenů a semen plevelů. Dále dochází k uvolňování fyto toxinů přítomných v čerstvé organické hmotě. Doba trvání této fáze je 3 – 4 týdny, při použití méně pokročilých technologií až 2 měsíce. Ubyde podstatné množství objemu a hmotnosti (až 30 %). [12], [7], [13], [20]

4.1.1.2. Fáze přeměny (stabilizace)

Dochází k pomalejšímu rozkladu obtížněji rozložitelných látek jako celulóza a lignin. Tato fáze trvá 4 – 6 týdnů. Teplota klesne na 40 – 45 °C. Kompost nabývá hnědé barvy, drobkovité struktury a dojde ke změně i jeho vůně. Začínají vznikat humusové látky, v kompostu nelze rozeznat původní složky. Na této fázi se podílejí i vyšší organismy

jako členovci nebo kroužkovci. Hmotnostní úbytek v této fázi činí zhruba 10 %. [12], [7], [13], [20]

4.1.1.3. Fáze zrání (syntézy)

Teplota uvnitř kompostu se vyrovná teplotě okolí. Vznikají humusové látky, směs nabyde homogenity a tmavě hnědé až černé barvy. Hmotnost ubyde o dalších 10 %. [20]

4.1.2 *Faktory ovlivňující kompostovací proces*

Ačkoliv proces kompostování probíhá autonomně, není zaručena tvorba kvalitního substrátu. Vytvořením špatných podmínek mohou nastat výše uvedené nežádoucí procesy. Nýbrž lze také proces zlepšit kvalitativně a kvantitativně. [12]

4.1.2.1. Homogenizace

Kompostovaný materiál není nikdy jednosložkový, je tedy potřeba směs řádně promíchat, aby proces kompostování probíhal co nejrovnoměrněji. Rozměrnější materiál, včetně kuchyňského odpadu a gastroodpadu je nutné desintegrovat drtičem nebo štěpkovačem. Velikost částic by neměla přesahovat 12 mm. [12], [94]

4.1.2.2. Mikroorganismy v půdě

Pro optimální průběh procesu se do kompostovaného materiálu přimíchává menší množství zeminy nebo vyzrálého kompostu. Touto činností je zaručena přítomnost všech potřebných mikroorganismů pro správný průběh procesu, které nemusí být přítomny v kompostovaném materiálu. [12]

4.1.2.3. Poměr uhlíku a dusíku (C:N)

Poměr uhlíku k dusíku je důležitý parametr ovlivňující proces rozkladu. Uhlík je pro mikroorganismy zdrojem energie, dusík je potřebný pro růst a rozmnožování. Pokud má základní materiál nízký poměr C:N, resp. menší než 15:1, fáze mineralizace probíhá velice rychle, avšak nadměrné množství dusíku, přesahující metabolickou potřebu mikroorganismů, má za důsledek jeho uvolňování ve formě NH_3 . Tyto emise nejen způsobují zápach a znečištění vzduchu, ale také snižují obsah dusíku ve finálním substrátu, a tím snižují jeho hnojivé účinky. Žádoucí stav je, aby vznikající NH_3 byl okamžitě využit příslušnými nitrifikačními bakteriemi a žádný volný NH_3 neunikal do ovzduší. [12], [14], [15], [16]

Z hlediska mikroorganismů je optimální poměr 25:1. Pro kompostování je udávána jako optimální hodnota poměr 30:1. S rostoucím poměrem úměrně roste doba rozkladu. Je tedy potřeba hledět na složení kompostované hmoty a připravit adekvátní směs.

Hodnoty C:N pro většinu materiálů jsou tabelovány. Výsledný poměr uhlíku a dusíku se poté dá spočítat ze vztahu (4.2) [12]:

$$C:N = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot C_i (100 - W_i)}{\sum_{i=1}^n M_i \cdot N_i (100 - W_i)} \quad (4.2)$$

Kde:

n – počet komponent [-]

M_i – množství jednotlivých komponent [kg]

C_i – obsah uhlíku v sušině [% hm.]

N_i – obsah dusíku v sušině [% hm.]

W_i – vlhkost [%]

V průběhu kompostovacího procesu poměr postupně klesá (zralý kompost může mít hodnotu C:N až 12:1) vlivem vylučování uhlíku ve formě CO₂. [12]

4.1.2.4. Provzdušňování (aerace)

Pro zajištění průběhu aerobních pochodů je nutné, aby obsah vzdušného kyslíku neklesl pod kritickou hodnotu. V případě nedostatku optimálního množství kyslíku začnou převažovat nežádoucí anaerobní pochody. Provzdušňování kompostovaného materiálu je zajišťováno buď pasivně nebo aktivně. [7], [12]

Pasivní provzdušňování spočívá v procházení vzduchu kompostovaným materiálem tzv. komínovým efektem. Vzduch je nasáván vespod kompostu a zahřívá se. Prochází skrz kompost směrem vzhůru, kde vychází zpět do ovzduší. [12]

Aktivním provzdušňováním se rozumí zavedení nuceného provzdušňování zavedeného v kompostu, které umožňuje zrychlit a zkvalitnit proces, avšak je finančně náročnější řešení. [12], [7]

4.1.2.5. Obsah vlhkosti

Voda je klíčová složka mikrobiální aktivity, a proto je nutné v kompostovaném materiálu udržovat adekvátní hladinu vlhkosti. Optimální vlhkost počátečního kompostovaného materiálu závisí na velikosti částic a složení kompostované hmoty. Je-li vlhkost příliš vysoká, voda zaplaví póry a neumožní vzduchu proudit skrz kompost, čímž omezí průběh aerobních pochodů. V tomto případě je nutné do kompostované hmoty přidat suchý materiál pro vyrovnání výsledné vlhkosti, jako třeba piliny. Naopak, je-li vlhkost příliš nízká, mikrobiální procesy probíhají pomalu nebo vůbec neproběhnou. Tato hranice je méně než 8 – 12 %. Za optimální obsah vlhkosti kompostu je považována hodnota 40 – 60%. [7], [17]

Obecně je vhodnější zakládat kompost s nižším obsahem vlhkosti, vodu lze dodat později. S průběhem procesu kompostování se snižuje vlhkost a klesá i mikrobiální poptávka po ní. [12]

Vlhkost vyžralého kompostu se posuzuje hmatovou zkouškou. Kompost by měl jít smáčkout v dlani, aniž by z něj vytékala voda. Po povolení stisku by se měl zformovat žmolek, který drží tvar. [12]

4.1.2.6. Teplota

Teplota je veličina, která se během procesu kompostování pravidelně sleduje. Vypovídá o statutu mikrobiálních procesů a stabilitě kompostu. Teplota se měří tyčovým teploměrem, který je do kompostované hmoty zapíchnut. Podle teploty se určuje, kdy je potřeba provést aerační překopávku nebo kdy je možné kompost expedovat. V kompostu musí být držena teplota nad 45 °C po dobu pěti dnů. U kompostů vyráběných z tuhých komunálních odpadů, kam gastroodpad a kuchyňský odpad patří, musí být dosaženo teploty alespoň 55 °C po dobu 21 dnů, a zároveň teploty alespoň 65 °C po dobu 5 dnů. [12], [82]

Gastroodpady také musí před kompostováním projít hygienizací – úpravou odpadu, kterou se snižuje obsah patogenních organismů. Nejběžnější metodou hygienizace je termická metoda. Minimálním požadavkem je udržení teploty min. 70 °C po dobu alespoň jedné hodiny. Moderním řešením hygienizační jednotky pro kompostárny je tzv. hygienizační kontejner CSC. Jedná se o kompaktní stanici pro hygienizaci biologicky rozložitelných odpadů. Kontejner je vybaven monitorovacím zařízením pro sledování průběhu hygienizace, datový výstup je možné sledovat dálkově na počítači nebo chytrém telefonu. Po dokončení hygienizace je výstup přidán do zakládky. Mobilita kontejneru je v tomto ohledu další výhodou, jelikož jej lze dopravit na místo určení obvyklou mechanizací. [93], [94]

Teplota se podle kompostovací normy ČSN 46 5735 měří ve středu výšky zakládky v minimální hloubce 1 m od povrchu zakládky. [12], [18]

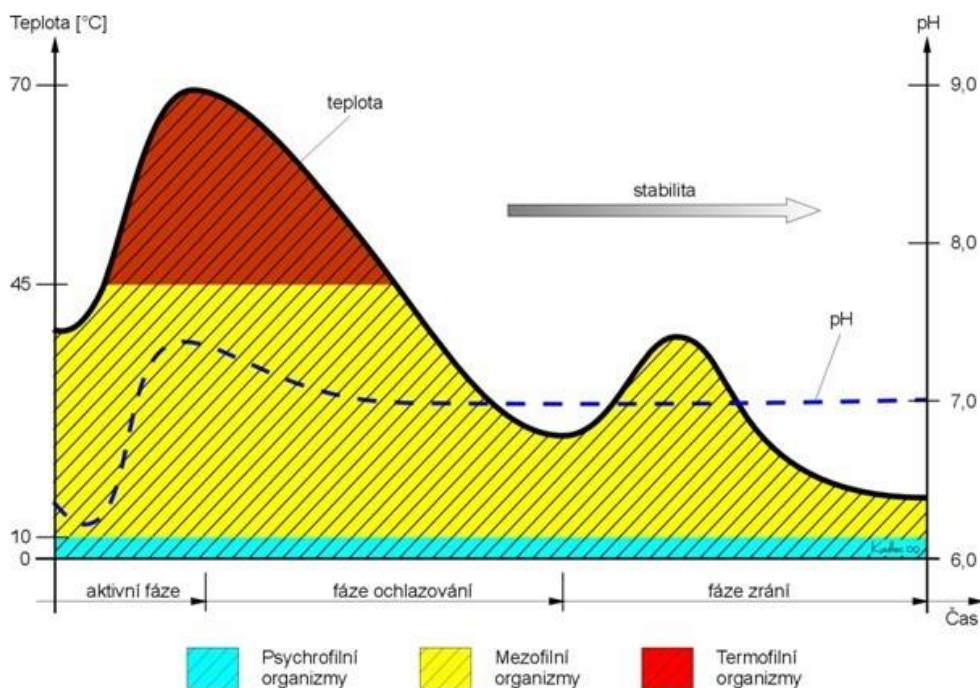
4.1.2.7. pH

Správným poměrem C:N lze udržet hodnoty pH v normě. Optimální pásmo je mezi 5,5 – 8 (norma uvádí 6 – 8). Zatímco bakterie preferují neutrální hodnoty pH, houby se lépe rozvíjejí v kyselejších prostředích. Hodnota pH s probíhajícím procesem postupně klesá. Po dokončení mineralizace začne opět růst a konečný produkt má pH 8 – 8,5. [7], [12], [18]

V případě příliš nízké hodnoty pH je možné do kompostu před překopáváním přidat vápno, tato činnost však může vést k navýšení emisí NH_3 v pozdějším stádiu kompostování. Stejně tak kompostovaný materiál s vysokým pH v kombinaci s vysokými teplotami může ztrácet dusík v uvolňovaném NH_3 . [7], [12]

Obvykle je klesnutí pH pod optimální pásmo v průběhu kompostovacího procesu nepravděpodobné. Výjimkou jsou odpady z ovoce, jež mohou klesnout až na 4,5. [7]

Průběh teplot a hodnot pH během průběhu kompostování je zřejmý z Obrázku 4.1



Obrázek 4.1: Průběh teploty a pH během kompostovacího procesu [20]

4.1.3 Příklady průmyslových kompostovacích technologií

4.1.3.1. Běžné kompostovací technologie

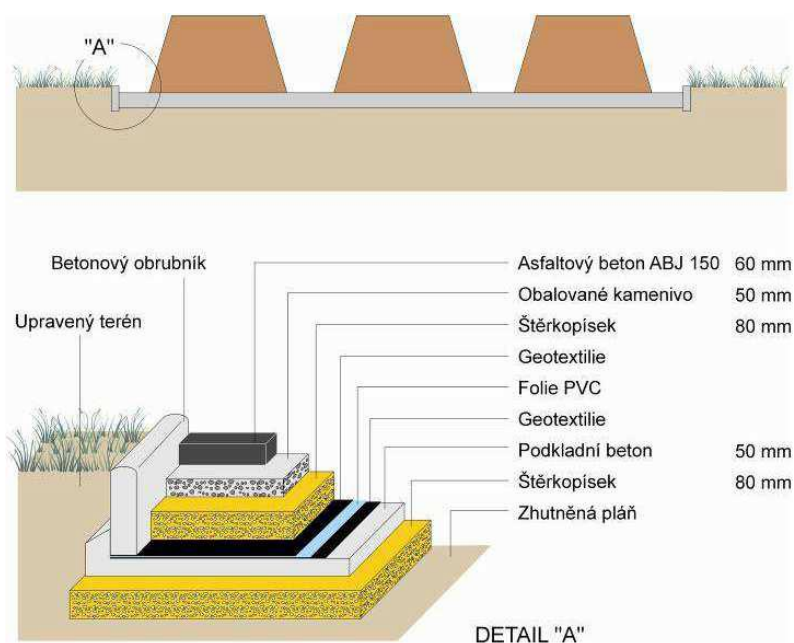
Tyto technologie většinou vyžadují velkou pracovní plochu, mají nižší investiční a provozní náklady, ale svou prašností a zápachem mohou zatěžovat okolní zástavbu. Stabilizovaný produkt má relativně nižší kvalitu a kompostovací proces trvá 3 – 6 měsíců. [12]

Kompostování na hromadách (zakládkách)

Jedná se o nejrozšířenější a nejlevnější metodu průmyslového kompostování. Kompostovaný materiál je uložen do dlouhých hromad obvykle o trojúhelníkovém či lichoběžníkovém průřezu a výšce 2 – 4 m (především určeno používanou mechanizací při homogenizaci a překopávání materiálu). Jsou-li hromady příliš malé, může docházet ke ztrátám tepla a narušení teplotního režimu probíhajících pochodů. U příliš rozměrných

hromad tvořených vlhkými a těžkými materiály vzniká riziko anaerobní fermentace ve středu hromady. [12], [19]

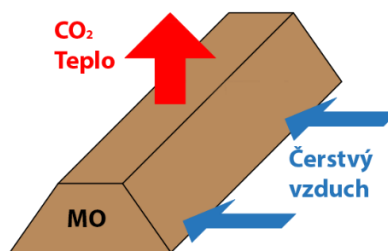
Zakládky v kompostovacích zařízeních mohou být zhotoveny pouze na speciální výrobní ploše. Tato plocha musí být vodohospodářsky zabezpečená, aby nedošlo ke kontaminaci podzemních vod, musí obsahovat jímku pro výluhy ze srážek a závlah. Pro usnadnění odvodnění přebytečné vody z hromad do jímky jsou výrobní plochy projektovány s minimálním spádem 2 %. Plocha musí být samozřejmě dostatečně velká pro umožnění manipulace s mechanizací. Složení kompostovací plochy je patrné z Obrázku 4.2. [12], [19]



Obrázek 4.2: Vrstvy kompostovací plochy [21]

Překopávání kompostované hmoty je docíleno pomocí překopávací jednotky připojené ke traktoru. Materiál, který byl původně vespu hromady je překopáním přemístěn na vrch. Také je možné pomocí překopávací jednotky spojit dvě hromady do jedné, vlivem úbytku hmotnosti a objemu. Na počátku kompostovacího procesu, kdy jsou pochody uvnitř hromad nejintenzivnější, je potřeba překopávat častěji, s postupem procesu nutnost překopávání klesá, nicméně překopáváním zrajícího kompostu lze urychlit proces zrání a získat kvalitnější výstup. [12], [19]

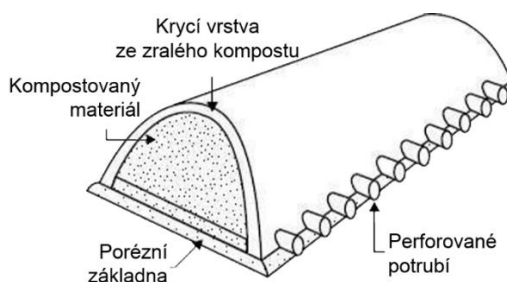
Zjednodušené schéma kompostovací hromady je znázorněno na Obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Zjednodušené schéma kompostovací hromady

Kompostování na hromadách pasivně provzdušňovaných

Tato metoda vychází z kompostování na hromadách, není však nutné pravidelně překopávat kompostovanou hmotu, protože výrobní plocha je přizpůsobena k instalaci perforovaných trubek, které usnadňují ventilaci v hromadách (viz. Obrázek 4.4). Vzhledem k absenci aeračních překopávek je nutné, aby kompostovaný materiál byl důkladně homogenizován. Základna hromady je tvořena materiály schopnými absorbovat přebytečnou vlhkost, jako např. sláma, rašelina nebo vyzrálý kompost. Po dokončení kompostování jsou perforované trubky vyjmuty a materiál tvořící základnu je smíchán s hotovým kompostem. [12]



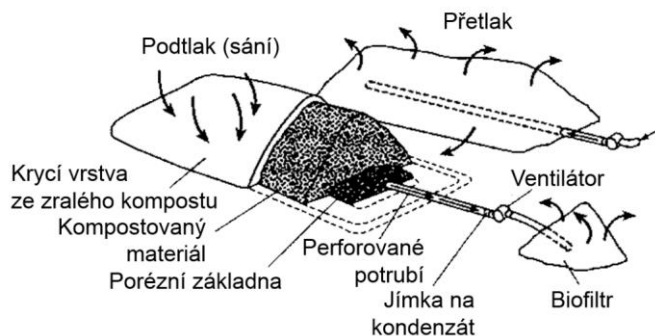
Obrázek 4.4: Schéma pasivně provzdušňované hromady [84]

Kompostování na hromadách aktivně provzdušňovaných

Aktivně provzdušňované hromady se od pasivně provzdušňovaných liší pouze přítomností ventilátorů, které zprostředkují proudění vzduchu v hromadách. Ventilátory mohou v hromadách vytvářet přetlak nebo podtlak. (viz. Obrázek 4.5) [12], [22]

U přetlakového režimu je vzduch hnán dovnitř hromady a vychází ven přirozeným komínovým efektem. Pro snížení zápachu je možné pokrýt kompostovací hromadu vrstvou vyzrálého kompostu. Tato vrstva také zlepšuje tepelnou izolaci nebo zamezí nadměrnému vysychání hromady. [12], [22]

U podtlakového režimu vzduch proudí naopak: ventilátorem odsáván z hromady potrubím a vypouštěn mimo hromadu, často přes biofiltr pro minimalizaci zápachu. [12], [22]



Obrázek 4.5: Schéma aktivně provzdušňované hromady [22]

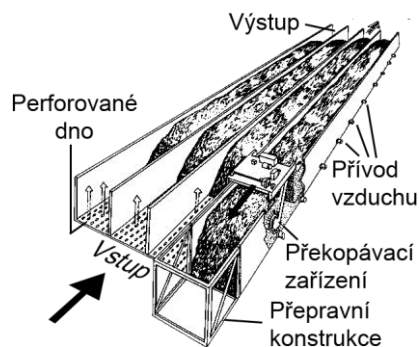
4.1.3.2. Intenzivní kompostovací technologie

Narozdíl od technologií předešlých, zabírají relativně málo prostoru, jsou vhodné pro provedení v halách (u některých i nutnost), čímž odpadá problém se zápachem a prašností. Kompostovací proces je možné lépe kontrolovat pomocí současné činnosti aeračních a překopávacích aktivit, a tudíž má výstupní substrát vyšší kvalitu. Kompostovací proces trvá dny až týdny; závisí na konkrétní technologii. Fáze dozrávání trvá asi 2 měsíce. Náklady na výstavbu, provoz a údržbu jsou však hlavní nevýhodou. Tyto technologie vyžadují neustálý přístup k elektrické energii. [12]

Kompostovací žlaby

Kompostovací žlaby jsou koryta vybavena překopávacím mechanismem a perforovaným dnem. Na vstupní části koryta je materiál dodáván čelním nakladačem. Překopávač se pohybuje po kolejnicích nebo jiném vedení na okrajových zdech koryta od jedné strany koryta k druhé a prostřednictvím rotačního nástroje s lopatkami promíchává kompostovaný materiál. Touto činností se kompost posouvá v korytě po jednotlivých překopávkách, zatímco přes dno koryta je vháněn vzduch pro dostatečný průběh kompostovacího procesu. Na výstupní straně koryta je odebrán hotový kompost, který je většinou ještě odložen ke zrání. [12], [22]

Koryto bývá 2 – 6 m široké a 1 – 3 m hluboké. Vzhledem k mechanizaci je nutné dbát na rovnost a přímou stěn koryta. Je možná konstrukce více paralelních žlabů, kde je překopávač transportován mezi jednotlivými žlaby podle potřeby (viz. Obrázek 4.6). [12], [22]



Obrázek 4.6: Kompostovací žlab [42]

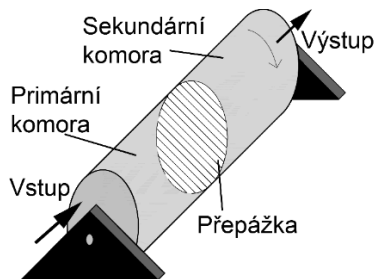
Kompostování v rotačním bubnovém reaktoru

Kompostovací proces probíhá ve vodorovně uloženém dutém válcovém zařízení, které rotuje okolo své osy. Systém má průměr okolo 3 m a délku zhruba 35 m. Vzduch vchází do bubnu na výstupu, kde se jím ochladí výstupní substrát, což vzduch zároveň ohřeje, a umožní rychleji nastartovat kompostovací proces ve vstupním materiálu. Buben může být otevřený nebo tvořen více segmenty. [12], [22]

Otevřeným bubnem prochází veškerá hmota najednou, dobu zdržení materiálu v reaktoru určuje rychlost otáčení a sklon osy bubnu. [12], [22]

V segmentovaném reaktoru je buben rozdělen na dvě až tři komory propojené uzavíratelnými přepážkami. Na konci procesu se vyprázdní výstupní segment a obsahy předsazených komor se přes otevřené přepážky posunou do dalšího stupně. Do vstupní, prázdné komory se založí nový čerstvý materiál. V komorách obvykle zůstane malé množství materiálu, které funguje jako inkulum pro rychlejší iniciaci kompostovacích procesů. Schéma reaktoru je znázorněno na Obrázku 4.7. [12], [22]

Po vyjmutí kompostu z reaktoru je kompost prosítován a větší nezkompostované částice jsou navraceny zpět do procesu. V menších kvantech lze k této metodě použít i starou míchačku na beton nebo krmiva. [12], [22]



Obrázek 4.7: Schéma rotačního bubnového reaktoru

Kompostovací vaky

Systém zvaný EcoPOD of firmy AgBag spočívá v zabalení kompostovaného materiálu do rukávového jednorázového vaku z LDPE pomocí speciálního stroje. Vaky mají průměr 2 – 3 m a délku až 60 m. Vak je uzavřen z obou konců, těsní vodu i vzduch. K aeraci napomáhá perforovaná hadice z PE po celé délce vaku, dodávající pouze optimální množství vzduchu. Kompostovací proces trvá 6 – 8 týdnů, po dokončení kompostování je vak rozříznut, výsledný substrát prosítován a dále zpracován. [23], [24]

Tato technologie nevyžaduje vodohospodářsky zabezpečený podklad, nicméně pro přípravu směsi vkládané do vaku (drcení, homogenizace) je takový podklad potřeba. Materiál vaku absorbuje sluneční záření, což může napomoci k termofilním pochodům v kompostu. Vzhledem k izolačním vlastnostem vaků nemají výluhy z kompostu kam odtékat a zůstanou ve vaku celou dobu – proto je třeba dbát na složení a vlhkost vstupního materiálu, jinak vzniká riziko nežádoucích procesů a plísňivosti. Nevýhodou je také závislost na specializované mechanizaci. [23], [24]

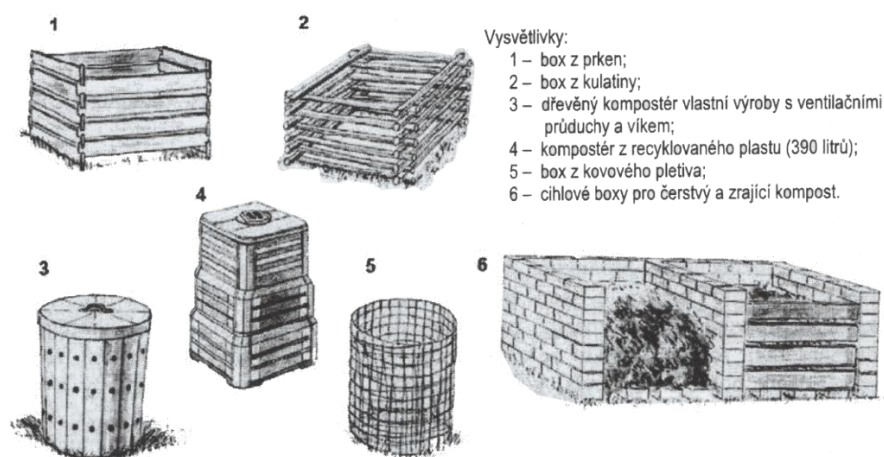
4.1.4 Příklady kompostovacích technologií použitelných v domácnostech

Domácí kompostování

Výhradně použitelné na venkově a v rodinných domech se zahradou, jedná se o nenáročný způsob zpracování nejen kuchyňského, ale většiny biologicky rozložitelného odpadu vznikajícího na úrovni domácností. Kompostovací proces probíhá na volné hromadě nebo ve venkovních kompostérech. Kompostéry mohou být jednoduché konstrukce z dřevěných prken, plastu, cihel nebo jiného libovolného odolného materiálu (viz. Obrázek 4.8). Mohou také mít vícekomorovou podobu pro jednotlivé fáze kompostovacího procesu nebo rotační uložení (minimalizovaná a zjednodušená podoba rotačního bubnového reaktoru). [12]

Vhodným doplňkem je zahradní drtič nebo štěpkovač a síto pro oddělení hotového kompostu – nadsítná frakce je navracena do procesu jako inokulát, podsítná je připravena k použití. [12]

Výhodou je finanční dostupnost, odvoz menšího množství odpadu, a zároveň snížení biologické složky odpadu odvezeného do spaloven nebo na skládky. Nevýhodou je nutná péče o kompost, tedy dostatečná informovanost obyvatel ohledně správného kompostování. Zároveň takto zpracovaný odpad nelze vykázat EU. [12]



Obrázek 4.8: Příklady domácích zahradních kompostérů [12]

Komunitní kompostování

Nejedná se o technologii, ale o organizovanou činnost více občanů. Podstatou je, že skupina lidí (obytný dům, zahrádkářská kolonie, atd.) sdílí jeden kompostér, kam odkládají své biologicky rozložitelné odpady. Na trhu jsou k dispozici kompostéry s kapacitou schopnou pokrýt odpadovou produkcí desítek lidí. Existují i uzamykatelné modely. Stejně jako u domácího kompostování, špatná péče o kompost může mít za následek nekvalitní produkt. Potřebná je tedy znalost, kázeň a organizovanost zúčastněných. [12], [25]

Kuchyňské kompostéry

a) Elektrické kompostéry

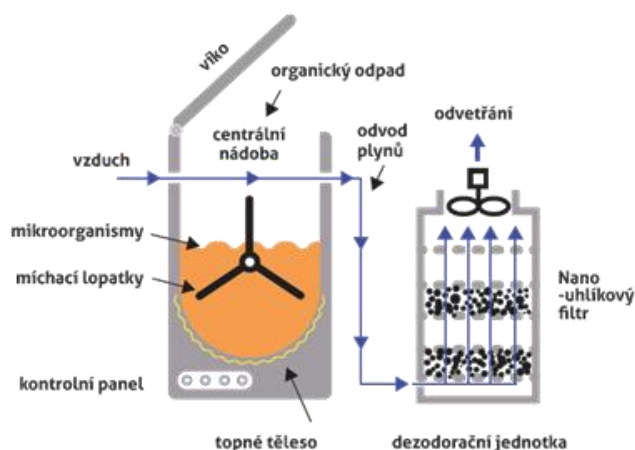
Nejedná se o klasické kompostování jako takové, řeč je spíše o rychlém zpracování zbytků jídla a předúpravě pro další využití. Pracují ve třech fázích: zahřívání, míchání a ochlazení. [27], [28], [29], [30]

Při zahřívání je obsah pracovního prostoru ohřán na hygienizační teplotu okolo 70 °C při pomalém promíchávání za činnosti polyextremofilních bakterií, pro které je ideální prostředí s vysokou teplotou, nízkým pH a salinitou. Stačí je do pracovního prostoru dodat pouze jednou – pokud nemají dost potravy, vytvoří spóry, dokud jim není dodán nový substrát. Odpadní vzduch je vyváděn přes uhlíkový filtr pro minimalizaci zápachu, vypouštěn je pouze oxid uhličitý a vodní pára. [27], [28], [29], [30]

Mícháním je dosaženo aerace, proces probíhá tak dlouho, dokud substrát nedosáhne práškové struktury. Po ochlazení je možné produkt vyjmout. Celý proces trvá maximálně 24 hodin. Objem odpadu je zredukován až o 90 %. Zjednodušené schéma elektrického kompostéru je na Obrázku 4.9. [27], [28], [29], [30]

Výsledný produkt je poté možné vyházovat do obyčejných nádob na biologický odpad, dále ho kompostovat nebo zpracovat anaerobně v bioplynové stanici. Společnost Greengood nabízí různé velikosti kompostérů podle kapacity, nejvyšší třída pojme až 1500 kg odpadu za den. [27], [28], [29], [30]

Výhodou elektrického kompostéru je rychlost, zpracuje i kousky masa, mléčné výrobky nebo prošlé potraviny. Nevýhodou je vysoká cena a nutnost neustálého připojení k elektrické síti, u kompostérů vyšších kapacit také větší spotřeba energie. [27], [28], [29], [30]



Obrázek 4.9: Schéma elektrického kompostéru [27]

b) Fermentovací kompostéry

Fermentovací kompostéry jsou podobné elektrickým kompostérům, avšak nejsou nezávislé na elektrické energii. Ačkoliv se jedná o „kompostéry“, v této technologii je využíváno anaerobních nebo anoxických procesů. Nejrozšířenější metoda využívá tzv. EM (efektivní mikroorganismy). Jedná se o převážně bakterie mléčného kvašení, kvasinky a fototrofní purpurové nesírné bakterie, které jsou do odpadu inokulovány prostřednictvím tzv. Bokaši. Význam Bokaši jako takový je podobný kompostování, avšak na rozdíl od kompostování, vstupní materiál není rozkládán, ale kvašen. Po dokončení kvašení je aplikován do půdy a nevyžaduje žádnou fázi zrání. Výsledný substrát si zachová obsah většiny uhlíku a energie, které jsou kontrastně během kompostování emitovány do ovzduší ve formě CO_2 a tepla. Tato praktika má mnohaletou tradici v zemích východní Asie. [31], [32], [33], [34], [35]

Jako inokulační médium EM do kompostéru se používají volně prodejné směsi otrub obohacené těmito organismy. Není to ale nutná prerekvizita, lze si vyrobit vlastní médium, které však nebude mít stejnou mikrobiální kompozici. Kompostér je vybaven vzduchotěsnou izolací a hrdlem s víčkem u dna nádoby pro extrakci výluhu. Při

jednotlivém ukládání kuchyňského odpadu do kontejneru je přisypáno určité množství inokulátu, materiál je udusán, přikryt a uzavřen. Po naplnění kompostéru je kompostér ponechán fermentačnímu procesu zhruba 14 dní, poté je možné produkty kvašení vyjmout. Během této prodlevy nelze přidávat nový odpad do kompostéru a je doporučováno mít druhý, identický, pro rotaci: Plný kompostér je ponechán procesu fermentace, prázdný je postupně plněn odpady a inokulátem. Výluh je nutné každodenně extrahovat, ať se jedná o odstavený plný kompostér nebo momentálně plněný. Výluh lze aplikovat jako hnojivo pro rostliny, ale vzhledem k nízkému pH vyžaduje stabilizaci v zemině. Výhodou EM kompostérů jsou nízké náklady, jsou vhodné do bytu a dovedou zpracovat i maso, pečivo, kosti a mléčné výrobky. Podmínkou je rozdělení vstupních surovin na menší kusy. Vzhledem k nízkému pH vzniká při fermentaci minimální množství CH_4 . [31], [32], [33], [34], [35]

4.1.5 Vermikompostování

Využitelné v kompostovacích hromadách, záhonech i v bytě, tato metoda kompostování využívá živých žížal, které získávají z organicky rozložitelného odpadu potravu. Žížaly dovedou denně přijímat v podstatě jakoukoliv organickou hmotu v množství rovném zhruba jejich vlastní tělesné váze. Z přijaté potravy 40 % hmoty využijí metabolicky a 60 % hmoty vyloučí ve formě biohumusu, který je považován za nejúčinnější organické hnojivo. [12], [36]

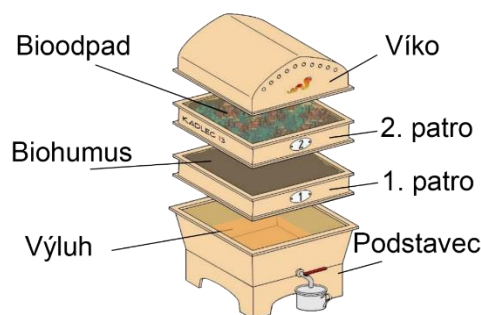
Pro vermikompostování se nejčastěji používá speciálně vyšlechtěná žížala kalifornská (*Eisenia andrei*). Optimální teplota prostředí je pro žížaly 19 – 22 °C. Žížaly vyžadují vlhkost substrátu 78 – 82 % a neutrální pH. Substrát musí být dostatečně provzdušněn, nesmí obsahovat nadměrné množství NH_3 a bílkovin (limit obsahu bílkovin je asi 45 %). Žížalám nesvědčí přímé sluneční světlo a silnější povětrnostní podmínky. [12], [36]

Při vermikompostování v hromadách je optimální koncentrace jedinců 50 000 ks.m⁻². Hromady bývají široké okolo 2 m, vysoké asi 60 cm, lichoběžníkového průřezu. Délka je libovolná. Před aplikací žížal je třeba upravit teplotu, vlhkost, pH a další faktory. Výrobní plocha musí splňovat požadavky shodné s klasickým kompostováním v hromadách. Také je vhodné zastřešení pro ochranu před přímým slunečním světlem. [12], [36], [37], [38], [39]

Řešením pro domácnosti mohou být venkovní nebo domovní vermikompostéry. Vermikompostéry obvykle mají více pater. V dolním patře se nachází hotový kompost,

kde již není pro žížaly zdroj potravy, takže patro opustily. V horním patře je pokládán biologický odpad, za kterým se žížaly přesouvají. Vzhledem k modularitě vermikompostérů lze rotovat jednotlivá podlaží a zefektivnit celý proces. Každé patro má perforované dno, pro volný pohyb žížal. Vespodu je jímka na výluh, tzv. žížalí čaj. Jedná se také o účinné koncentrované hnojivo, které vzniká společně s biohumusem. Schéma viz. Obrázek 4.10. [12], [36], [37], [38], [39]

Výhodou této metody je kontinuita procesu. Žížalám postačuje čistý kuchyňský odpad; není tedy nutné míchat gastroodpad s jinými typy biologicky rozložitelného odpadu pro optimální složení, jako tomu je u klasického kompostování. Nepatří sem zbytky masa, mléčné výrobky nebo tuky. Žížaly potřebují neustálý přísun nové potravy, jinak uhynou po určité době bez příjmu nového substrátu. Zároveň, je-li jim dodáváno nadměrné množství potravy nebo příliš velké kusy, nestíhají vše zkonzumovat, což může vést k rozšíření plísní. [12], [36], [37], [38], [39]



Obrázek 4.10: Kuchyňský vermikompostér [85]

4.1.6 Využití kompostu

Přes kladné účinky kompostu, kompost se netěší širokému odbytu. Látkové složení kompostu je ovlivněno vstupním materiálem, může kompost obsahovat nebezpečné látky v případě kompostování odpadů obsahujících takové látky. Mnoho lidí proto kompostům nevěří. Průmyslové kompostárny mají povinnost registrovat svůj kompost jako hnojivo v souladu se zákonem č. 156/1998 Sb. o *hnojivech*. Musí se tedy při jeho výrobě držet složení vstupních materiálů a výrobních postupů během procesu kompostování. [12], [81], [83]

Vyhláška č. 341/2008 Sb. o *podrobnostech s nakládání s biologicky rozložitelnými odpady* zařazuje výstupy ze zařízení na zpracování bioodpadů do 4 skupin podle obsahu sledovaných látek v souladu s normou ČSN 465735 [82]:

- 1. skupina: Výstupy, které jsou registrovatelné jako hnojiva.

- 2. skupina: Výstupy, které nesplňují limitní hodnoty pro použití jako registrovaná hnojiva, ale stále jsou využitelné mimo zemědělskou a lesní půdu.
- 3. skupina: Stabilizovaný bioodpad určený pro uložení na skládku.
- 4. skupina: Výstupy, které nelze zařadit do předchozích skupin.

Podle koncentrace sledovaných látek je 2. skupina dále dělena na 3 třídy podle určeného využití [82]:

- Třída I: Využití pro zeleň u sportovních, rekreačních a obytných zón.
- Třída II: Využití pro městskou zeleň, parky a lesoparky nebo rekultivaci terénu průmyslových zón.
- Třída III: Využití pro rekultivaci skládek.

V Tabulka 2 jsou uvedeny limitní hodnoty vybraných rizikových látek pro jednotlivé třídy a skupiny.

Tabulka 2: Limitní hodnoty koncentrace vybraných rizikových látek v jednotlivých skupinách [82]

Sledovaný ukazatel	Jednotka	2. skupina			3. skupina
		Třída I	Třída II	Třída III	
As	mg.kg ⁻¹ sušiny	10	20	30	40
Cd	mg.kg ⁻¹ sušiny	2	3	4	5
Cr	mg.kg ⁻¹ sušiny	100	250	300	600
Cu	mg.kg ⁻¹ sušiny	170	400	500	600
Hg	mg.kg ⁻¹ sušiny	1	1,5	2	5
Ni	mg.kg ⁻¹ sušiny	65	100	120	1510
Pb	mg.kg ⁻¹ sušiny	200	300	400	500
Zn	mg.kg ⁻¹ sušiny	500	1200	1500	1800
PCB	mg.kg ⁻¹ sušiny	0,02	0,2	-	dle využití
PAU	mg.kg ⁻¹ sušiny	3	6	-	dle využití
Nerozložitelné částice velikosti > 2 mm	% hmotnosti	max. 2	max. 2	-	-

4.2. Anaerobní digesce

Anaerobní digesce je mikrobiální proces, jehož nejdůležitější produkt je tzv. bioplyn. Bioplyn je označení pro homogenní směs množství plynů. Složení je velice variabilní, neboť závisí na vstupních surovinách, kompletaci a dokonalosti všech probíhajících procesů, aj. Z technického hlediska se za bioplyn považuje plyn s obsahem

55 – 65 % CH₄, 35 – 45 % CO₂ a méně než 1 % NH₃, H₂S aj. těkavých organických látek. [40]

Methanogenní mikroorganismy, které svou metabolickou aktivitou produkují CH₄, nejdůležitější složku bioplynu, patří do domény archaea. Jsou striktně anaerobní, extremofilní a jedny z nejstarších organismů na Zemi. Dokázaly se adaptovat na změnu kompozice zemské atmosféry a dnes jsou k nalezení v symbiotických bakteriálních společenstvech v podzemí, na dně močálů, v zažívacím traktu přežvýkavců, aj. [41]

Narozdíl od kompostování, což je aerobní proces, při anaerobním rozkladu organické hmoty vzniká menší množství ztrátové energie (uvolněné teplo) a menší množství biomasy. Tímto je většina energie obsažená v substrátu uchována ve vyprodukovaném bioplynu. [42]

Bioplyn byl člověkem údajně využíván již v 10. stol. př. n. l. k vyhřívání lázeňské vody v Asýrii. Existují domněnky, že ve starověké Číně byly odpady zpracovány anaerobně. Nicméně dobře zdokumentované užívání anaerobní digesce lze pozorovat na konci 19. století, v souvislosti se zpracováním kalů z čistíren odpadních vod, např. v Exeteru (Anglie) byl bioplyn využíván jako palivo veřejného osvětlení. Ve 20. letech 20. století byla v Číně založena jedna z prvních společností pracujících s anaerobní digescí odpadu na úrovni domácností. Čínská vláda podporovala od 70. let toto řešení u farmářů a rodin v odlehlých oblastech a počet takovýchto stanic roste i dnes. V asijských rozvojových zemích je rozšířen čínský a indický typ, oba dva mají stejný princip, ale liší se v konstrukci vyhnívací nádrže a jímání a odvodu vzniklého plynu. Stejně tak v Evropě se v 70. letech 20. století rozšířila produkce bioplynu z domény čistíren odpadních vod na stabilizaci exkrementů hospodářských zvířat, účelně pěstované (energetické) biomasy pro anaerobní digesci, odpady z potravinářského průmyslu nebo také kuchyňské odpady a gastroodpady včetně odpadního jedlého tuku. První bioplynová stanice v České republice byla vybudována v Třeboni, kde sloužila ke kofermentaci čistírenských kalů a kejdy z lokální velkovýkrmny prasat. K 31/12/2019 čítá počet bioplynových stanic v České republice 574. Většina bioplynových stanic je pouze zemědělských nebo v rámci čistíren odpadních vod. [12], [40], [43], [44], [45]

4.2.1 Fáze tvorby bioplynu

Stejně jako při kompostování, u anaerobní digesce (která se dá považovat za anaerobní analogii kompostování) dochází ke komplexní součinnosti fyzikálně-chemických a biologických procesů, kde metabolity jednotlivých mikroorganismů slouží

jako substrát pro jinou skupinu mikroorganismů, s methanogenními bakteriemi na konci řetězce. Obecně se proces anaerobní digesce dělí do čtyř fází: hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze a methanogeneze. Tyto fáze probíhají souběžně, zjednodušené schéma procesu je patrné z Obrázku 4.11. [40]

4.2.1.1. Hydrolýza

Spočívá ve štěpení makromolekulárních organických sloučenin (polysacharidy, proteiny, lipidy) na monomery. Tato fáze probíhá ještě za přítomnosti kyslíku. Hydrolytické mikroorganismy štěpí polymery prostřednictvím extracelulárních enzymů, produkty hydrolytického štěpení jsou již transportovatelné skrz plazmatickou membránu buněk. Pro průběh hydrolýzy je potřeba vlhkost prostředí nad 50 %. Souběžně s hydrolýzou probíhá acidogeneze. [12], [40], [41], [46]

4.2.1.2. Acidogeneze

Dochází ke spotřebování veškerého reziduálního kyslíku, monomery jsou uvnitř buněk štěpeny na jednodušší látky: organické kyseliny, alkoholy, CO₂, H₂. Kyselina octová vzniklá v této fázi již vstupuje do procesu methanogeneze. Ostatní organické kyseliny vzniklé v této fázi (propionová, valerová, máselná, kapronová) jsou ještě podrobeny acetogenezi. [12], [40], [41], [46]

4.2.1.3. Acetogeneze

Jedná se o zvláštní případ acidogeneze, kde vyšší organické kyseliny, alkoholy, atd. jsou štěpeny na kyselinu octovou, H₂ a CO₂. Mikrobiální společenstva figurující v této fázi mohou pozitivně i negativně ovlivnit obsah nejen CH₄, ale i H₂S a N₂O v plynu. Podrobněji je tato fáze probrána v publikaci od Straky [40]. Produkty reakcí jsou nakonec využity v poslední fázi, kdy je tvořen CH₄. [12], [40], [41], [46]:

4.2.1.4. Methanogeneze

CH₄ vzniká dvěma způsoby činností methanogenních bakterií [12], [40]:

- Hydrogenotrofní methanogenezi – přeměna H₂ a CO₂



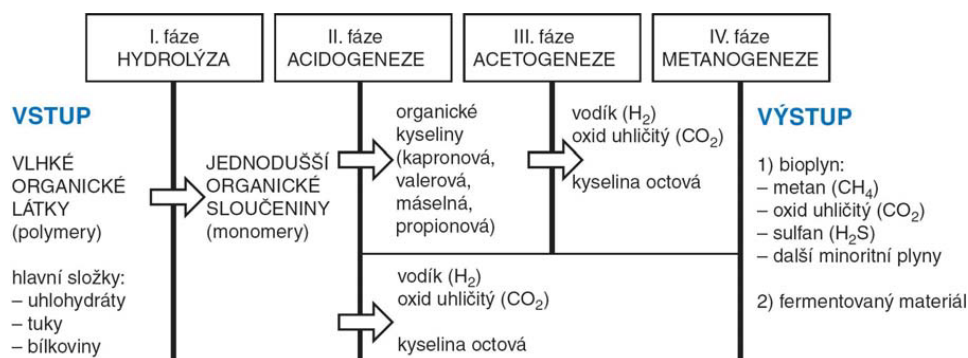
se podílí na 30 – 40 % vzniklého CH₄.

- Acetotrofní methanogenezi – rozklad kyseliny octové



se podílí na 60 – 70 % vzniklého CH₄.

Fáze methanogeneze probíhá asi 5x pomaleji než předešlé fáze, tomu je třeba přizpůsobit výrobní proces, aby nedošlo k přetížení reaktoru. [12], [40], [41], [46]



Obrázek 4.11: Schéma anaerobní digesce [41]

4.2.2 Faktory tvorby bioplynu

4.2.2.1. Teplotní režim

Teplota, při které anaerobní digesce probíhá, je zásadní kritérium pro konstrukci reaktoru, kinetiku tvorby bioplynu a obsah CH₄ v plynu.

Psychofilní oblast

Obvyklá teplota je 25 °C a méně, psychofilní podmínky jsou běžné u lagunových systémů bez promíchávání. Vzniklý bioplyn má vysoký obsah CH₄, ale proces je příliš pomalý a postrádá intenzitu. [40], [41], [47]

Mezofilní oblast

Nejpoužívanější teplotní režim pro většinu aplikací, jedná se o teploty okolo 30 – 40 °C. Do reaktorového prostoru je dodáváno teplo pro udržení provozní teploty, zdrojem je výhradně spalování vyrobeného CH₄. Proces digesce je stabilní, snadno ovladatelný, a v této teplotní oblasti se zpracovává většina organické hmoty. Jedná se o kompromis mezi rychlostí produkce celkového bioplynu a podílem CH₄ v plynu. [12] [40], [41], [47]

Termofilní oblast

Mezi 45 – 60 °C, termofilní oblast se vyznačuje nejintenzivnějším průběhem tvorby bioplynu. Fáze hydrolyzy probíhá až 5x rychleji, než v mezofilním režimu. Na druhou stranu, inhibičním účinkem volného NH₃ klesá obsah vzniklého CH₄ v bioplynu. Vysoká teplota procesu je vhodná pro zneškodnění patogenů přítomných ve vstupním materiálu, tedy je vhodné v tomto teplotním režimu zpracovávat hygienicky rizikový materiál, jako gastroodpad. Nevýhodou je energetická spotřeba na zahřívání reaktoru, požadavky na kvalitní materiály komponent vzhledem k opotřebení v prostředí vyšší teploty. Další

negativum je horší stabilita systému, jenž rychle reaguje na nejmenší změny a činí průběh digesce problematickým. [12] [40], [41], [47]

4.2.2.2. Obsah popelovin

Pro anaerobní digesci je vhodný co nejmenší obsah anorganických látek ve vstupním materiálu. Žádoucí je homogenizovaná směs materiálů s vysokým podílem biologicky rozložitelných látek. [41]

4.2.2.3. Obsah sušiny

Optimální obsah sušiny je u mokré anaerobní digesce tekutých odpadů 8 – 14 %, u pevných odpadů 22 – 25 %. Při obsahu sušiny pod 3 % dochází k negativní energetické bilanci procesu. Suchá anaerobní digescce probíhá při maximálním obsahu 50 % sušiny. [41]

4.2.2.4. pH

Stejně jako při kompostování, žádoucí je neutrální pH. Optimální hodnota spočívá v intervalu 7 – 7,8. Během procesu hodnota pH obvykle klesá, ale při poklesu na hodnotu 5 a méně mohou vzniknout inhibiční účinky pro některé methanogeny. Činností methanogenních organismů hodnota pH opět naroste. [40], [41], [47]

4.2.2.5. Poměr C:N

Optimální poměr uhlíku a dusíku je považován 30:1. Příliš vysoký obsah dusíkatých látek, jako třeba v exkrementech hospodářských zvířat, negativně ovlivní množství minoritních plynů v bioplynu (NH_3 , N_2O , atd.). V úzké spojitosti s pH může hlavně NH_4^+ působit inhibičně při příliš vysoké hodnotě pH. Na druhou stranu vysoký obsah uhlíkatých sloučenin, jako třeba celulózy, zpomaluje hydrolytickou fázi digesce. Pro optimální hodnotu poměru jsou míseny vstupní materiály, jako v případě kompostování. Jedná se o tzv. kofermentaci. [41], [47]

4.2.2.6. Vhodný vstupní materiál

Chod anaerobní digesce mohou narušit látky potlačující mikrobiální rozvoj (antibiotika) nebo plísně – u kuchyňských odpadů je tedy žádoucí včasný svoz a manipulace s tímto odpadem minimalizující takový stav. [41]

Homogenizace

Pro adekvátní průběh digesce je potřeba, aby fermentovaný materiál byl řádně promíchán. Tekuté substráty bývají míchány přímo při procesu digesce pro odloučení

metabolitů a rovnoměrnost teploty. Substráty s vyšším obsahem sušiny musejí být desintegrovány v drtičích nebo mlynech před vložením do fermentoru. [47]

4.2.2.7. Doba zdržení biomasy

Doba zdržení je doba, za kterou je dokončen proces digesce. Závisí na růstu a aktivitě mikrobiálních kultur a teplotě. Určuje množství dodávaného materiálu k digesci. Je-li doba příliš krátká, na výstupu vychází ještě nestabilizovaná biomasa. Je-li příliš dlouhá, snižuje se tím produktivita plynu. Obecně je udávána optimální doba zdržení 30 dní. [47]

4.2.3 Dělení technologií anaerobní digesce

4.2.3.1. Podle plnění

Kontinuální

U fermentorů určených pro zpracování tekutých odpadů s nízkým obsahem sušiny. Materiál je podáván v konstantním množství v průběhu času. Produkce bioplynu kolísá pouze minimálně. [41], [48]

Semikontinuální

Doba mezi jednotlivými dávkami vstupního materiálu je menší, než doba zdržení. Jedná se o nejpoužívanější zpracování tekutých organických materiálů, jsou dákovány 1 – 4x denně. Semikontinuální systémy jsou nenáročné na údržbu, lze je automatizovat. [41]

Diskontinuální

Doba zdržení odpovídá jednomu cyklu tvorby bioplynu. Tvorba bioplynu je přerušovaná. Používá se u suché fermentace. Manipulace s materiálem vyžaduje personální obsluhu. [41]

4.2.3.2. Podle obsahu sušiny

Mokrý

Používané při obsahu do 18 % sušiny, materiál je čerpatelný. [41]

a) Reaktory s biomasou v suspenzi

Obsah reaktoru je zahříván a míchán. Nejobvyklejší aplikace jsou anaerobní stabilizační nádrže pro stabilizaci čistírenských kalů. Mohou být jednostupňové nebo dvoustupňové (viz. Obrázek 4.12). [40]

U jednostupňových systémů v jedné nádrži probíhá ohřev, míchání a separace bioplynu. Ve dvoustupňových systémech v první nádrži probíhají intenzivní acidogenní procesy, v nádrži druhého stupně je proces finalizován a vzniká zde bioplyn. Zajímavé řešení dvoustupňové konstrukce je provoz prvního stupně v termofilním režimu, pro urychlení biodegradace, zatímco druhý, methanogenizační stupeň, funguje v mezofilním režimu pro maximální obsah CH₄ v bioplynu. Musí být dodrženo optimální pH, vhodná je recirkulace odpadního výtoku z methanizační nádrže. Biomasa určená k digesci je z odpadních vod separována např. v dosazovacích nádržích. [40]

b) Reaktory s imobilizovanou biomasou

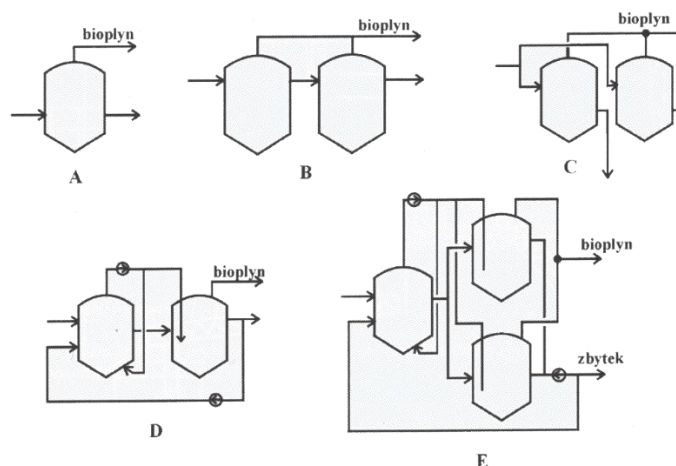
Odpadní voda protéká reaktorem, její doba zdržení je podstatně menší, než doba zdržení biomasy. Používají se pro zpracování odpadních vod chemických a potravinářských technologií (roztoky, koloidní roztoky, jemné suspenze). [40]

Biofilmové reaktory

Biomasa je ve formě vrstvy, tzv. biofilmu, usazená buď na nehybné náplni, kterou voda protéká, nebo na rotačních discích. [40]

Reaktory s agregovanou biomasou

Biomasa je agregována do granulí a tvoří kalový mrak. Velmi časté je spojení imobilizované a agregované biomasy najednou. [40]



Obrázek 4.12: Způsoby zapojení reaktorů [40]

Popis:

- A - Jednostupňový průtočný reaktor.
- B - Dvoustupňový sériový průtočný systém.
- C - Jednostupňový paralelní průtočný systém.
- D - Dvoustupňový sériový proces s recyklem.
- E - Dvoustupňový sérioparalelní systém s před reaktorem.

Suché

Slouží k digesci materiálu s obsahem nad 18 % sušiny. V kontinuálním procesu je materiál dávkován principem pístového toku, v nádrži je fermentovaný materiál míchán. Při semikontinuálním procesu je nádrž naplněna substrátem a plynotěsně uzavřena. Po ukončení fermentace je stabilizovaný materiál vyjmut a přidán nový substrát. Malé reziduum stabilizovaného digestátu se v nádrži ponechá jako inokulum. [40]

4.2.4 Hlavní prvky zařízení na výrobu bioplynu

4.2.4.1. Zdroj organických materiálů

Dovoz materiálu by měl odpovídat pracovní kapacitě bioplynové stanice. Bioplynové stanice kofermentující exkrementy hospodářských zvířat se siláží jsou vybaveny zásobníky, do kterých se zásobní materiál uloží. Kuchyňské odpady však nelze uchovávat v zásobníku, kvůli riziku vzniku hnilobných procesů a rozšíření plísní; v okamžiku, kdy jsou sváženy od zdroje, už strávily nějakou dobu v nádobě odděleného sběru a proto musí prodleva mezi přivezením do bioplynové stanice a vložením do fermentačního procesu být co nejkratší. [41]

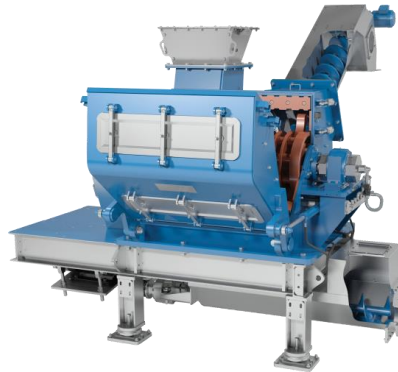
4.2.4.2. Příjem a úprava materiálu

Přivezený materiál je protříděn, desintegrován, promíchán; záleží na konkrétní metodě fermentace, které bude podroben. [41]

Z kuchyňského odpadu je třeba odseparovat případně přítomné zbytky obalů jako plast, sklo nebo kov (papír není považován za kontaminant). Toho je běžně docíleno prostřednictvím kladivových mlýnů. Hlavní princip těchto strojů spočívá v rozbalení nebo rozevření potenciálně přítomných obalů, nikoliv jejich roztrhání na malé kousky. K rozrušení obalů slouží šnekový dopravník na dně vstupního zásobníku. Následuje desintegrace v kladivovém mlýnu, kde je organický materiál rozdrčen na kašovitou hmotu. Bubnové síto zadržuje přítomné obaly, které jsou odváděny dalším šnekovým dopravníkem (pro odstranění zbytkové vlhkosti) do určeného kontejneru. Příklad takového stroje je uveden na Obrázku 4.13. Jelikož v desintegrovaném biologickém materiálu stále mohou zůstat nějaké kontaminanty (písek, sklo, kovy atd.), bývá součástí linky další mechanizace pro jejich odstranění. [49]

Následuje velmi důležitá úprava gastroodpadu: hygienizace. Podle předpisů Evropské unie musí být organický odpad podroben teplotě 70 °C nebo více po dobu alespoň jedné hodiny. Velikost částic takto zpracovávaného odpadu musí být menší, než 12 mm. Hygienizační jednotky také operují dávkově nebo kontinuálně. Následně je

gastroodpad smíchán s ostatním vstupním materiálem vhodným ke kofermentaci a vpraven do reaktoru. [49], [94]



Obrázek 4.13: Separátor zbytků potravin složený ze šnekových dopravníků a kladivového mlýnu [49]

4.2.4.3. Anaerobní reaktor

Místo, kde probíhá proces anaerobní digesce. Pro gastroodpad je nutné, aby reaktor pracoval v termofilním režimu. Reaktor bývá vybaven dávkovacím systémem, míchacím zařízením, otopnou soustavou a monitorovacími čidly pro kontrolu správného chodu procesu. [41]

4.2.4.4. Bioplynová koncovka

Jedná se o soustavu prvků pro manipulaci se vzniklým bioplynem; jímání bioplynu z reaktoru, bezpečnostní prvky proti zpětnému šlehnutí plynu, plynojem, komponenty pro úpravu a čištění plynu, zařízení pro využití bioplynu, fléra pro spálení přebytečného bioplynu atd. [41]

4.2.4.5. Kalová koncovka

Slouží k odvodu digestátu, jeho odvodnění, uskladnění, atd. [41]

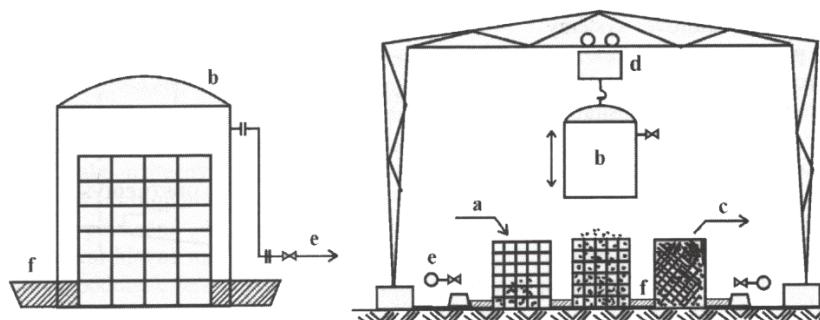
4.2.5 *Suchá fermentace*

V minulosti byla zkoušena mnohá zařízení různých konstrukcí pro suchou fermentaci. Jednou z nejčastějších metod jsou zvonové nebo komorové reaktory. [41]

4.2.5.1. Zvonové (košové) reaktory

Substrát je vložen do drátěného koše, přikryt plynotěsným zvonem a ponechán fermentaci. Fermentace probíhá volně a nelze ji nijak urychlit. Ze zvonu je odváděn vznikající bioplyn, jeho tvorba dosahuje maxima zhruba v polovině doby zdržení. Výhodou je jednoduchost, nenáročnost a absence problému odpadních vod z procesu. Nevýhodou je pomalý průběh fermentace, vzhledem k nemožnosti vytápění zvonu,

tz. kolísavá produkce bioplynu, která se může v chladném počasí úplně zastavit. Schéma zvonového reaktoru je na Obrázku 4.14.[40], [41]



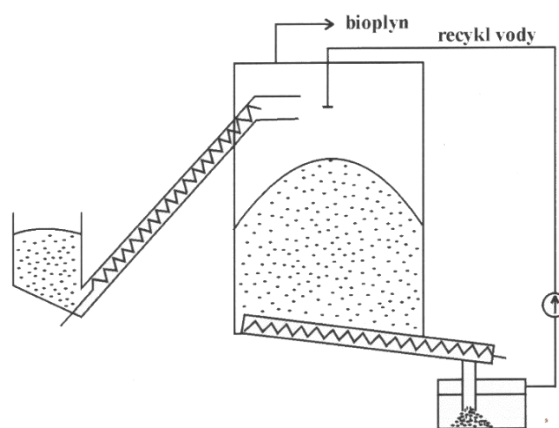
Obrázek 4.14: Zvonový reaktor [40]

Popis:

- | | | |
|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| a - Plnění koše | c - Odebírání digestátu | e - Sběrné plynovody |
| b - Překrývací zvon | d - Jeřáb | f - Vodní uzavěrová jímka |

4.2.5.2. Komorové reaktory

Podobný princip jako u zvonových reaktorů. Substrát je čelním nakladačem navážen do reaktoru (forma haly nebo kontejneru), který je posléze plynotěsně uzavřen. Systém může fungovat jako diskontinuální nebo kontinuální s dopravníky. Výhodou je lepší kontrola nad procesem tvorby bioplynu. Je také možné přes recyklační potrubí substrát zvlhčovat vznikajícími výluhy nebo pracovní tekutinou (tzv. perkolátem), který slouží jako inokulum pro fermentaci ještě nestabilní biomasy. Schéma komorového reaktoru je uvedeno na Obrázku 4.15.[40], [41], [48], [50]



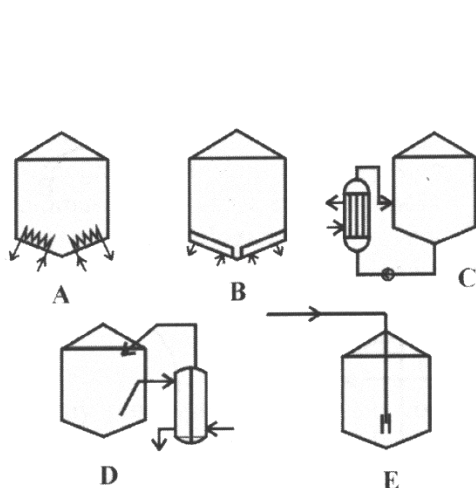
Obrázek 4.15: Schéma komorového reaktoru [40]

4.2.6 Mokrú fermentace

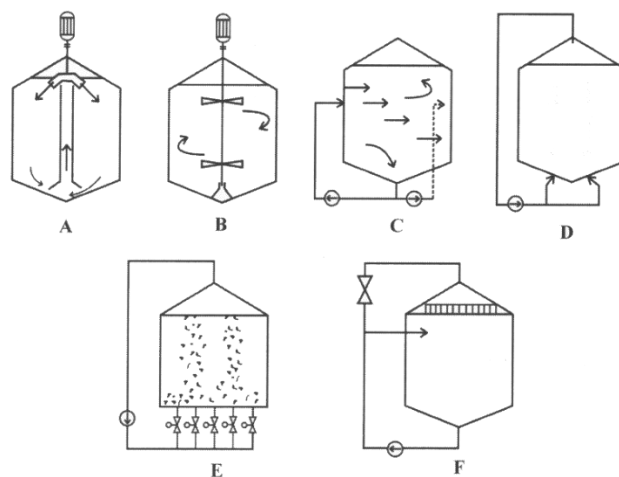
Suspenní reaktory pro mokrou fermentaci jsou konstruovány jako nádoby s volným prostorem, hlavně kvůli hrubším nebo hustějším substancím, které by reaktory s imobilizovanou biomasou neprošly. Reaktory mají obvykle kruhový půdorys, pro co

nejmenší tepelné ztráty. Mohou disponovat plochým nebo kónickým dnem a stropem pro zvětšení plynového prostoru nebo kalové jímkou. [12] [40], [41], [48], [50]

Princip mokré fermentace spočívá v tom, že předpřipravený materiál je dávkován do reaktoru kontinuálně nebo semikontinuálně, kde je zahříván a promícháván. Existují mnohé variace konstrukcí reaktorů (viz. Obrázek 4.12). Teplo je do reaktoru dodáváno otopnými soustavami (viz. Obrázek 4.16). Zdrojem tepla je spalování vyrobeného bioplynu. Míchání fermentovaného substrátu je dosaženo mechanicky, hydraulicky nebo pneumaticky (viz. Obrázek 4.17). Vznikající bioplyn je odváděn do plynojemu, kalovou koncovkou je odváděn digestát. [12] [40], [41], [48], [50]



Obrázek 4.16: Způsoby vytápění reaktorů [40]



Obrázek 4.17: Způsoby míchání reaktorů [40]

Popis:

- A - Vnitřní výměník
- B - Duplikovaný plášť
- C - Externí výměník
- D - Rekuperační výměník
- E - Přímotopná pára

Popis:

- A - Mechanické turbínové míchání
- B - Mechanické lopatkové míchání
- C - Hydraulické míchání
- D - Pneumatické míchání s pevnými vstupy
- E - Mechanické programově řízené míchání
- F - Hydraulické míchání s odpěnovací sprchou

4.2.6.1. Digestát

Termínem digestát je označován anaerobně stabilizovaný materiál obsahující sloučeniny N, P, K a stopové množství organických uhlíkatých sloučenin. Při aplikaci jako hnojivo N, P, K slouží jako zdroj živin a uhlíkatý organický zbytek jako prekurzor pro tvorbu humusu. Při dodržení termofilního teplotního režimu při kofermentaci kuchyňských odpadů je digestát již hygienizován. Digestát je pravidelně kontrolován na výskyt patogenních mikroorganismů. Jako indikátorové organismy slouží Salmonella,

Enterococaceae a Escherichia coli. Digestát podléhá zákonu č. 156/1998 Sb. o hnojivech a vyhlášce č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva, musí splňovat limity platné pro veškerá hnojiva. Nesplňuje-li digestát limitní hodnoty rizikových látek, stává se odpadem. [51], [52], [53], [54]

Digestát obsahuje sušinu asi do 10 % procent. Běžně se zpracovává odstředěním v dekantéru nebo v pásových lisech. Tekutá frakce, tzv. fugát, má účinky jako minerální hnojivo s rychle uvolnitelným dusíkem – je vhodné aplikovat jej co nejdříve do půdy před jeho vyprcháním. Fugát lze také recyklovat v procesu anaerobní digesce. Pevná frakce, zvaná separát, je použitelná jako hnojivo s pomalu uvolnitelným dusíkem. Do půdy dodává organické látky a podstatně více Mg a P, než fugát. Separát je možné kompostovat. [51], [52], [53], [54]

4.2.6.2. Plynojemy

Plynojemy jsou zásobní nádrže pro vyrobený bioplyn. Jejich hlavní funkcí je akumulace bioplynu pro vyrovnání bilance mezi výrobou a spotřebou. Také udržují stabilní přetlak u výrobního systému. Dělí se na nízkotlaké (<5 kPa), středotlaké (5 – 400 kPa) a vysokotlaké (>400 kPa). [40]

Vysokotlaké a středotlaké plynojemy

Používají se zřídka a pouze v případech, kdy je třeba plyn zkomprimovat pro plnění funkce (pohon vozidel, tlakové nádrže). Je možné je využívat k pneumatickému míchání suspenze v reaktoru. Plynojemy mohou mít válcový nebo kulový tvar a vyrábějí se z oceli, plastu, kompozitních materiálů anebo jejich kombinací. Bývají dimenzovány až na 30 MPa. [40]

Nízkotlaké plynojemy

Nízkotlaké plynojemy jsou v praxi nejpoužívanější. Mohou být samostatnou stavbou nebo mohou být osazeny na střeše reaktoru pro ušetření prostoru. [40]

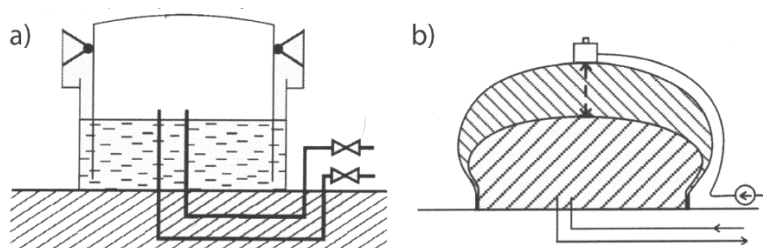
a) Mokrý plynojemy

Princip mokrých plynojemů spočívá ve dvou válcích, které jsou v sobě uloženy s vůlí. Větší válec je naplněn vodou a menší válec je částečně ponořen ve vodě. Bioplyn je veden do menšího válce. Čím více je plynojem naplněn, tím výše je vnitřní válec vysouván směrem vzhůru. K usnadnění tohoto pohybu bývají plynojemy vybaveny vedením. Nevýhodou těchto plynojemů je potřeba zahřívání v zimě, aby voda uvnitř plynojemu nezamrzla, a požadavek na korozní odolnost konstrukčních materiálů. Mokrý plynojem je znázorněn na Obrázku 4.18a. [40]

b) Suché plynojemy

V současné době patří mezi nejrozšířenější typ plynojemů plynojemy dvoumembránové. Jsou tvořeny vnější a vnitřní textilní vrstvou. Zatímco vnitřní vrstva obsahuje uložený bioplyn, vnější vrstva napnutá přetlakem v meziprostoru dává plynojemu tvar. Dmychadlem je neustále vháněn vzduch do meziprostoru pro udržení přetlaku (viz. Obrázek 4.18b)). Přesáhne-li vyrobený bioplyn limitní kapacitu plynojemů nebo dojde-li k havarijní situaci, je plyn bez užitku spálen přes tzv. fléru, což je nouzové spalovací zařízení. [40], [41]

Jiné méně rozšířené varianty suchých plynojemů je možné najít v literatuře, např. od Straky [40] nebo Pastorka [41].



Obrázek 4.18: Mokrý (a) a dvoumembránový plynojem (b)

4.2.7 Základní složky v bioplynu mimo CH_4 a jejich minimalizace

4.2.7.1. CO_2

Oxid uhličitý je druhá majoritní složka bioplynu. Vzhledem k tomu, že tvoří 35 – 45 % bioplynu, jeho přítomnost zvyšuje náklady na transport a snižuje výhřevnost bioplynu. Z bioplynu bývá odstraňován pro zvýšení koncentrace CH_4 , částečnému utlumení emisí skleníkových plynů a pro získání plynu kvality podobné zemnímu plynu. Takový plyn je označován SNG. [40]

Nejčastěji je CO_2 odstraňován z bioplynu vodní vypírkou. Metoda spočívá v prohánění bioplynu kolonou, kde za tlaku 0,6 – 1 MPa skrání voda, ve které se CO_2 rozpouští. CH_4 má menší rozpustnost ve vodě, než CO_2 . Ztráta CH_4 rozpuštěného ve vodě je přímo úměrná požadavkům na vyčištění. [40]

Lepších výsledků lze dosáhnout při vypírání organickými rozpouštědly (např. methanol), která mají větší afinitu k CO_2 než voda, ale bioplyn je třeba nejprve vysušit kvůli hygroskopickým vlastnostem rozpouštědel. Větší výtěžnosti je možné dosáhnout vypíráním chemikáliemi, jako jsou aminoalkoholy nebo alkalické vodné roztoky (KOH, NaOH, atd.). [40], [55]

Nejúčinnější současné metody, s minimální ztrátou CH₄ pracují na molekulárních úrovních. Metoda zvaná PSA (Pressure swing adsorption) spočívá v adsorpci molekul CO₂ na povrch sorbentů jako aktivní uhlí, silikagel, aktivní hliník, aj. za kolísavých tlaků. [40], [55]

4.2.7.2. Voda

Vodou nasycený bioplyn na výstupu z reaktoru má nejen menší výhřevnost, ale také roste riziko koroze trubek a armatur při změně teploty nebo tlaku. Při menších požadavcích na vysušení je plyn nejprve ochlazen ve výměníku tepla, po odvedení kondenzátu je plyn opět ohřán dostatečně nad rosný bod. [40]

Intenzivnějšího sušení je dosaženo sorbenty tuhými (silikagel, molekulová síta) nebo kapalnými (glykoly). Odstraňování vlhkosti většinou probíhá společně s odstraňováním CO₂. [40]

4.2.7.3. H₂S

H₂S je nejen prudce jedovatý plyn, ale také škodí motorům korozními účinky během spalování. Jeho obsah je ovlivněn průběhem acetogeneze nebo složením digestovaného substrátu. Sirné sloučeniny v bioplynu budou obsaženy ve větším množství při digesci prasečí kejdy nebo proteinů. H₂S je nejzásadnější sirná sloučenina v bioplynu. [12], [40], [55]

Jednou z možností odsíření bioplynu je použití tzv. plynárenské čisticí hmoty. [40] Další možnost odsíření je adsorpce na aktivním uhlí. Uhlí je regenerováno extrakčně nebo termicky v inertním prostředí. Výsledkem je čistá elementární síra. [40], [55] Nejrozšířenější metodou odstranění sulfanu v chemickém průmyslu je vypírání katalytickým roztokem Fe³⁺ - EDTA v protiproudové koloně [12], [55]

Odstranění síry in-situ precipitací nevyžaduje téměř žádné přídatné aparáty. Do reaktoru se k digestované organické hmotě přidávají soli železa. Síra je posléze vysrážena ve formě FeS a odvedena v digestátu. Nevýhodou této metody je limitní kapacita odsíření. K odstranění H₂S a CO₂ zároveň je také možné dosáhnout membránovou separací. [12], [40], [55]

4.2.7.4. Vodík

Výskyt vodíku v bioplynu neškodí jeho energetické kvalitě, ale spíše se jedná o indikátor nevyváženého průběhu digesce, a to mezi acidogenní a methanogenní fází. To může nastat buď při přetížení reaktoru dávkováním nadměrného množství substrátu nebo jakoukoliv inhibicí činnosti methanogenních organismů [41]

4.2.7.5. Kyslík

Přítomnost kyslíku mimo hydrolyzní fázi je nežádoucí a svědčí o špatném těsnění reaktoru. [41]

4.2.8 Využití bioplynu

Bioplyn je možné používat jako substituci jiných plynných paliv, předpokladem je však adekvátní úprava bioplynu pro jednotlivá užití.

4.2.8.1. Přímé spalování

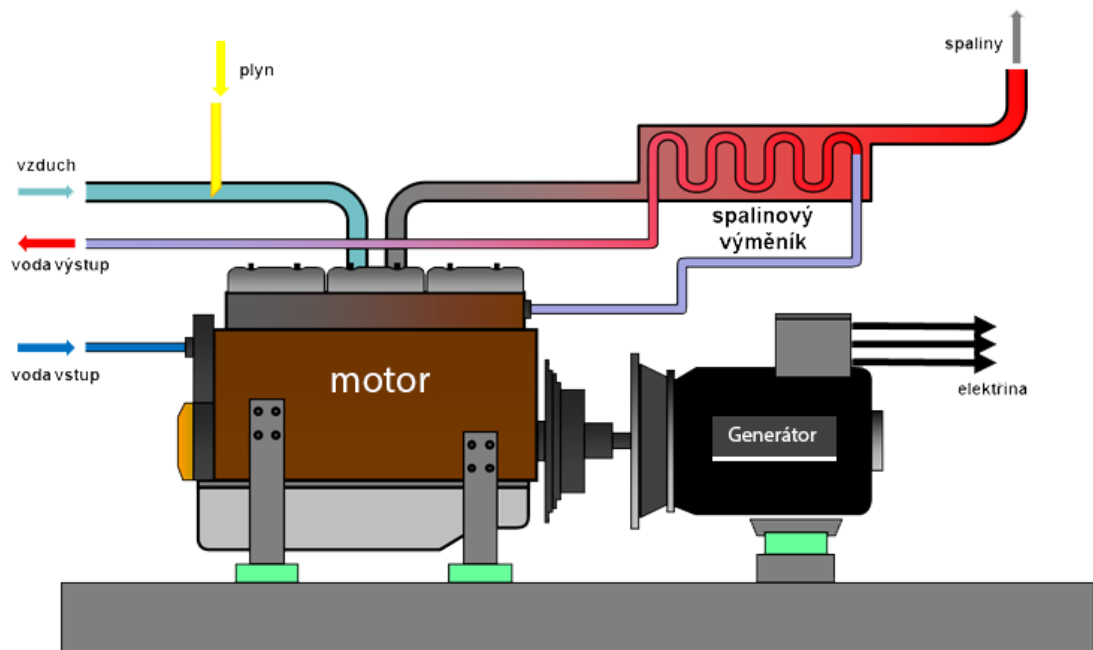
Hoření CH_4 se dá vyjádřit rovnicí (4.5) [41]:



Spalováním bioplynu vzniká množství dalších plynů, protože se nejedná o čistý CH_4 . Problémem při spalování bioplynu je jeho kvalita a stálost energetických parametrů. Surový bioplyn se v kotlích projevil jako nevhodné palivo, kvůli probíhajícím vedlejším reakcím mezi složkami bioplynu a komponenty kotle. Tato skutečnost poukazuje na důležitost úprav a čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu. Upravený bioplyn je možné vhnět do sítě zemního plynu, nicméně vzhledem k nákladům na úpravu bioplynu se jeho prosté spalování tímto způsobem nejeví ekonomické. V literatuře je uvedeno, že z 1 kg kuchyňského odpadu vznikne asi 0,1 m³ vyčištěného bioplynu. [41], [46]

4.2.8.2. Kogenerace

Raději než prostého spalování, je dnes převážně bioplyn využíván ke kogeneraci (viz. Obrázek 4.19). Bioplyn je spalován v pístovém motoru (nebo v plynové turbíně) pohánějící generátor elektrického proudu. Energie ve spalinách je využita k ohřevu vody a vytápění (paroplynový cyklus). Účinnost takového procesu je 80 – 90 %. Zhruba 30 % energie bioplynu je přeměněno na elektrickou energii, 60 % na energii tepelnou a zbytek tvoří tepelné ztráty. [41]



Obrázek 4.19: Schéma kogenerační jednotky [86]

4.2.8.3. Spalovací motory

Stejně jako zemní plyn se vyčištěný bioplyn hodí pro generování mechanické energie. Lze jej buď komprimovat (CBG) nebo zkapalňovat (LBG nebo LBM). V současné době je tento typ paliva omezen malým počtem čerpacích stanic, snižující akční rádius. Vozidla určená pro tato paliva mají také vyšší výrobní cenu. [41]

4.2.8.4. Palivové články

Díky vysokému obsahu CH_4 je bioplyn vhodný na výrobu vodíku pro použití v palivových článcích. Palivové články mají oproti konvenčním zdrojům energie větší účinnost, větší energetický potenciál a neškodné emise. Dělí se na nízkoteplotní ($60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$), středněteplotní ($180 - 220 \text{ }^\circ\text{C}$) a vysokoteplotní ($800 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$). Z CH_4 je vodík získán tzv. parním reformingem (4.6) a navazující reakcí vodního plynu (4.7). Pochody jsou blíže popsány v literatuře [58]:

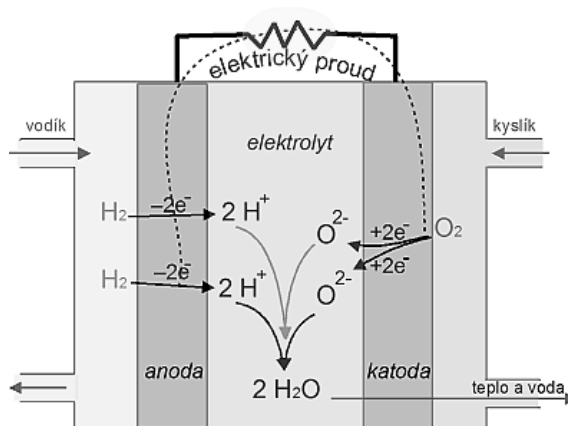


Jak je zřejmé, ačkoliv palivové články negenerují emise skleníkových plynů, při výrobě vodíku z CH_4 se jim nelze vyhnout. [56], [57], [58]

Princip funkce palivových článků spočívá ve zprostředkování exotermické reakce vodíku s kyslíkem na principu elektrolýzy, kde kyslík je vháněn ke katodě a vodík k anodě (viz. Obrázek 4.20). Vzhledem k neutrálnosti elementárního vodíku je potřeba katalyzátoru, který molekule vodíku odebere elektron a vodíkový proton se poté může

doprovazet elektrolytem ke katodě, tedy kyslíku. Volné elektrony odejmuté vodíku jsou vedeny přes elektrický obvod, který je palivovým článkem napájen, směrem ke katodě, kde jsou opět spojeny s vodíkovými protony. Elementární vodík reaguje s kyslíkem v prostředí katody za vzniku tepla a vodní páry. Pro představu, spálením 1 kg benzínu je generováno zhruba 44 MJ, kdežto spálením 1 kg vodíku vznikne teoreticky 121 MJ. [56], [59]

Nevýhodou palivových článků je vysoká cena konstrukce a drahá výroba vodíku. Výhodou je energetický potenciál, včetně zvýšení dojezdu vozidel. Výstup v podobě elektřiny a tepla by mohl být využit ke kogeneraci. [41] [60]



Obrázek 4.20: Schéma palivového článku [87]

4.2.9 Kofermentace kuchyňských odpadů a gastroodpadů

Ačkoliv má kuchyňský odpad dobrý potenciál na výrobu bioplynu, vzniká při fermentaci čistě tohoto odpadu pár problémů: Zaprvé, lagová fáze mikrobiálních společenství trvá příliš dlouho. Tímto je prodloužena doba zdržení v reaktoru a činí digesci neekonomickou. Druhý problém spočívá v nízké produkci CH_4 vlivem nerovnováhy mezi acidogenezí a methanogenezí – bioplyn obsahuje hodně vodíku – a při příliš vysokém dávkování do reaktoru může dojít k inhibici methanogenů, obzvláště v termofilním režimu digesce. Vzniká tedy relativně velké množství bioplynu, ale obsah CH_4 v plynu se pohybuje pouze okolo 50 %. [61], [66]

Obvyklá je tzv. kofermentace, kdy je do procesu digesce vkládán substrát smíchaný z více zdrojů. Tian a kol. [61] dosáhli dobrých výsledků při míchání kuchyňského odpadu s prasečí kejdou. Kejda prasat má vyšší obsah dusíku, ale málo uhlíkatých látek, což se nehodí pro optimální produkci bioplynu. Při kofermentaci kejdy prasat a kuchyňského odpadu v poměru bylo dosaženo vyšší produkce bioplynu s vyšším obsahem CH_4 . [61]

Pozitivní výsledky také přinesla kofermentace kuchyňského odpadu a odpadní vody pocházející z toalet. [62] Kal z čistíren odpadních vod je také vhodným kosubstrátem, ale záleží na konkrétním složení gastroodpadu. [63], [64]

Další možnost kofermentace spočívá ve využívání invazivních plevelů. Výzkum Aumbreena a kol. [65] byl zaměřen na druh *Parthenium hysterophorus*. Jedná se o jednoletou rostlinu, která má alelopatické vlastnosti a může způsobovat alergie u člověka nebo hospodářských zvířat. Likvidací tohoto plevele vzniká velké množství odpadní biomasy. Zatímco při digesci samotného plevele dochází k nerovnoměrné produkci bioplynu, v kombinaci s kuchyňským odpadem bylo docíleno rovnoměrnější a vyšší produkce bioplynu s vyšší mírou biodegradace. [65]

V našich končinách zatím není vhodné zázemí pro širokou anaerobní digesci gastroodpadů. Stav hospodářských zvířat dlouhodobě klesají a s nimi produkované exkrementy vhodné pro tento proces. [67] Vzhledem k tomu, že bioplynové stanice se musí držet složení vsázeného materiálu, nepřipadá v úvahu přidávat gastroodpad nárazově do reaktorů, které zpracovávají jiné substráty.

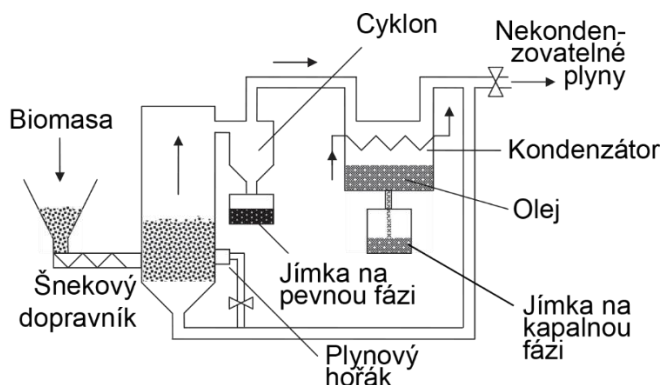
4.3. Pyrolýza

Pyrolýza je endotermický fyzikálně-chemický děj, při kterém dochází k rozkladu organických látek za nepřístupu kyslíku a působení teploty, při které organická hmota ztrácí chemickou stabilitu. Výsledkem je štěpení organické hmoty na nízkomolekulární sloučeniny. Pyrolýza může fungovat jako samostatný proces nebo může být součástí procesu zplyňování, kde produkty pyrolýzy jsou oxidovány za vzniku syntézního plynu. [46], [71], [72]

Produkty procesu pyrolýzy jsou následující:

- Pevná frakce (biouhlí) je tvořena koksovitým materiálem, tedy hlavní složku tvoří uhlík. Může se zde vyskytovat i vodík a kyslík, dále jiné zbytkové složky jako kovy, sklo, písek atd. Výhřevnost udávána 10 – 35 MJ.kg⁻¹. [46], [69]
- Plynná frakce (pyrolýzní plyn), hlavně CO, CO₂, CH₄, H₂ aj. Jedná se o nezkondenzovanou část plynu vzniklého při pyrolýze, jelikož lehce kondenzovatelné složky se při ochlazení odloučí do tekuté frakce. Výhřevnost spočívá v rozmezí 11 – 20 MJ.kg⁻¹. [46], [69], [72]
- Kapalná frakce (bioolej nebo pyrolýzní olej) je tvořena vodou, dehty a oleji. Jedná se o složitou směs uhlovodíků aj. organických látek, výhřevnost 13 – 18 MJ.kg⁻¹. [46], [69], [72]

Proces pyrolýzy většinou začíná při teplotách okolo 300 °C do teplot okolo 600 – 700 °C. [69] Zjednodušené schéma pyrolýzního procesu je na Obrázku 4.21.

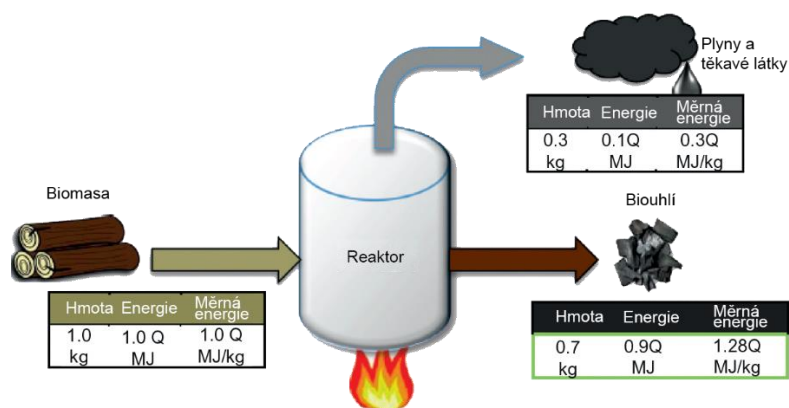


Obrázek 4.21: Schéma pyrolýzního procesu [69]

4.3.1 Druhy pyrolýz

4.3.1.1. Torrefakce

Torrefakce je druh pyrolýzy charakteristický teplotním pásmem 200 – 300 °C. Torrefakce spadá do nejnižšího teplotního pásma pyrolýzních procesů, nicméně může být užita jako plnohodnotný způsob úpravy biomasy k energetickým účelům snížením poměrů O:C a H:C. Optimální rychlost ohřevu je obvykle méně než 50 °C.min⁻¹. Proces trvá desítky minut. Dominantním produktem torrefakce je pevná frakce. V porovnání s karbonizací si materiál zpracovaný torrefakcí zachová většinu prchavých látek. Teoretická hmotnostní a energetická bilance je při torrefakci je vyobrazena na Obrázku 4.22. Plyny unikající z biomasy mají rozmanité složení (H₂, CO₂, CO, CH₄ atd.) a mohou být přímo spalovány pro ohřev torrefikované biomasy. V menší míře vznikají i kapalné složky tvořené vodou, lipidy a uhlovodíky. [68], [69]



Obrázek 4.22: Schéma hmotnostní a energetické bilance při torrefakci [69]

4.3.1.2. Pomalá pyrolýza (karbonizace)

Probíhá za pomalého ohřevu (hodnota $0,1 - 1 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) na teploty okolo $400 - 600 \text{ } ^\circ\text{C}$ a dlouhého času zdržení. Účelem procesu je produkt s vysokým obsahem fixního uhlíku. Používá se primárně k výrobě uhlí ze dřeva již několik tisíc let. Zatímco tehdy proces trval několik dní, dnešní technologie dovedou vyrobit dřevěné uhlí během $1 - 2$ dnů. [41], [69], [72]

4.3.1.3. Pokročilá pyrolýza

Pokročilá pyrolýza je prováděna v rozmezí teplot $300 - 700 \text{ } ^\circ\text{C}$ a s dobou zdržení $10 - 30$ s. [72]

4.3.1.4. Rychlá pyrolýza

Teplota narůstá měrou $1000 - 10\,000 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ a její konečná hodnota závisí na cíleném produktu pyrolýzy. Pro bioolej by teplota neměla přesáhnout $650 \text{ } ^\circ\text{C}$, pro pyrolýzní plyn může teplota dosáhnout až $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$. Doba zdržení je tedy pod $2 - 3$ s. [69], [72]

4.3.1.5. Blesková pyrolýza

Zaměřena hlavně na výrobu biooleje. Doba zdržení trvá z rozmezí $30 - 1500$ ms, teplota se pohybuje okolo $450 - 600 \text{ } ^\circ\text{C}$. Při rozpadu biomasy nejprve vznikne plyn obsahující kondenzující i nekondenzující složky. Plyn je poté ochlazen a kondenzát jímán. Výtěžnost biooleje činí asi $70 - 75 \%$ produktů pyrolýzy. V literatuře jsou udávány i další pyrolýzní procesy jako např. ultra-rapidní pyrolýza nebo pyrolýza s médiem. [69]

4.3.2 *Fáze pyrolýzního procesu*

4.3.2.1. Sušení

V první fázi dochází k vypařování vlhkosti z biomasy. Teplota narůstá z pokojové teploty na zhruba $100 \text{ } ^\circ\text{C}$. Tato teplota zůstává neměnná do vypaření většiny nevázané vlhkosti. Během setrvání na této teplotě a vypařování vody je spotřebováno největší množství energie. Po vypaření nevázané vlhkosti teplota narůstá výše k žádané procesní teplotě, a zároveň se vypařuje zbytková vázaná vlhkost uvnitř buněk biomasy společně s některými organickými látkami. [68], [69]

4.3.2.2. Primární pyrolýza

V teplotním rozmezí asi $200 - 600 \text{ } ^\circ\text{C}$ jsou z biomasy uvolňovány prchavé kondenzovatelné a nekondenzovatelné složky, z velkých částic vzniká primární uhlí. [69]

4.3.2.3. Sekundární pyrolýza

Poslední fáze nastává při teplotách 300 – 900 °C, souběžně s primární pyrolýzou probíhají autokatalytické sekundární reakce produkující sekundární uhlí a nekondenzovatelné plyny z přítomných prchavých látek. Kondenzující složky je možné odejmout a nechat zkondenzovat do jímky při jejich ochlazení. Při teplotě nad 600 °C je hojněji produkován vodík. [69]

4.3.3 *Faktory ovlivňující pyrolýzní proces*

4.3.3.1. Složení biomasy

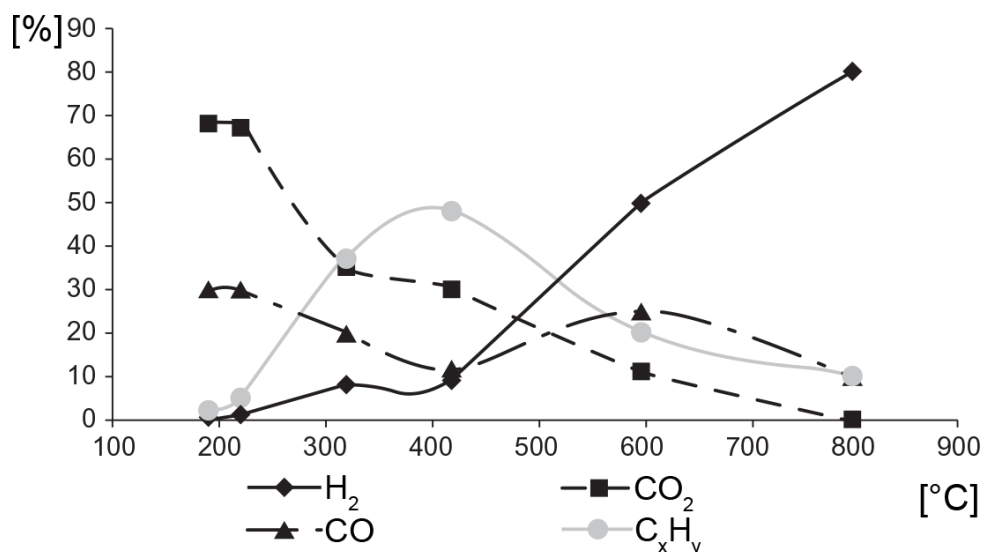
Důležitý vliv na produkty pyrolýzy má hodnota poměru C:H. Jednotlivé stavební látky biomasy mají různé teploty rozkladu (hemicelulóza 150 – 350 °C, celulóza 275 – 350 °C a lignin 250 – 500 °C) a každá z nich se při pyrolýze chová jinak. Celulóza je jedním z hlavních zdrojů kondenzovatelných plynů vzniklých při pyrolýze, zatímco hemicelulóza je zdrojem nekondenzovatelných plynů a produkuje méně dehtů. Lignin se rozpadá velmi pomalu a je hlavním zdrojem pro uhlí, v menší míře z něj vzniká tekutá frakce. [69]

Limitujícím faktorem pro zpracování gastroodpadu torrefakcí nebo pyrolýzou je vlhkost. Při obsahu vlhkosti vyšším než 30 % již znatelně roste potřebná dodaná energie ve fázi sušení. Je možné pyrolýze podrobit materiál do 70% vlhkosti, nicméně se nejedná o ekonomické řešení. Pro přídatný zdroj energie lze spalovat část produktů nebo použít odpadní teplo při předsušení. [76]

4.3.3.2. Teplota

Teplota má vliv na plyny unikající z materiálu. V oblasti okolo 200 – 250 °C, nejvíce vyprchávají CO a CO₂, ale zároveň narůstá podíl uhlovodíků. Uhlovodíky od 300 °C tvoří většinu, zatímco podíl CO_x klesá. Okolo 400 °C nabývá podíl uhlovodíků maxima

a zhruba v 500 °C je nahrazen H₂ jako majoritní složka. H₂ zůstává majoritní složkou plynu a s dále narůstající teplotou jeho podíl roste (viz. Obrázek 4.23) [69]



Obrázek 4.23: Vývoj chemického složení pyrolýzního plynu v závislosti na teplotě [69]

Pro vyšší výtěžnost pevné frakce je vhodnější nižší teplota. Při navyšování teplot dojde k navýšení energetického obsahu pevné frakce, ale také většího rozkladu struktury. S rostoucím rozsahem rozkladu je problematictější dále manipulovat s materiálem, např. při peletování. Ačkoliv při vysokých teplotách nevzniká velké množství pevné frakce, s rostoucí teplotou roste její výsledná výhřevnost (vlivem zvýšení obsahu uhlíku a vyprchání plynů uvnitř uhlí). [68], [69]

Pro vyšší podíly plynné nebo kapalné frakce jsou používány vyšší teploty. [69]

4.3.3.3. Rychlost ohřevu

Rychlost ohřevu má zásadní vliv na produkty pyrolýzních reakcí. Rychlý ohřev na teploty 400 – 600 °C znamená více kondenzovatelných plynů a tekuté frakce, kdežto pomalý ohřev produkuje více pevné složky. [69]

4.3.3.4. Doba zdržení

Při pomalejším ohřevu, mají-li těkavé látky dost času na vyprchání z materiálu, nastanou vhodné podmínky pro sekundární pyrolýzu, kde reagují částice pevné složky s vyprchanými plyny za tvorby sekundárního uhlí. Průběh pyrolýzy bývá optimalizován vzhledem k žadaným produktům [69]:

- Pro dominantní podíl pevné frakce je užíván pomalý nárůst teplot. [69]
- Pro maximální výtěžek tekuté frakce z biomasy je používán rychlý ohřev, teplota procesu v rozsahu 450 – 600 °C a krátká doba zdržení prchavých látek v reaktoru (rychlá pyrolýza). [69]

- Pro získání co největšího množství pyrolýzního plynu je užíváno středně rychlého až pomalého ohřevu, provozní teplota v intervalu 700 – 900 °C a dlouhá doba zdržení plynů v reaktoru. [69]

4.3.3.5. Velikost částic

Menší a jemnější částice biomasy kladou menší odpor prchavým plynům unikajících zevnitř a nedojde k sekundárním pyrolytickým reakcím. Menší částice jsou tedy vhodné pro výrobu tekutých frakcí. Větší částice kladou větší odpor unikajícím plynům, čímž zprostředkují sekundární pyrolýzu a jsou vhodné pro výrobu uhlí. [69]

4.3.4 Základní typy pyrolýzních reaktorů

Reaktory je možné dělit podle přímého a nepřímého ohřevu, podle média se dají dělit na konvektivní, konduktivní, elektromagnetické a částicové.

4.3.4.1. Přímo zahříváné reaktory

Zpracovávaný materiál se dostává do bezprostředního kontaktu s ohřevným médiem. [69]

Konvektivní reaktory

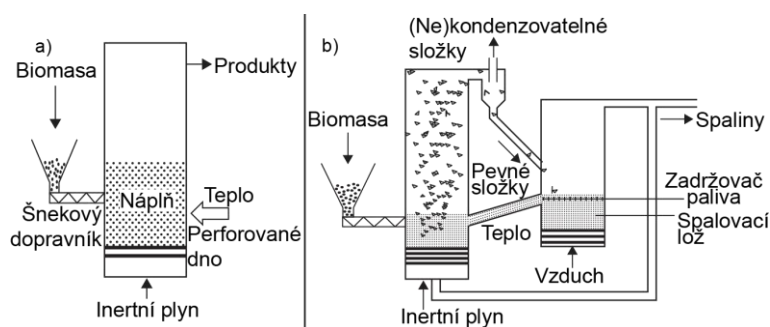
K ohřevu materiálu dochází vedením tepla v inertní atmosféře, maximální dovolené množství kyslíku je menší než 3 % (při vyšším obsahu kyslíku by mohlo dojít ke vznícení). Reaktory mohou mít konstrukci horizontální, vertikální nebo nakloněnou. V závislosti relativního pohybu mezi torrefikovaným materiálem a stěnou reaktoru lze dělit lože fixní a pohyblivé. Ve fixních procesech je biomasa vložena do kontejnerů, které jsou posléze pomalu vedeny dlouhou tunelovou pecí s inertní atmosférou. U pohyblivých loží se může torrefikovaný materiál pohybovat pomocí gravitace, vibrace nebo mechanizace. Hlavním produktem vznikajícím v těchto reaktorech je uhlí, vzhledem k pomalému ohřevu a dlouhé době zdržení. [69], [72]

Reaktory s fluidní loží (BFB)

Lože je vyplněna granulovým materiálem, většinou z křemičitého písku, zatímco ze dna lože proudí horký inertní plyn (viz. Obrázek 4.27a). Plyn tvoří bubliny a promíchává náplň lože, která se v tomto stavu chová jako kapalina. Horké částice granulátu předají teplo čemukoliv, co je do lože umístěno. Výhodou tohoto systému je rovnoměrnost zahřívání, jednoduchost a možnost mobilního provedení. Problémem je separace zpracovaného materiálu, který nesmí být tvořen příliš drobnými částicemi. Schéma BFB reaktoru je znázorněno na Obrázku 4.24a. [69], [72]

Cirkulační reaktory s fluidní loží (CFB)

Reaktor funguje na stejném principu, jako fluidní lože, ale materiál je recyklován na vnějším okruhu s cyklonovým odlučovačem a obyčejnou fluidní loží (viz. Obrázek 4.24b). Biomasa je přivedena do vertikálního reaktoru, ve kterém jsou částice při procesu pyrolýzy hnány plynem velkou rychlostí vzhůru. V cyklonu jsou odděleny pevné složky od plynů a kondenzovatelných složek. Plyny jsou odvedeny k dalšímu zpracování, pevná frakce je vedena do obyčejné fluidní lože, kde je většina bez zbytku spálena. Teplo vzniklé spalováním je vedeno zpět do reaktoru. [69], [72]



Obrázek 4.24: Schéma BFB (a) a CFB (b) reaktorů [69]

Hydrotermální reaktory

Pyrolýza v hydrotermálních reaktorech, tzv. mokrá pyrolýza, spočívá ve zpracování materiálu v prostředí zvýšeného tlaku a horké vody, čímž odpadá potřeba sušení biomasy. Proces je tedy vhodný pro biomasu s vysokým obsahem vlhkosti. Tato metoda nabízí dobrý přenos tepla. Problémem je nákladná konstrukce reaktoru, kde je potřeba zohlednit výběr vhodného materiálu odolného korozi, solné depozici a využití reziduální tekuté fáze. [69], [100]

V literatuře panuje rozkol ohledně terminologie a zařazení této hydrotermální úpravy biomasy. Řada zdrojů nazývá mokrou pyrolýzu a hydrotermální karbonizaci synonymem, vzhledem k podobnosti produktů. Nicméně vzhledem k rozdílným kinetikám fyzikálně-chemických reakcí je pravděpodobně vhodnější pyrolýzou nazývat procesy, kde dochází k tepelnému rozkladu v inertním prostředí, zatímco hydrotermální procesy probíhají ve vodním prostředí, které se přímo podílí na rozkladu. [76], [98], [100]

Jiné zdroje vykreslují rozdíl mezi mokrou pyrolýzou a hydrotermální karbonizací ve využití výstupního produktu. Definují mokrou pyrolýzu jako proces pro vylepšení energetických vlastností biomasy pro využití jako palivo, zatímco hydrotermální karbonizace je určena pro získání produktu užitečného nejen jako palivo, ale také produkt

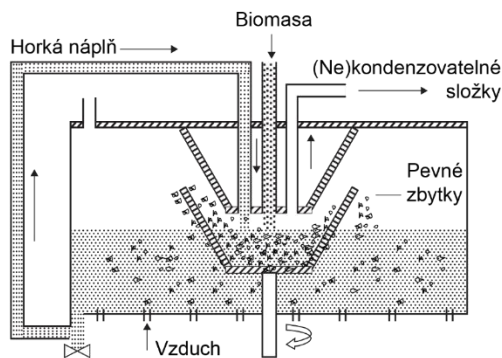
užitečný pro půdní aplikaci, adsorbci atd. Pro účely této práce jsou hydrotermální procesy pro oddělení od pyrolyzních procesů v samostatné podkapitole 4.5. [98], [100]

4.3.4.2. Nepřímo zahřívání reaktory

U reaktorů zahřívání nepřímo se materiál nedostává do kontaktu s ohřívacím médiem; teplo je přenášeno kondukcí nebo elektromagnetickými vlnami. Mezi výhody tohoto typu reaktoru patří jednoduché zamezení přístupu vzduchu, prchavé látky unikající z biomasy nejsou ředěny ohřevným médiem. Plyn unikající z materiálu lze také odvádět a případně spalovat pro další zdroj tepla. Nevýhodou je nerovnoměrné zahřívání povrchu a vnitřku částic biomasy. [69]

Rotační kuželový reaktor

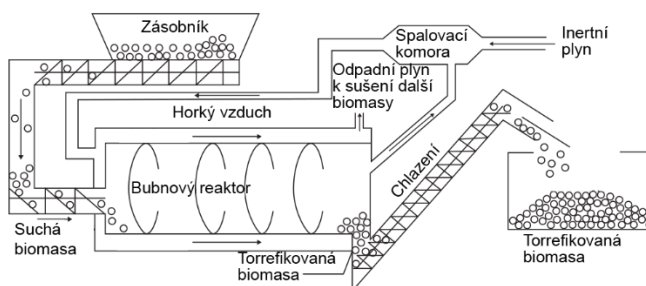
Materiál je vháněn do prostoru dna rotujícího komolého kužele, který je ohřán na pyrolyzní teplotu. Společně s biomasou je do kužele recyklováno horké fluidní médium. Vzniklá plynná frakce je odvedena a pevná frakce s fluidním médiem je odstředivou silou vymrštěna ven z trychtýře do přítomné fluidní lože, kde je spalována. Teplo vygenerované spalováním je použito pro ohřev kužele a recirkulované pevné frakce. Výhodou těchto reaktorů je krátká doba zdržení a absence potřeby unášejícího plynu, na rozdíl od cirkulačních reaktorů. Schéma reaktoru je ilustrováno na Obrázku 4.25. [69], [72]



Obrázek 4.25: Schéma rotačního kuželového reaktoru [69]

Rotační bubnový reaktor

V tomto reaktoru je hlavním médiem stěna bubnu, plyn v dutině bubnu může plnit funkci sekundárního média. Schéma reaktoru je patrné z Obrázku 4.26.[69]



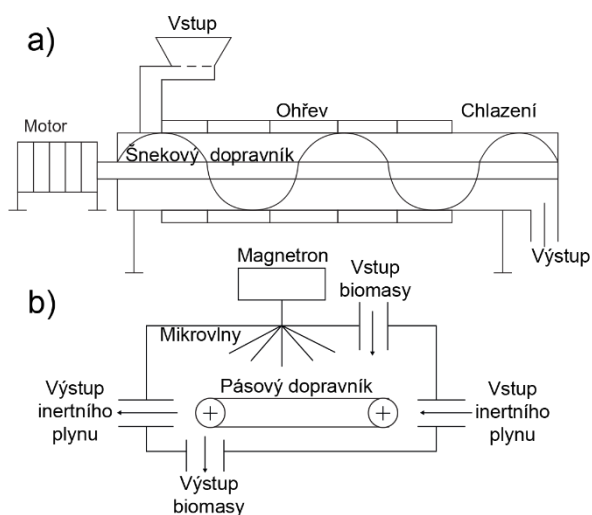
Obrázek 4.26: Schéma rotačního bubnového reaktoru s nepřímým ohřevem [69]

Šachtový reaktor

Reaktor má obvykle kruhový průřez. Pohyb zpracovávaného materiálu uvnitř reaktoru zprostředkovává šnekový dopravník, který směs do jisté míry promíchává. Schéma šachtového reaktoru je na Obrázku 4.27a. [69]

Mikrovlnný reaktor

U mikrovlnného reaktoru je biomasa zahřívána zevnitř, vlivem absorpce elektromagnetického záření molekulami materiálu, hlavně vnitřní vody. Je-li větší obsah vlhkosti v jádru částic, než na povrchu, jádro se intenzivně a rychle zahřeje, ale povrch nikoliv, protože biomasa je špatným vodičem tepla. Nerovnoměrný ohřev lze minimalizovat kontinuálním mícháním. Zatímco mikrovlnný ohřev může ušetřit energii při výrobě uhlí, energetická kvalita uhlí nemusí být nutně lepší, než u konvenčních metod. Schéma mikrovlnného reaktoru je uvedeno na Obrázku 4.27b. [69]



Obrázek 4.27: Schémata šachtového (a) a mikrovlnného reaktoru (b) [69]

4.3.5 Pyrolýza a gastroodpad

Surový kuchyňský odpad není vhodný materiál pro pyrolýzní procesy, vzhledem k vysokému obsahu vlhkosti. S vysokým obsahem vlhkosti narůstá hmotnost odpadu,

znesnadňující logistiku, včetně náchylnosti k tvorbě plísní. Po běžném vysušení je materiál stále hygroskopický, pouze po přeměně struktury procesem torrefakce nebo pyrolýzy nabývá hydrofobie. Předúprava v podobě sušení snižuje efektivitu procesu a snižuje výsledný energetický zisk. Heterogenní složení je další negativní vlastnost, kterou je potřeba řešit během předúprav. Nicméně při překročení těchto překážek může gastroodpad představovat perspektivní zdroj energie a surovin pro další zpracování. [95]

Studie vypracovaná Poudelem a kol. [70] se zabývá zjištěním vhodné teploty pro torrefakci gastroodpadu, aby co nejvíce energie zůstalo obsaženo v pevné fázi, před iniciací primární pyrolýzy. Jako optimální teplota pro torrefakci gastroodpadu bylo stanoveno rozmezí 290 – 330 °C s dobou zdržení 30 minut. [70]

Kadlimati a kol. [101] využili mikrovlnného reaktoru pro získání biooleje ze smíšeného gastroodpadu. Bioolej obsahoval velké množství vody a dusíkatých látek, znemožňující palivové využití, nicméně autor navrhuje další úpravy biooleje pro zlepšení palivových vlastností. [101]

Současně se jeví praktičtější zabývat pyrolýzou odpadů z potravinářského nebo krmivového průmyslu, jejichž složení není tak variabilní jako odpadů vznikajících v kuchyni. Např. pyrolýzou odpadu z obilnin nebo arašídů vzniklých při výrobě krmiv je možné získat pevné a kapalné produkty s vysokou výhřevností. Biouhlí vzniklé pyrolýzou kravích nebo rybích kostí má prokázanou schopnost odstraňovat z pitné vody arsen a fluoridy na hodnoty splňující standardy WHO. Z živočišných tuků je možné získat bioolej s dobrými palivovými vlastnostmi, který by po úpravě mohl sloužit jako palivo nebo zdroj chemických surovin. [95]

Na možnost využití pyrolytických procesů pro zpracování separátu z anaerobní digesce poukazuje stude Lia a kol. [102]

4.3.6 Využití produktů pyrolýzních procesů

4.3.6.1. Biouhlí

Vlastnosti biouhlí

Dezintegrační vlastnosti

Surová biomasa má propletenou vláknitou strukturu tvořenou celulózu, hemicelulózu a ligninem u dřevin, které mohou znesnadňovat manipulaci s ní, např. při zhutňování. Při pyrolýze dochází k rozkladu těchto stavebních látek (nejvíce hemicelulóza, lignin a glukóza pouze omezeně) a transformaci struktury částic biomasy.

Ta ztrácí vláknitost, částice se zjemní a nabydou křehkosti. Materiál se potom snadněji rozmělnuje nebo zhutňuje. [68], [69]

Hydrofobie

Biomasa je hygroskopický materiál, což může přinášet problémy při skladování. Pyrolyzovaná biomasa je naopak hydrofobní, důsledkem rozkladu stavebních látek, které pohlcují vodu. Největší absorbenci vody má hemicelulóza, která je už při torrefakci téměř celá rozložena. Také vzhledem k chemickým změnám vznikají při pyrolyze v materiálu nepolární nenasycené látky. [68], [69]

Vznětlivost

Biouhlí může za vyšších teplot reagovat se vzdušným kyslíkem vznětlivě. Vzhledem ke křehkosti a drobivosti materiálu může při jeho zpracování (drcení, mletí, zhutňování, atd.) vznikat riziko samovznícení. [69]

Použití

Biouhlí používané pro spalování je nejčastěji zhutňováno do pelet nebo briket. Materiál s vysokým stupněm transformace struktury je křehký a drobivý. Pro zhutnění je výhodnější, aby se alespoň částečně zachovaly původní stavební složky, zejm. lignin, který může fungovat jako pojivo. Po vychladnutí je materiál nadrcen nebo namlet na požadovanou velikost částic a poté zhutněn působením tlaku a mírně zvýšené teploty. [68], [69]

Po zhutnění je možné biouhlí spalovat společně s fosilním uhlím. V současné době existují desítky energetických zařízení, která se zabývají torrefakcí a spalováním biouhlí takto vyrobeného, ale ještě žádné nefunguje jako plnohodnotná stabilní energetická nebo komerční produkce. Je třeba hledět na vhodný poměr paliv, aby nedošlo k segregaci, což může vést k vyhoření za nižších teplot a snížené tvorbě páry. [69], [72], [76], [99]

Biouhlí je možné kompostovat nebo rovnou aplikovat do půdy, kde funguje jako hnojivo. Biouhlí má schopnost navracet živiny do půdy nebo vyrovnávat půdní pH. Odhaduje se, že domorodé kmeny v jižní Americe cíleně obohacovaly neúrodné půdy organickými zbytky a dřevěným uhlím (tzv. *Terra preta* – portugalsky „hnědá země“). Tyto půdy jsou velmi bohaté na uhlík až do hloubky 1 m. Narozdíl od hnědého nebo černého uhlí, biouhlí není permanentní. V půdě se rozkládá o něco pomaleji, než organické látky. Uhlí v půdě zlepšuje podmínky pro půdní mikrobiotu a zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu. Depozice uhlíku zpět do půdy je důležitý aspekt snižování obsahu emisí CO₂.

V budoucnosti může biouhlí hrát velkou roli při odvracení desertifikačního procesu nebo reforestace. [69], [72], [73], [74], [76]

Biouhlí má vhodnou strukturu pro adsorpční aplikace např. v čistění odpadních vod, úpravy vody na kvalitu pitné vody a adsorpce CO₂. Další potenciální aplikace biouhlí jsou v energetice, např. pro použití v elektrochemických superkondenzátorech nebo palivových článcích. [76], [99]

Za předpokladu, že je pyrolýza cílena na produkci tekuté nebo plynné frakce, biouhlí může být spalováno v rámci reaktoru. [69]

4.3.6.2. Bioolej

Bioolej je palivo, které je současně stále zkoumáno nejen v petrochemickém průmyslu. Je možné jej spalovat současně s uhlím nebo se zemním plynem. Je použitelný ve vznětových motorech, ale pro bezproblémový chod jsou třeba úpravy motoru i samotného biooleje. Jelikož pyrolýza probíhá v redukčním prostředí, bioolej má korozivní účinky – pro strojní aplikace je nutné použít drahých konstrukčních materiálů. Ve vznětových motorech bývá také problém s nekonzistentním vznícením paliva ve spalovacích komorách. [72]

V plynových turbínách je bioolej také použitelný, ale má tendenci korodovat lopatky turbín. I za předpokladu, že lopatky jsou potaženy ochrannou vrstvou, bioolej bez úpravy neposkytuje efektivní spalování. [72]

Další možnost využití produktů pyrolýzy je zplyňování.

4.4. Zplyňování

Zplyňování je termochemický proces výroby syntézního plynu z organických materiálů. Zplyňování v podstatě navazuje na pyrolýzu, nicméně není prováděno v inertní atmosféře, ale v prostředí zplyňovacího média. Jako médium je používán vzduch, O₂, CO₂, vodní pára, nebo jejich kombinace. [75]

Druh použitého média má vliv na energetický obsah produkovaného plynu. Médium reaguje s volným uhlíkem i uhlovodíky, které jsou zredukovány na plyny jednoduchého složení, jako CO nebo H₂. [75]

Kyslík jako zplyňovací médium produkuje plyn s obsahem CO. Je-li kyslík přítomen ve větším, než stechiometrickém množství, je produkován CO₂; obsah vodíku je minimální. Je-li jako médium použita vodní pára, v produkovaném plynu narůstá podíl H₂. Zplyňování probíhá v rozmezí teplot 600 – 1000 °C. S vyšší teplotou roste účinnost zplyňování, množství vzniklého plynu a klesá podíl kapalné frakce. [75]

Při zplyňování biomasy mají velký podíl tyto reakce [75]:

- Parciální oxidace



- Reverzí Boudouardova reakce

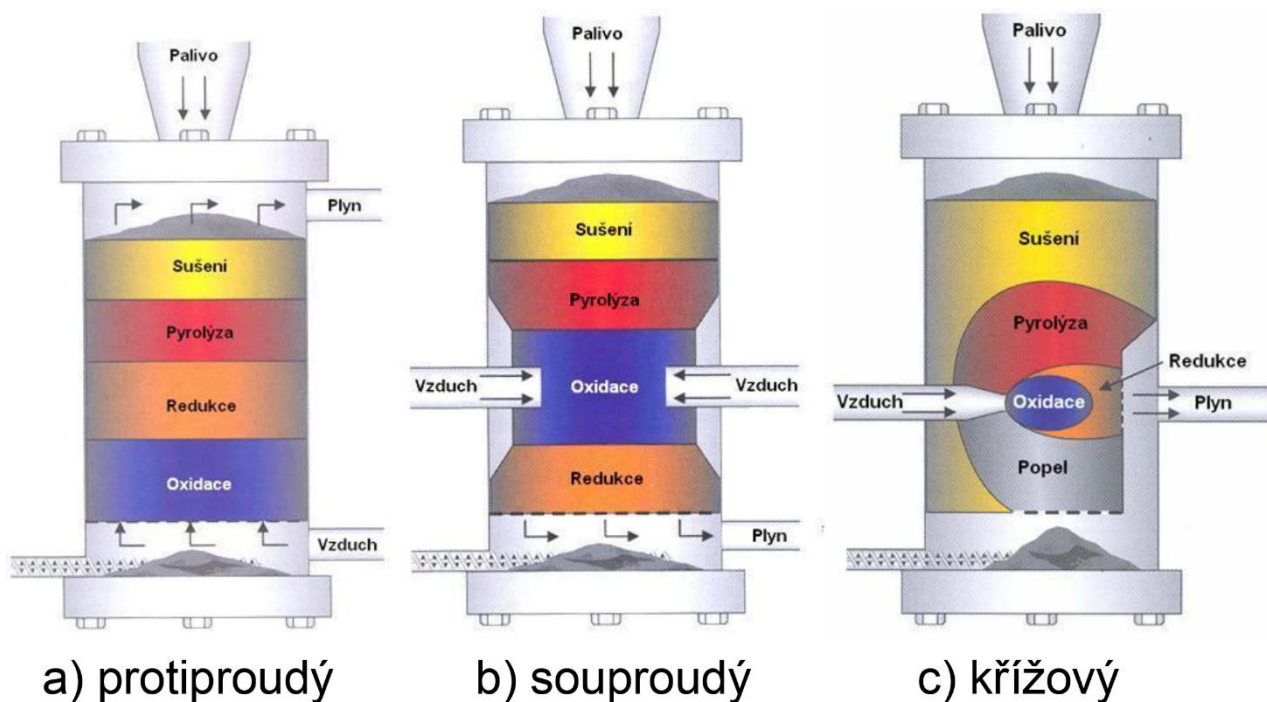


- Parní reforming – viz. (4.6)
- Reakce vodního plynu – viz. (4.7)
- Výměnná reakce vodního plynu (*angl. water-gas shift reaction*)



Rovnice (4.7), (4.8) a (4.9) zjednodušeně vyjadřují reakce uhlí, rovnice (4.6) a (4.10) vyjadřují navazující reakce plyných produktů prvotních reakcí uhlí. Účast těchto reakcí je podmíněna teplotou: reakce (4.6), (4.7) a (4.10) probíhají při 800 °C a výše, reakce (4.9) vyžaduje teplotu nad 900 °C. Na tvorbě plynu se podílí i krakovací reakce kapalné fáze, hlavně komplexní termální konverze nebo katalytické štěpení vodní parou. [75]

Zplyňovací reaktory jsou v mnohém stejné jako reaktory používané pro pyrolýzu. U reaktorů s pevnou loží má reaktor vertikální konstrukci, kde je biomasa dávkována ze shora, zatímco vespod je odváděn popílek. Principiálně biomasa v reaktoru vytvoří „zátku“, kde mohou ve vrstvách probíhat všechny procesy: sušení, pyrolýza, částečná oxidace a redukce uhlíku zplyňovacím médiem. Na dně reaktoru je rošt, kterým propadnou nespalitelné zbytky. Podle směru proudění paliva a produkovaného plynu se reaktory s pevnou loží dělí na protiproudé, souproudé a křížové (viz. Obrázek 4.28). U zplyňování jsou využívány i BFB a CFB reaktory, kde jsou navíc přidávána aditiva proti polutantům (např. vápno proti sirným sloučeninám). Ve snaze o získání co nejčistějšího syntézního plynu a co nejmenšího množství vedlejších produktů zplyňování, je už řadu let vyvíjena plasmová zplyňovací technologie, která je zatím příliš drahá a neekonomická pro široké využití. [41], [69], [75]



Obrázek 4.28: Schéma různých typů zplyňovacích reaktorů s pevným ložem [88]

Produkovaný plyn je směs plynů jako CO , CO_2 , vodní páry, H_2 , CH_4 , C_xH_y , atd. Obsahuje řadu nečistot, které je třeba odstranit, jako např. H_2S , NH_3 , HCN apod. Největším problémem při zplyňování biomasy jsou kapalná rezidua. Je-li plyn využíván ke přímému spalování, jejich přítomnost lze tolerovat, do jisté míry navyšují výhřevnost. V případě úpravy plynu nebo extrakce jeho složek jsou však nežádoucí. Kondenzující složky mohou zanášet potrubí, filtry nebo katalyzátory používané pro úpravu plynu. Mezi další nečistoty, které je potřeba odstranit před úpravou plynu patří pevné částice, alkalické soli nebo siričné sloučeniny. Pevné částice je z plynu třeba odstranit před ochlazením filtrací. V horkém plynu stále probíhají krakovací reakce, jejichž produkty zanáší filtry. Při udržení teploty plynu pod $500\text{ }^\circ\text{C}$ je možné tento jev omezit, ale pod $400\text{ }^\circ\text{C}$ již narůstá riziko dosažení rosného bodu kondenzovatelných složek. Kapalná rezidua přítomná v plynu se odstraňují metodami fyzikálními, termálními a katalytickými. Bližšího seznámení s úpravami plynu je možné např. v publikaci Engvall a kol. [75]

Navzdory charakteru kapalných reziduí vzniklých zplyňováním kuchyňských odpadů se jedná o potenciální variantu výroby H_2 z obnovitelných zdrojů. [41], [69], [75], [112]

4.4.1 Zplyňování a gastroodpad

Ahmed a kol. [106] zkoumali chování odpadních potravin při zplyňování a charakter syntézního plynu. Studie porovnává produkci plynu během pyrolýzy

a zplyňování s vodní parou jako médiem. Produkce plynu a H_2 byla při zplyňování podstatně vyšší než při pyrolýze, vzhledem k reakcím vodní páry s ostatními prvky plynu. Autoři také poukazují na katalytické účinky anorganických látek obsažených v jídle, zejména soli. [106]

Podobnou studii vypracovali Lin a kol. [108], kteří porovnávali tvorbu plynu z kuchyňského odpadu v prostředí N_2 a CO_2 atmosfér v mikrovlnném reaktoru. Zplyňování v CO_2 atmosféře vyžadovalo více energie, ale také vyneslo více plynu, než N_2 atmosféra. [108]

Možnost spoluzplyňování kuchyňského odpadu s odpadními dřevinami zkoumali Yang a kol. [107]. S navyšujícím podílem gastroodpadu rostl obsah H_2 , CH_4 a s nimi výhřevnost plynu. [107]

Detailněji se zplyňování gastroodpadu a dřevěné biomasy věnovali Nagy a Dobó [110], kteří zkoumali vliv teplot a hmotnostního toku vodní páry na vzniklý plyn. Nejvyšší zkoušený tok páry navyšoval produkci plynu a intenzitu konverze zplyňovaných materiálů. V porovnání s ostatními toky obsahoval plyn nejvíce H_2 , ale také CO_2 . Zplyňování s nejmenším tokem páry znamenalo syntézní plyn se stabilní hodnotou výhřevnosti v průběhu zplyňování včetně nízkého obsahu CO_2 , ale zplyňování trvalo podstatně déle, než s rychlejším tokem páry a celkový objem produkce plynu byl menší. [110]

Zplyňováním uhlí zformovaného torrefakcí gastroodpadu se zabývali Singh a kol. [109]. Autoři porovnávali torrefakci a sušení kuchyňského odpadu na Slunci jako předúpravy před zplyňováním. S rostoucím stupněm transformace materiálu torrefakcí rostlo množství vzniklého plynu včetně účinnosti zplyňování, nicméně nebyla započtena energie vydaná na torrefakci materiálu. [109]

4.5. Hydrotermální karbonizace (HTC)

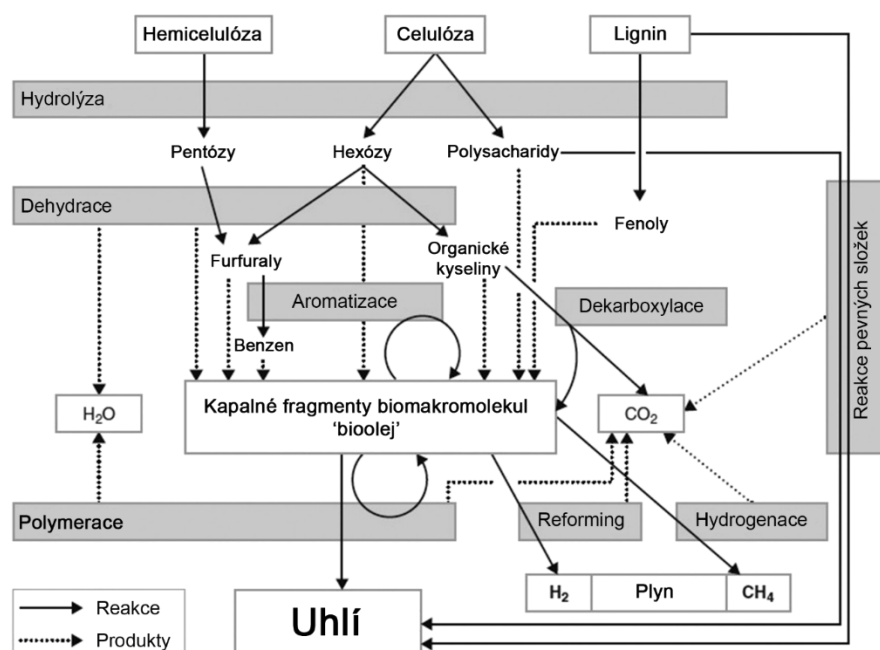
Hydrotermální karbonizace je proces transformace biomasy ve vodním prostředí za vzájemného působení vysokého tlaku a teploty. Voda funguje jako rozpouštědlo, katalyzátor a reakční médium. Ačkoliv je tato metoda známá přes 100 let, v dnešní době se rozšiřuje její výzkum jako atraktivní alternativa nejen úpravy biomasy, ale i zpracování biologicky rozložitelných odpadů. [76], [77], [97], [99]

Výstupem je podobně jako u pyrolytických procesů pevná, kapalná a plynná frakce. Upravením podmínek hydrotermálních procesů je možné navýšit podíl žádané frakce. Pro karbonizaci je užívána voda v podkritickém stavu, v teplotách do $250\text{ }^\circ\text{C}$

a tlacích do 5 MPa. V těchto podmínkách lze maximalizovat podíl pevné frakce na úkor plynných a kapalných vedlejších produktů. Za použití katalyzátorů a organických rozpouštědel místo vody při teplotě do 400 °C lze získat větší podíl plynné a kapalné frakce – jedná se o hydrotermální zkapalnění. Při překročení kritického bodu vody tvoří hlavní podíl plynná frakce a řeč je o hydrotermálním zplyňování. [76]

4.5.1 Fáze HTC

Úplná kinetika chemických procesů ještě není celkově prozkoumána, nicméně pro substráty rostlinné povahy lze proces zjednodušeně popsat následujícími kroky (viz. Obrázek 4.29):



Obrázek 4.29: Schéma reakčních drah při HTC [97]

4.5.1.1. Hydrolyzáza

Fáze štěpení polymerů, která je hlavním rozlišujícím znakem mezi HTC a pyrolýzou, kde dochází k tepelnému rozkladu. Vzhledem k charakteru vodního prostředí je k iniciaci degradace potřeba nižší aktivační energie, než je tomu u pyrolýzy. Rozkladné reakce a celý proces tak vyžadují nižší teplotu. Hemicelulóza se rozkládá v teplotním rozmezí 180 – 200 °C, celulóza se rozkládá při teplotě 220 °C a výše. Lignin jako nejstabilnější rostlinná stavební látka se začíná rozkládat při 260 °C. Částečnou hydrolyzou ligninu vznikají fenoly. [97]

4.5.1.2. Reakce produktů hydrolyzázy

Monosacharidy vzniklé z hemicelulózy a celulózy jsou dehydratovány za vzniku organických kyselin (kys. octová, mravenčí, mléčná, atd.) a furfuralů. Zvláště

hydroxymetylfurfural je považován za důležitý vedlejší produkt, jelikož se může později přímo podílet na formaci uhlí. Organické kyseliny podléhají dekarboxylaci. Dalšími vedlejšími produkty jsou mimo jiné CO₂, CH₄ a H₂. [76], [97]

4.5.1.3. Formace uhlí

Předpokládá se, že tvorba uhlí z produktů předchozích reakcí probíhá prostřednictvím kondenzačních a polymeračních reakcí, které jsou na sobě nezávislé. Vedlejší produkty, které se na těchto reakcích neúčastní, zůstanou rozpuštěny v tekuté nebo plynné fázi. Na tvorbě uhlí se také podílí druhá vedlejší reakční dráha, kde jsou tlakem a teplotou vody restrukturalizovány hydrolyzou nerozložené složky, hlavně lignin a polysacharidy vzniklé při hydrolyze celulózy. Při zachování terminologie z pyrolytických procesů se uhlí vzniklé restrukturací nazývá primární, uhlí vzniklé kondenzací a polymerací sekundární. [76], [97]

4.5.2 Faktory ovlivňující HTC

4.5.2.1. Voda

Ačkoliv je voda polární rozpouštědlo, při vyšších teplotách za zachování tekutého skupenství mění své vlastnosti. S poklesem hustoty vody roste reaktivita vody a schopnost rozpouštět vlivem změny polaritativy i nepolární látky. Při 250 °C je čistá voda 25x reaktivnější, než při pokojové teplotě. Další zajímavou vlastností vody v tomto stavu je, že se může chovat jako kyselina a zásada zároveň. [99]

Proces lze ovlivnit přidáním zásaditých nebo kyselých látek a katalyzátorů do vody použité v HTC. Je také možná recirkulace již použité vody z již dokončeného HTC. Výstupní voda je bohatá na organické látky a vzhledem k obsahu organických kyselin nízké pH. Nižší pH urychluje degradaci celulózy a hemicelulózy. Vyšší pH je vhodné pro zkapalňovací procesy. [76], [97]

4.5.2.2. Teplota a doba setrvání

Teplota má největší vliv na průběh a výsledek procesu. S rostoucí teplotou roste intenzita rozkladu substrátu a podíl tekuté a plynné fáze. Vzhledem k převažující exotermicitě probíhajících reakcí je jednoduché překročit parametry procesu. [98]

Společně s teplotou má podíl na procesu doba zdržení za dané teploty. S rostoucí dobou setrvání v reaktoru roste celkový rozsah reakcí. Poměr H:C a O:C klesá na úroveň hnědého uhlí, nicméně je možné dosáhnout stejného poměru při nižší teplotě s delší

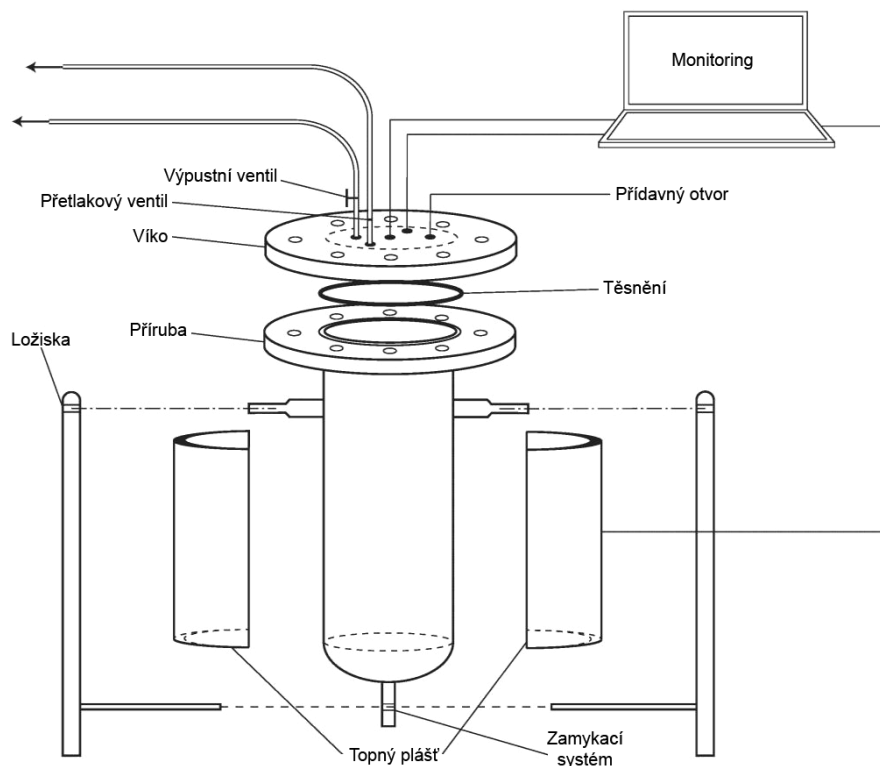
časovou prodlevou. Obecně pro rostoucí teplotu a dobu zdržení platí: Podíl pevné fáze klesá, ale výstup je energeticky hodnotnější. [76], [97] [98], [99]

4.5.3 Technologie HTC

HTC je stále ve fázi výzkumu a komerční aplikace ještě nejsou rozšířené. Lze rozlišit několik hlavních typů reaktorů:

4.5.3.1. Dávkový reaktor

Dávkové reaktory fungují na principu autoklávu. Substrát je nejprve vložen do reaktoru společně s požadovaným množstvím vody, popř. aditivy nebo katalyzátory. Podle aplikace může reaktor být vybaven míchací aparaturou nebo soustavou pro výplach reziduálního vzduchu inertním plynem. Pro bezpečnost je vhodná přítomnost přetlakového ventilu. Příklad schématu dávkového reaktoru je na Obrázku 4.30. [98], [103]



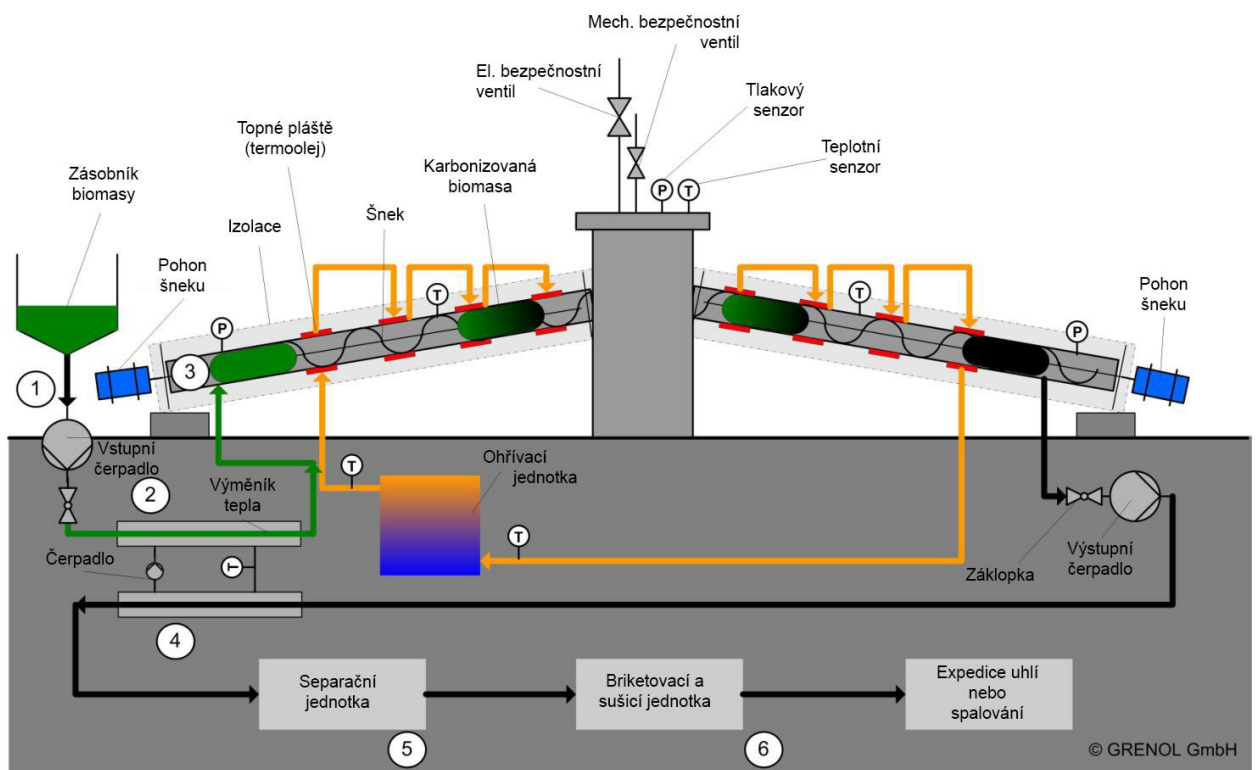
Obrázek 4.30: Schéma dávkového reaktoru HTC [103]

4.5.3.2. Kontinuální reaktor

Ve snaze zefektivnit proces HTC probíhá vývoj kontinuálních reaktorů. Mezi první takové reaktory patří reaktor společnosti Grenol (viz. Obrázek 4.31). Nadrcená a promísená biomasa obohacená katalyzátory je vedena do zásobníku, odkud je čerpána vysokotlakým čerpadlem do reaktoru. Po ohřátí na 230 °C je za tlaku 2,5 MPa posouvána šnekem uvnitř reaktoru. Na výstupním konci reaktoru je uhlí vyvedeno a odseparováno

od kapalné fáze. Uhlí je ztuhněno do briket s obsahem vody 15%. Voda z procesu je zředěna a vháněna do skleníků, kde jsou v ní pěstovány vodní rostliny (*stolístek vodní*). Tyto rostliny rychle rostou a později slouží jako substrát v dalším procesu. Grenol také uvádí, že kapalnou frakci lze podrobit vakuové destilaci pro výrobu hnojiv, nicméně nejsou uvedeny podmínky výroby a použití těchto hnojiv. [97], [104]

Mezi budoucí výzvy vývoje bude nejspíše patřit zavedení recirkulace vzniklé kapalné fáze, která se již osvědčila v dávkovém procesu. Po odebrání kondenzujících složek může recirkulace částečně pomoci s ohřevem vstupní směsi a do jisté míry nahradit přidávané katalyzátory. Další možnost, jak zefektivnit proces, je rozdělit jej do fází. Gómez a kol. [97] provedli teoretickou simulaci rozdělení procesu na fáze společně s recirkulací kapalné fáze s kladnými výsledky. [97]



Obrázek 4.31: Schéma kontinuálního HTC reaktoru (zdroj: Grenol)

4.5.3.3. Mikrovlnný ohřev

V literatuře je psáno o HTC s mikrovlnným ohřevem. V porovnání s klasickým ohřevem při HTC nabízí mikrovlnný ohřev rychlý a efektivní ohřev s relativně vysokou produktivitou, nicméně uhlí vykazuje nižší energetické hodnoty a menší teplotní stabilitu. Ozáření mikrovlnami by mohlo současně potenciálně sloužit jako předúprava. [99]

4.5.4 Porovnání produktů HTC a pyrolytických procesů

4.5.4.1. Uhlí

HTC uhlí má podobné využití a potenciální aplikace jako uhlí získané pyrolytickými postupy, nicméně hydrotermální úprava doplňuje nedostatky klasické pyrolýzy ve zpracování materiálů s vyšším obsahem vlhkosti. Vzhledem k nižší teplotě procesu a delší době zdržení tvoří při HTC pevná složka vyšší podíl s vyššími poměry H:C a O:C. Dá se předpokládat, že spalné teplo HTC uhlí je nižší, než spalné teplo uhlí vzniklého při klasické pyrolýze. Podíl pevné složky je udáván v rozmezí 35 – 60 %, některé zdroje uvádějí podíl až 80 %. Vzniká větší množství látek rozpustných ve vodě a méně plyných produktů, především CO₂. Chemická struktura HTC uhlí více připomíná přírodní hnědé uhlí. Biouhlí vzniklé pyrolýzou má větší aktivní povrch. Zatímco HTC uhlí je méně porézní, než uhlí z pyrolýzy, obsahuje funkční skupiny vhodné pro zachycování kovových iontů. Pro nabytí vyšší poréznosti je třeba uhlí aktivovat fyzikálně (pyrolýzou) nebo chemicky aktivačními činidly (např. KOH). Hydrotermální procesy nabízejí efektivnější zpracování širšího množství materiálů, které společně s odlišnými podmínkami reakcí mohou produkovat uhlí s variabilními vlastnostmi. [76], [97], [99]

Po vyjmutí z reaktoru má HTC uhlí největší schopnost zadržovat vodu. Lisováním je tato schopnost snížena, kompletním vysušením nabývá uhlí hydrofobních vlastností. Na vysušení HTC uhlí je potřeba menší množství energie, než na sušení vstupní biomasy v případě pyrolýzy nebo torrefakce. HTC uhlí se v půdě rozkládá rychleji a zachová si více potenciálních živin ze vstupního substrátu, což však může platit i pro nežádoucí látky, jako např. těžké kovy. [76], [99]

4.5.4.2. Kapalná frakce

Kapalná frakce představuje jeden z hlavních problémů této metody. Jedná se o složitou směs organických látek, která je ovlivněna jak substrátem, tak provozními podmínkami. Vzhledem k produkovanému množství je potřeba určit, jak s takovým materiálem nakládat, popř. jej využít. Mezi varianty využití připadá recirkulace, anaerobní digesce nebo naředění a biologické čištění. [76], [99]

4.5.5 Výhody HTC proti biochemickým procesům

Hlavní výhodou je podstatně kratší doba – kompostování nebo anaerobní digesce trvají týdny, zatímco HTC zabere desítky hodin. Gastroodpad může v reaktorech na anaerobní digesci jednoduše narušit rovnováhu probíhajících procesů. HTC nevyžaduje

hygienizaci a pravděpodobně ani desintegraci [105]. Vzhledem k většímu podílu pevné frakce je produkováno menší množství emisí. V literatuře se uvádí, že uhlí vzniklé HTC gastroodpadu má vyšší energetický obsah, než bioplyn ze stejného substrátu. [76], [105]

4.5.6 HTC a gastroodpad

Studie vypracovaná Tradlerem a kol. [79] pojednává o vlivu kompozice gastroodpadu na výstupní produkt. Živočišné zbytky produkují lepkavé uhlí, které se obtížně vyjímá z reaktoru. Podíl uhlí byl ze zkoumaných materiálů nejmenší, zato podíl kapalné frakce nejvyšší. Z materiálu bohatého na sacharidy (rýže) nebo restauračního odpadu vzniklo uhlí jednodušší na manipulaci a v podstatně větším množství. Uhlí z restauračního odpadu mělo o 35% větší výhřevnost než uhlí z rýže. Podle autorů studie má HTC potenciál stát se v budoucnosti decentralizovaným řešením pro zpracování organického odpadu na úrovních jednotlivých stravovacích podniků. [79]

HTC uhlí z gastroodpadu má špatné předpoklady pro peletování. Pelety mají nedostatečné mechanické vlastnosti, což lze přisoudit malému obsahu ligninu. Tengfei a kol. [78] uvádí, že přidáním dřevěných pilin do zpracovávaného gastroodpadu je možné zvýšit mechanické vlastnosti pelet a snížit potřebnou práci pro lisování. [78]

Podle studie Chupenga a kol. [80], gastroodpad je možné implementovat při HTC procesu čistírenských kalů. HTC uhlí z čistírenských kalů mělo po zpracování nižší výhřevnost, než samotné čistírenské kaly vlivem nízkého obsahu uhlíku a vyššího obsahu popelovin. Při smíšení kalů s kuchyňským odpadem uhlí vykazovalo značně lepší palivové vlastnosti. [80]

4.5.7 Hydrotermální zplyňování

Při pyrolytických procesech a zplyňování je nežádoucí vyšší obsah vlhkosti. S narůstající vlhkostí materiálu vznikají těžké dehty, které se usazují v reaktoru. Dehty mají vyšší hustotu a mohou vést k selhání zplyňovacího procesu. Podobně jako hydrotermální karbonizace je vhodná alternativa pro substráty s vyšším obsahem vlhkosti, stejně tak je hydrotermální zplyňování atraktivní alternativa k termochemickému zplyňování. [113]

Pro hydrotermálním zplyňování je užívána voda v nadkritickém stavu, tzn. při teplotách vyšších než 374 °C a zároveň tlacích vyšších než 22,1 MPa. V tomto stavu zanikají vodíkové můstky a voda má vysokou rozpustnost, reaktivitu a difuzivitu a nízkou viskozitu a polaritu. Při zplyňování v těchto podmínkách také v omezené míře vzniká CH₄. [111], [112]

Hydrotermálnímu zplyňování gastroodpadu s přítomnými plastovými obalovými příměsmi se věnovali ve své studii Su a kol. [111] Rostoucí teplota měla vliv na intenzitu hydrotermálních reakcí a s tím i produkci plynu. Plyn z procesu při nejvyšší sledované teplotě obsahoval více H_2 a CH_4 a měl nejvyšší výhřevnost. Zplyňovací účinnost s teplotou také rostla. Delší doba zdržení měla vliv na větší množství vyprodukovaného plynu, zvýšení výhřevnosti a účinnosti. S vyšší koncentrací substrátu klesla zplyňovací účinnost a produkce plynu, zejména H_2 . Vyšší koncentrace substrátu však podpořila methanační reakce, s vyšším podílem CH_4 narostla výhřevnost plynu na nejvyšší změřenou hodnotu. Potravinová aditiva měla pozitivní vliv na zplyňovací účinnost, výhřevnost a tvorbu plynu. Narostlo zejména množství H_2 a menší míře i CH_4 . Na^+ se ukázal jako účinný katalyzátor zplyňovacích procesů. Nejpozitivnější vliv měl Na_2CO_3 , poté $NaHCO_3$ a nakonec $NaCl$. Nadměrná koncentrace těchto látek však může mít korozivní nebo precipitační účinky. Přítomnost plastů snížila produkci syntézního plynu a zplyňovací účinnost, ale také přispěla k vyšší výhřevnosti plynu. Pro získání co nejvíce H_2 je vhodnější zplyňovat čistý gastroodpad. [111]

Podobnou studii také vypracovali Su a kol. [112], se shodnými východisky. Zde však nebyl použit gastroodpad, ale pouze simulace jídla složená z 10 % proteinového prášku, 20 % kuchyňského oleje, 30 % celulózy a 40 % rozpustného škrobu. Nelze tedy přímo porovnávat výsledky se studií zmíněnou výše, nicméně byl zjištěn zajímavý účinek potravinového aditiva $NaOH$. V porovnání s $NaHCO_3$ a $NaCl$ mělo daleko lepší vliv na tvorbu plynu, než Na_2CO_3 v předchozí studii. Společně s větším množstvím vzniklého plynu a vyšší účinností plyn neobsahoval CO_2 a CO , což bylo zdůvodněno jako účinek $NaOH$. Naprostou většinu syntézního plynu tvořil H_2 . Podíl CH_4 byl menší, nicméně stále ve větším množství, než při použití jiných aditiv. Aditiva také měla vliv na strukturu pevných reziduí po zplyňování, znatelně navyšující porozitu a vnitřní povrch uhlí. [112]

5. Měření a dosažené výsledky

Měření bylo zaměřeno na elementární analýzu vzorků banánových a mrkvových slupek, suchého chlebu a žluklých lusků podzemnice olejné.

5.1. Měřené materiály

5.1.1 Banánové slupky

Banán, plod banánovníku, je celosvětově oblíbené tropické ovoce protáhlého tvaru. Plodina původně pochází z jihovýchodní Asie. Mezinárodní obchod s banány započal na konci 14. století, od té doby se banán stal nejprodávanějším ovocem na světě. Při konzumaci banánů vzniká odpad v podobě banánové slupky. Tloušťka slupky závisí na zralosti banánu – zralé banány mají slupku tenčí, než čerstvě sklizené zelené banány. Slupky použité pro měření pocházejí z banánů varianty Cavendish pěstovaných v Kolumbii společností Dole. [123]



Obrázek 5.1: Banánové slupky syrové, sušené a namleté (zdroj:autor)

5.1.2 Mrkvové slupky

Mrkev obecná je kořenová zelenina s nezastupitelnou rolí v mnoha mezinárodních kuchyních. Mrkev je lidstvu známa od nepaměti, nicméně divoká forma mrkve nebyla původně pěstována pro konzumaci. Dnešní podoba mrkve s oranžovou barvou byla vyšlechtěna v 17. století. Z mrkve je většinou při úpravě ke konzumaci strouhána slupka, se kterou je nakládáno jako s odpadem. Slupka mrkve použita při měření pochází z mrkve odrůdy Nantes produkovanou společností Dolcefrutta Group ve Veroně v Itálii. [124]



Obrázek 5.2: Slupky od mrkve čerstvé, sušené a namleté (zdroj: autor)

5.1.3 Suchý chléb

Chléb je pečená potravina, která je všude po světě konzumována alespoň 10 000 let. Vzhledem k této skutečnosti má chléb mnoho forem a podob. Při měření byl použit chléb typu šumava, jelikož se jedná o tradiční český pokrm a nejprodávanější chléb v České republice. Chléb vyrobila společnost United Bakeries a. s. Výrobce udává následující složení:

- Pšeničná a žitná mouka
- Voda
- Sůl s jodem
- Droždí
- Kmín
- Pšeničný lepek
- Pšeničný slad
- Sójová mouka



Obrázek 5.3: Chléb typu šumava čerstvý, suchý a namletý (zdroj: autor)

5.1.4 Plody podzemnice olejně

Podzemnice olejná je luštěnina z čeledi bobovitých rostlin. Vzhledem k vysokému obsahu oleje je řazena mezi olejniny. Semena z lusků této plodiny jsou lidově pojmenována buráky či arašidy. Po kulinářské a nutriční stránce jsou považovány za ořechy, tuto kategorii také vedou v celosvětové konzumaci. Při příliš dlouhém skladování,

ačkoliv ve vhodných podmínkách, mohou plody zežluknout. V takovém případě není lidem doporučena jejich konzumace. Zkoušené arašídy byly zakoupeny v síti prodejen Kaufland a pocházejí z USA. Pro účely této práce budou plody podzemnice olejné označovány pod pojmem 'arašídy'. [125], [126]



Obrázek 5.4: Arašídy výchozí a namleté (zdroj: autor)

5.2. Úprava vzorků

5.2.1 Vysušení

Vzorky odpadních materiálů byly vysušeny při pokojové teplotě po dobu jednoho týdne, s výjimkou vzorků určených pro stanovení vlhkosti, které byly zachovány v původní podobě. Sušení také neprobíhalo u arašídů, vzhledem k nízkému obsahu vlhkosti a nedostatku času.

Vzorky slupek mrkve a banánu sušené při pokojové teplotě byly v zájmu usnadnění sušení nasekány kuchyňským mixérem Sencor SHB 4465VT-EUE3 po prvních 24 hodinách sušení.



Obrázek 5.5: Sencot SHB 4465VT-EUE3 (zdroj: autor)

5.2.2 Drcení

Provedená měření vyžadovala velikost částic alespoň 1 mm. Vysušené vzorky slupek mrkve a banánu byly namlety v elektrickém mlýnku na kávu.

Sušený chléb a arašídy byly drceny ve střížném mlýnu Retsch SM 100 s vyměnitelnými síty pro optimalizaci velikosti zrn. Pro namletí materiálů bylo nejprve použito síto s velikostí ok 2 mm, potom v druhé fázi síto s velikostí ok 1 mm.



Obrázek 5.6: Retsch SM 100 (zdroj: retsch.cz)



Obrázek 5.7: ETA Fragranza 0066 90000 (zdroj: eta.cz)

5.3. Přístroje použité při analýze

5.3.1 Analytická váha AND GF-3000

Váha byla použita k vážení čerstvých vzorků a zjištění úbytku hmotnosti ztrátou vlhkosti při sušení v peci. Váha měří s přesností na setiny gramu.



Obrázek 5.8: Analytická váha AND GF-3000 (zdroj: Industrialworld.com)

5.3.2 Univerzální pec Memmert UF30

Pec byla použita k vysušení vzorků v původní podobě pro stanovení obsahu vody. Vzorky v původním stavu byly do pece vloženy v hliníkových vysoušecích miskách. Misky byly jednotlivě zváženy nejprve samotné a posléze s daným vzorkovým materiálem. Po

dokončení sušení, kdy vzorky vykazovaly konstantní hmotnost, byly vloženy do exsikátoru pro vychladnutí. Po vychladnutí vzorků došlo ke konečnému vážení. Sušení probíhalo při teplotě 105 °C po dobu 7 h.



Obrázek 5.9: Pec Memmert UF30 (zdroj: Memmert.com)

5.3.3 Analytická váha Sartorius SP124 S

Váha byla použita k navážení vzorků do kalorimetru AC 600 a analyzátorů CHN 628 a CHN 628 S. Váha je spojena s počítači obsluhující analyzátory – při zaznamenání hodnoty je hodnota automaticky odeslána do příslušného počítače. Váha disponuje citlivostí měření na 0,1 mg. Pro konzistentní měření vyžaduje váhový stůl tlumící vibrace. Váha je vybavena ochrannými kryty proti proudění vzduchu, které může zkreslovat naměřené hodnoty.



Obrázek 5.10: Váha Sartorius S124 S (zdroj: ebay.com)

5.3.4 Termogravimetrický analyzátor LECO TGA 701

Přístroj určuje ztrátu hmotnosti působením teploty v řízeném prostředí. Operace analyzátoru jsou řízeny přistaveným počítačem. Analýza probíhá v peci, kde jsou vzorky uloženy v žíhacích kelímcích. Žíhací kelímky jsou umístěny na dvacetimístném karuselu. Jeden kelímek je vždy prázdný, tzv. 'referenční' kelímek. Ostatní kelímky slouží

k analýze, tzn. je možné v přístroji analyzovat 19 vzorků najednou. Pec je možné nastavit v rozmezí teplot 100 – 1000 °C.

Navažování vzorků je prováděno poloautomaticky, kde uživatel aplikuje vzorky do daného kelímku. Po stisknutí tlačítka na přístroji je vzorek zvážen, zaznamenán a karusel je automaticky pootočen pro vložení následujícího vzorku.

V rámci měření byl každý měřený materiál aplikován do čtyř kelímků. Po nastavení parametrů analýzy na osobním počítači probíhá proces automaticky až do dokončení analýzy. Součástí pracoviště jsou tlakové bomby s N₂, O₂ a vzduchem pro libovolné nastavení podmínek při analýze. Pro měření k této práci byly vzorky spalovány v atmosféře O₂ při teplotě 550 °C.



Obrázek 5.11: LECO TGA 701 (zdroj: LECO)

5.3.5 Kalorimetr LECO AC 600

V kalorimetru bylo zjišťováno spalné teplo měřených vzorků. Na analytické váze Sartorius SP 124 S bylo naváženo optimální množství materiálu, které bylo posléze slisováno do tablet ručním hydraulickým lisem. Tablety byly opět zváženy analytickou vahou a hodnoty odeslány do počítače ovládajícího kalorimetr. Pro analýzu se vzorky vkládají do tzv. 'spalovací bomby'. Tableta byla umístěna do ocelové mističky, která je posléze vložena do nástavce na víku bomby. Víko je při skládání bomby zavěšeno na pracovním stojanu. Zapalovací nití je spojen zapalovací drátek a tableta tak, aby byly při zapálení v kontaktu. Víko se vyjme ze stojanu a vloží do těla bomby. Bomba je utěsněna prstencem a natlakována ve stojanu plynem O₂ z přistavené tlakové nádoby na tlak 3 MPa. Po natlakování je bomba ponořena do kontrolní nádoby pro zjištění případných unikajících bublin. Po kontrole vodotěsnosti je bomba vložena do přístroje, kde dojde ke spálení vzorku. Po dokončení je bomba vyjmuta z přístroje. V pracovním stojanu je její vnitřek dekomprimován, bomba rozebrána a vyčištěna pro další použití.



Obrázek 5.12: LECO AC 600 s pracovním stojanem (zdroj: LECO)

5.3.6 Elementární analyzátor LECO CHN628

Analyzátor spaluje vzorky v dvoustupňové peci a určí obsah C, H a N v navážce. Vzorky byly navažovány do folií konvexního tvaru v množství 100 mg. Po navážení byl obsah zabalen do folie a zakroucen do kapkovitého tvaru, aby byl celkově uzavřen. Po zabalení byl vzorek pro kontrolu zvážen ještě jednou a hodnota odeslána do ovládajícího počítače analytickou vahou. Vzorky byly naskládány do karuselového zásobníku přístroje, který měl 30 míst. Jednotlivé vzorky byly připraveny čtyřikrát, nicméně přístroj vyžadoval periodicky opakované dávkování vzorků, včetně kalibračních vzorků a tzv. 'blank' pozic. Kalibrační vzorky byly použity podle standardů výrobce, jednalo se o vzorek rýže 502-278, žita 502-275 a EDTA LCRM.

Vzorky jsou do primární pece dávkovány gravitačně, spalování v primární peci probíhá v čistě kyslíkové atmosféře. Vzniklé oxidy uhlíku, dusíku a voda jsou vedeny nosným plynem do sekundární pece pro dodatečnou oxidaci a filtraci. Voda a oxidy uhlíku (CO_2) jsou vedeny k infračerveným spektroskopickým sensorům, oxidy dusíku jsou vedeny trubicí s měděnou náplní pro redukci na N_2 , který je po další filtraci detekován na tepelně vodivostní jednotce.

5.3.7 Analyzátor síry LECO CHN 628 S

Jedná se o přídatný modul k CHN 628 se samostatnou spalovací komorou a analytickým aparátem. Oba stroje jsou připojené ke stejnému počítači, kde pro ovládání příslušného stroje stačí pouze spustit daný software. Je tedy možné paralelně měřit na obou přístrojích najednou. Vzorky jsou do spalovací komory přístroje vkládány a vykládány manuálně, prostřednictvím tzv. 'spalovacích lodiček'. Na analytické váze byl materiál navážen do lodiček a hodnoty zaslány do počítače. Síra ve spalinách byla měřena infračervenou jednotkou, podle intenzity signálu přístroj určí obsah síry.



Obrázek 5.13: LECO CHN 628 +S modul (zdroj: LECO)

5.4. Výsledky

5.4.1 Vlhkost

Vlhkost materiálů byla měřena po třech vzorcích, pro jednotlivé vzorky byla vlhkost spočítána podle vzorce:

$$W = \frac{(m_{vv} - m_M) - (m_{sv} - m_M)}{m_{vv} - m_M} [\%] \quad (5.1)$$

Kde:

- m_M – Hmotnost kelímku [g]
- m_{vv} – Hmotnost vlhkého vzorku [g]
- m_{sv} – Hmotnost suchého vzorku [g]
- W – Relativní vlhkost vzorku [%]

Tabulka 3: Vlhkostí vzorků chlebu

Chléb	Miska m_M [g]	Vlhký vzorek m_{vv} [g]	Suchý vzorek m_{sv} [g]	Vlhkost ^o W [%]
Ch1	8,37	93,36	58,96	40,48
Ch2	8,37	101,91	62,80	41,81
Ch3	8,37	96,57	60,53	40,86
Průměr				41,05

Tabulka 4: Vlhkosti vzorků slupek mrkve a slupek banánu

Mrkev - slupky	Miska m_M [g]	Vlhký vzorek m_{vv} [g]	Suchý vzorek m_{sv} [g]	Vlhkost ^o W [%]
M1	8,37	111,71	21,13	87,65
M2	8,37	105,32	20,70	87,28
M3	8,37	98,23	19,36	87,77
Průměr				85,57
Banán - slupky	Miska m_M [g]	Vlhký vzorek m_{vv} [g]	Suchý vzorek m_{sv} [g]	Vlhkost ^o W [%]
B1	8,37	11,30	23,07	85,72
B2	8,37	105,50	20,38	87,64
B3	8,37	99,18	19,66	87,57
Průměr				86,98

5.4.2 Obsah vázané vlhkosti popelovin a hořlavin (TGA 701)

Přístroj analyzuje úbytek materiálu při spálení, hořlaviny se tedy počítají rozdílem od 100 %. Uvedená vlhkost je vázaná vlhkost, která v materiálu zůstane po vysušení a uvolněna je až při spalování.

$$C + W + A = 100 \text{ [%]} \quad (5.2)$$

Kde

- C – Podíl hořlavin [%]
- W – Podíl vlhkosti [%]
- A – Podíl popelovin [%]

Tabulka 5: Hodnoty C+W+A pro suchý chléb

Suchý chléb	Vlhkost W [%]	Popeloviny A [%]	Hořlaviny C [%]	Popeloviny v sušině A_d [%]
Vzorek 1	8,07	3,02	88,91	3,29
Vzorek 2	8,25	3,06	88,69	3,33
Vzorek 3	8,20	3,00	88,80	3,27
Vzorek 4	8,18	3,06	88,76	3,33
Průměr [%]	8,18	3,04	88,78	3,31
Směrodatná odchylka	0,07594	0,03000	0,09201	0,03000
Variační koeficient [%]	0,92836	0,98684	0,010364	0,90634

Tabulka 6: Hodnoty C+W+A pro mrkvové slupky, banánové slupky a arašídý

Mrkev – slupky	Vlhkost W [%]	Popeloviny A [%]	Hořlaviny C [%]	Popeloviny v sušině A _d [%]
Vzorek 1	7,45	10,66	81,89	11,52
Vzorek 2	7,44	10,73	81,83	11,59
Vzorek 3	7,48	10,79	81,73	11,66
Vzorek 4	7,46	10,74	81,80	11,61
Průměr [%]	7,46	10,73	81,81	11,60
Směrodatná odchylka	0,01708	0,05354	0,06652	0,05802
Variační koeficient [%]	0,22895	0,49897	0,08131	0,50017
Banán – slupky	Vlhkost W [%]	Popeloviny A [%]	Hořlaviny C [%]	Popeloviny v sušině A _d [%]
Vzorek 1	6,74	12,51	80,75	13,42
Vzorek 2	6,72	12,47	80,81	13,37
Vzorek 3	6,76	12,49	80,75	13,40
Vzorek 4	6,73	12,41	80,86	13,31
Průměr [%]	6,74	12,47	80,79	13,38
Směrodatná odchylka	0,01708	0,0432	0,05315	0,04796
Variační koeficient [%]	0,25341	0,34643	0,06579	0,35845
Arašídý	Vlhkost W [%]	Popeloviny A [%]	Hořlaviny C [%]	Popeloviny v sušině A _d [%]
Vzorek 1	3,13	2,58	94,29	2,66
Vzorek 2	3,05	2,60	94,35	2,68
Vzorek 3	3,21	2,54	94,25	2,62
Vzorek 4	3,33	2,45	94,22	2,54
Průměr [%]	3,18	2,54	94,28	2,63
Směrodatná odchylka	0,11944	0,06652	0,05620	0,06191
Variační koeficient [%]	3,75597	2,61890	0,05961	2,35399

5.4.3 Elementární analýza (CHN 628 + S)

Přístroj neurčuje obsah kyslíku ve vzorcích, proto je nutné jej dopočítat opět do 100 % společně s naměřenými hodnotami popelovin v sušině z průměrných hodnot.

$$C + H + N + S + A_d \approx 100 [\%]$$

(5.3)

Kde

- *C* – Podíl uhlíku [%]
- *H* – Podíl vodíku [%]
- *N* – Podíl dusíku [%]
- *S* – Podíl síry [%]
- *A_d* – Podíl popelovin v sušině [%] (viz. Tabulka 5 a Tabulka 6)

Tabulka 7: Výsledky elementární analýzy suchého chlebu a mrkvových slupek

Suchý chléb	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]
Vzorek 1	42,153	6,4847	2,1811	0,1626	-
Vzorek 2	42,146	6,4874	2,2567	0,1597	-
Vzorek 3	42,165	6,4768	2,1422	0,1589	-
Vzorek 4	42,024	6,4742	2,1736	-	-
Průměr [%]	42,12	6,48	2,19	0,16	45,74
Směrodatná odchylka	0,06580	0,00628	0,04855	0,00195	-
Variační koeficient [%]	0,15622	0,09691	2,21689	1,21875	-
Mrkev - slupky	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]
Vzorek 1	39,129	5,8253	0,67160	-	-
Vzorek 2	39,195	5,8290	0,68264	-	-
Vzorek 3	39,188	5,8299	0,66414	-	-
Vzorek 4	39,055	5,8256	0,65285	-	-
Průměr [%]	39,14	5,83	0,67	-	42,76
Směrodatná odchylka	0,06497	0,00234	0,01254	-	-
Variační koeficient [%]	0,16599	0,04014	1,87164	-	-

Tabulka 8: Výsledky elementární analýzy banánových slupek

Banán - slupky	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]
Vzorek 1	42,009	5,7008	1,0444	-	-
Vzorek 2	41,934	5,6883	1,0613	-	-
Vzorek 3	41,862	5,6732	1,0161	-	-
Vzorek 4	41,908	5,7164	1,0340	-	-
Průměr [%]	41,93	5,69	1,04	-	37,96
Směrodatná odchylka	0,06152	0,01836	0,01894	-	-
Variační koeficient [%]	0,14672	0,32267	1,82115	-	-

Tabulka 9: Výsledky elementární analýzy arašídů

Arašídý	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]
Vzorek 1	56,606	7,5574	2,6746	0,1199	-
Vzorek 2	58,084	7,9090	3,2967	0,1724	-
Vzorek 3	57,986	7,8795	3,1369	0,1837	-
Vzorek 4	56,283	7,3926	2,3675	0,1285	-
Průměr [%]	57,24	7,68	2,87	0,15	29,43
Směrodatná odchylka	0,92856	0,25152	0,42583	0,03163	-
Variační koeficient [%]	1,62222	3,27500	14,83728	21,08667	-

5.4.4 Spalné teplo a výhřevnost (AC 600)

Kalorimetr v datovém výstupu udává spalné teplo, pro přepočítání na výhřevnost je možné použít empirický vztah podle ČSN 44 1352 [114]:

$$Q_i^r = Q_s^r - (0,02442 \cdot 1000) \cdot (W_f^r + 8,94 \cdot H_f^r) \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.4)$$

Kde

- Q_f^r – výhřevnost [kJ.kg⁻¹]
- Q_s^r – spalné teplo [kJ.kg⁻¹]
- W_f^r – obsah vody v analytickém vzorku [%]
- H_f^r – obsah vodíku v analytickém vzorku [%]
- 8,94 – koeficient pro přepočítání vodíku na vodu
- 0,02442 – hodnota, která odpovídá energii spotřebované na ohřev a vytápění 1% vody při 25 °C

Tabulka 10: Hodnoty spalného tepla a výhřevnosti pro měřené materiály

Suchý chléb	Hmotnost [g]	Spalné teplo [MJ.kg ⁻¹]	Výhřevnost [MJ.kg ⁻¹]
Vzorek 1	0,9870	16,6894	14,2723
Vzorek 2	0,9997	16,7280	14,3109
Vzorek 3	0,9951	16,7429	14,3258
Průměr [MJ.kg ⁻¹]		16,72	14,30
Směrodatná odchylka		0,02761	-
Variační koeficient [%]		0,1651	-
Mrkev – slupky	Hmotnost [g]	Spalné teplo [MJ.kg ⁻¹]	Výhřevnost [MJ.kg ⁻¹]
Vzorek 1	0,9317	14,7348	11,3724
Vzorek 2	1,1122	14,6790	11,3166
Vzorek 3	1,0937	14,7121	11,3497
Průměr [MJ.kg ⁻¹]		14,71	11,35
Směrodatná odchylka		0,02806	-
Variační koeficient [%]		0,191	-
Banán – slupky	Hmotnost [g]	Spalné teplo [MJ.kg ⁻¹]	Výhřevnost [MJ.kg ⁻¹]
Vzorek 1	1,0334	16,0734	12,7071
Vzorek 2	1,1006	16,0795	12,7132
Vzorek 3	1,1006	16,1087	12,7424
Průměr [MJ.kg ⁻¹]		16,09	12,72
Směrodatná odchylka		0,01887	-
Variační koeficient [%]		1,1173	-
Arašídý	Hmotnost [g]	Spalné teplo [MJ.kg ⁻¹]	Výhřevnost [MJ.kg ⁻¹]
Vzorek 1	0,4022	25,6653	23,7444
Vzorek 2	0,4069	25,2017	23,2808
Vzorek 3	0,4095	25,7781	23,8572
Průměr [MJ.kg ⁻¹]		25,55	23,63
Směrodatná odchylka		0,30547	-
Variační koeficient [%]		1,1956	-

Jelikož u arašídů neproběhlo měření vlhkosti, při výpočtu výhřevnosti je uvažováno s nejvyšším obsahem vlhkosti, kterou arašídý mohou obsahovat, aby byly prodejné. Takový obsah vlhkosti je maximálně 10 %. [115]

5.4.5 Shrnutí výsledků

V Tabulka 11 jsou shrnuty všechny průměry měřených veličin a vypočtené hodnoty z Tabulka 3 – Tabulka 10.

Tabulka 11: Shrnutí výsledků měření

	Chléb	Mrkev – slupky	Banán – slupky	Arašídý
Volná vlhkost [%]	41,05	85,57	85,98	-
Vázaná vlhkost [%]	8,18	7,46	6,74	3,18
Popeloviny [%]	3,04	10,73	12,47	2,54
Hořlaviny [%]	88,78	81,81	80,79	94,28
C [%]	42,12	39,14	41,93	57,24
H [%]	6,48	5,83	5,69	7,68
N [%]	2,19	0,67	1,04	2,87
S [%]	0,16	-	-	0,15
O [%]	45,74	42,76	37,96	29,43
Spalné teplo Q _s ^r [MJ.kg ⁻¹]	16,72	14,71	16,09	25,55
Výhřevnost Q _r ^r [MJ.kg ⁻¹]	14,30	11,35	12,72	23,63
C:N [-]	19,23	58,42	40,32	19,94
C:H [-]	6,50	6,71	7,37	7,45

6. Diskuze a závěry

V práci byla zjištěna řada charakteristik vybraných materiálů, které se mohou potenciálně vyskytnout v gastroodpadech. Tyto charakteristiky ovlivňují volbu metod na zpracování těchto odpadních materiálů.

6.1. Chléb

Chléb je z uvedených materiálů pravděpodobně jediný, který je většinou využit bez zbytku, za předpokladu že není stižen plísní. Suchým chlebem je možné krmit některá zvířata nebo jej využít jako potravinu, např. ve formě strouhanky nebo krutonů do polévek.

Podle výsledků měření chléb typu šumava obsahuje 41,05 % vlhkosti, skládá se z 42,12 % uhlíku, 6,48 % vodíku, 2,19 % dusíku a 0,16 % síry. S touto vlhkostí a poměrem C:N rovnému 19 je chléb vhodný materiál pro kompost nebo anaerobní digesce. Za předpokladu, že chléb je plesnivý, není anaerobní digesce vhodná metoda, nicméně pro kompostování to nemusí být nutně problém, ale záleží na konkrétní metodě a aplikaci kompostu [116]. Např. jedná-li se o plíseň, která produkuje nebezpečné mykotoxiny, kompost by neměl být použit pro pěstování potravin. Stejně tak plíseň může poškodit rovnováhu ve vermikompostérech. Zkoumaný chléb měl za dokonalých podmínek výhřevnost 14,30 MJ.kg⁻¹, což je vyšší, než průměrná výhřevnost komunálního odpadu (9,12 MJ.kg⁻¹) [117]. V ZEVO by tedy plesnivý chléb mohl přispět k navýšení energetické hodnoty spalovaného odpadu, za předpokladu, že je suchý. Ačkoliv vysušený chléb obsahuje více vázané vlhkosti, než ostatní zkoumané materiály, obsah popelovin byl 3 % a obsah hořlavin 89 %. Spalování je tedy vhodná metoda, pokud si to situace vyžaduje.

Suchý chléb mohl být vhodným materiálem pro pyrolytické procesy. Podle vyššího poměru C:H je chléb pravděpodobně vhodnější pro výrobu biouhlí, než zplyňování. [118]

6.2. Mrkvové slupky

Slupky od mrkve jsou velmi vlhký materiál, zkoumané vzorky vykazovaly 85,57 % volné vlhkosti, nicméně podle osobního sledování ji ztrácejí velmi rychle, nejspíše vlivem malé tloušťky. Obsah uhlíku byl naměřen 39,14 %, vodíku 5,83 %, dusíku 0,67 %. Množství síry bylo zanedbatelné, vzhledem k velmi nízké intenzitě detekčního signálu – síra obsažená ve vzorcích byla pod kalibrační hodnotou přístroje. Poměr C:N byl nejvyšší ze zkoumaných materiálů (58), ačkoliv množství uhlíku bylo nejmenší ze všech měřených vzorků. Slupky od mrkve je pravděpodobně nejvhodnější kompostovat, pokud

je optimalizován poměr C:N kompostu. Vzhledem k vyššímu obsahu popelovin (11 %) jsou slupky od mrkve méně vhodný materiál pro anaerobní digesci. Ze všech zkoušených materiálů byla u slupek od mrkve zjištěna nejmenší výhřevnost ($11,35 \text{ MJ.kg}^{-1}$) a druhý nejmenší obsah hořlavin (82 %). Možná alternativa zpracování tohoto materiálu by také mohla být výroba biouhlí HTC procesem, vzhledem k zjištěnému poměru C:H 7. Výsledky jsou srovnatelné s literaturou, například studií Gorzelanyho a kol. [119], kde však neproběhlo předsušování vzorků před termogravimetrickou analýzou.

6.3. Banánové slupky

Banánové slupky se ukázaly jako nejvlhčí zkoumaný materiál, s hodnotou volné vlhkosti 85,98 %. Sušení slupek bylo mnohem problematictější, než u mrkvových slupek. Sušení slupek probíhalo pomalu a úpravu tyčovým mixérem pro zvýšení povrchu sušeného materiálu komplikovaly vlákna slupek. Stopové množství vláken zůstalo přítomné i po vysušení a rozemletí slupek. Slupky obsahovaly nejvíce popelovin (12,47 %) a nejméně hořlavin (80,79 %) ze všech zkoumaných materiálů. Byly zjištěny obsahy uhlíku 41,93 %, vodíku 6,74 %, dusíku 1,04 %. Obsah síry nebyl zaznamenán, stejně jako u mrkvových slupek. Banánové slupky vykazovaly výhřevnost $12,72 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Z uvažovaných metod zpracování pro slupky od banánu platí to samé, co pro mrkvové slupky. S podílem C:N 40 jsou vhodné pro kompostování v optimální kombinaci s ostatními materiály. Při porovnání výsledků s prací Kabengeho a kol. [120], největší rozdíl je patrný ve vlhkosti slupek. Zatímco v rámci této práce byla naměřena volná vlhkost 86 %, autoři udávají hodnotu 72 %. Toto lze vysvětlit vyšší čerstvostí slupek použitých při měření k této práci. Zajímavý je vyšší obsah vázané vlhkosti ve vysušených vzorcích slupek, kde autoři uvádějí hodnotu 11,5 % oproti 6,7 % zjištěných v této práci. Vliv na tento rozdíl může mít použití jiných metod společně s vlhčím vzduchem, jelikož studie pochází z Ugandy v rovníkové Africe.

6.4. Arašídý

U vzorků arašídů byl zjištěn nejvyšší obsah hořlavin (94 %) a nejmenší obsah popelovin (2,5 %) a vázané vlhkosti (3 %). Také byl zaznamenán nejvyšší podíl uhlíku (57 %), vodíku (7,68 %), dusíku (2,87 %). Síra byla naměřena v podílu 0,15 %. Arašídý mají zdaleka nejvyšší výhřevnost, 24 MJ.kg^{-1} , pravděpodobně díky obsahu olejových látek. Poměr C:N byl odhadnut na 20, poměr C:H 7,5. Z těchto údajů je zřejmé, že arašídý je možné kompostovat, spalovat nebo pyrolyticky zpracovávat. Vzhledem k nízkému

obsahu vlhkosti nejsou vhodné pro anaerobní digesci. Výsledky měření jsou srovnatelné s ostatními autory. Největší rozdíl je patrný u naměřeného spalného tepla, což lze vysvětlit testováním celých arašídů včetně jader. [121], [122]

Přes všechny zajímavé naměřené hodnoty arašídů představovaly pravděpodobně nejobtížnější materiál na analýzu. Arašídů je obtížné drtit na malé částice, vzhledem k obsahu olejovin mají tendenci zalepovat malé prostory, jsou-li namlety příliš jemně. Při měření spalného tepla měly vzorky arašídů tendenci vylétávat z mističky uvnitř spalovací bomby, vyžadující opakované měření s přizpůsobenou navázkou. Ze všech měřených materiálů vykazují měření s arašídů nejvyšší hodnoty variačních koeficientů, viz. Tabulka 6, Tabulka 9 a Tabulka 10, kde u některých parametrů přesahují toleranční mez a měření by mělo být provedeno znovu.

6.5. Závěr

Gastroodpad představuje výzvu, která dnes ještě není zdaleka překonána. Pro optimální nakládání s tímto odpadem v budoucnosti bude potřeba nejen efektivní sběr z gastronomických podniků, ale také odpovídající infrastruktura zpracovacích zařízení pro tento odpad. Zatímco termín 'gastroodpad' z legislativního hlediska definuje složku odděleného sběru, z materiálového hlediska tvoří kuchyňské odpady podstatnou část směsného komunálního odpadu, především v sídlištních zástavbách.

V této práci bylo pojednáno o metodách a technologiích užitečných při zpracování gastroodpadů. Zároveň bylo provedeno měření a předběžné určení optimální metody pro zpracování daných odpadů na základě teoretických poznatků z odborné literatury.

Společně s probíhajícím výzkumem nových aplikovatelných technologií by bylo vhodné dále a hlouběji zkoumat vlastnosti materiálů v gastroodpadu. Získané poznatky by mohly vést k uvědomění potenciálu, který tento materiál nabízí.

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] STENMARCK, Å.; JENSEN C.; QUESTED T.; MOATES G.: *Estimates of European food waste levels*. Stockholm, 2016. ISBN 978-91-88319-01-2.
- [2] *Skladba směsného komunálního odpadu z domácností ČR* [online]. EKO–KOM © 2020 [cit. 21/11/2020]. Dostupné z: <https://www.ekokom.cz/news/715/212/Skladba-smesneho-komunalniho-odpadu-z-domacnosti-cR>
- [3] Ministerstvo životního prostředí České republiky: *Vyhláška 8/2021 Sb. o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů*, 2021. Sbírka vyhlášek, ročník 2021, částka č. 5.
- [4] *Pražské služby a.s. Gastroodpad* [online]. PSAS: © 2019 [cit. 3/3/2020]. Dostupné z: <https://www.psas.cz/gastroodpad/>.
- [5] *Kanalizační řády* [online]. PVK: © 2020 [cit. 3/3/2020]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/zakaznici/ke-stazeni/kanalizacni-rad/>.
- [6] *Proč potřebujeme humus* [online]. Kompostuj: © 2018 [cit. 3/3/2020]. Dostupné z: <http://www.kompostuj.cz/vime-jak/vime-proc/proc-potrebuujeme-humus/>.
- [7] DIAZ, L. F.; de BERTOLDI, M.; BIDLINGMAIER, W.; STENTIFORD, E.: *Waste Management Series Volume 8: Compost Science and Technology*. Amsterdam, Nizozemsko, 2007. ISBN 978-0-08-043960-0.
- [8] VÁŇA, J.: *Kompostování biodegradabilních odpadů v České republice*. In: *Biom.cz* [online] 13/2/2002. Poslední aktualizace 19/3/2002 [cit. 3/3/2020]. Dostupné z: <http://www.biom.cz/cz/odborne-clanky/kompostovani-biodegradabilnich-odpadu-v-ceske-republice/>. ISSN 1801-2655.
- [9] Český statistický úřad. *Produkce, využití a odstranění odpadů – 2010* [online]. 30/9/2011 [cit. 3/3/2020]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2010-ovm01jeah2>.
- [10] Český statistický úřad. *Produkce, využití a odstranění odpadů – 2014* [online]. 30/10/2015 [cit. 3/3/2020]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2014>.
- [11] Český statistický úřad. *Produkce, využití a odstranění odpadů – 2018* [online]. 31/10/2019 [cit. 3/3/2020]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>.
- [12] MALAŤÁK, J.; VACULÍK, P.: *Zpracování biologicky rozložitelného odpadu*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1747-5.

- [13] *Fáze kompostování*. In: *Kompostarna.info* [online]. 29/9/2014 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.kompostarna.info/faze-kompostovani/>.
- [14] MUSILOVÁ, Š.: *Mikrobiologie (2. část)*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2018. ISBN 978-80-213-2883-9.
- [15] *Growth Requirements for Microorganisms* [online]. CliffsNotes: © 2020 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.cliffsnotes.com/study-guides/biology/microbiology/microbial-cultivation-and-growth/growth-requirements-for-microorganisms/>.
- [16] *Co se děje v kompostu* [online]. Kompostuj: © 2018 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.kompostuj.cz/vime-jak/jak-vyrabet-kompost/co-se-deje-v-kompostu/>.
- [17] *Základní pravidla kompostování* [online]. Kompostuj: © 2018 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.kompostuj.cz/vime-jak/jak-vyrabet-kompost/zakladni-pravidla-kompostovani/>.
- [18] ČSN 46 5735. *Průmyslové komposty*. Praha, Český normalizační institut, 1991.
- [19] DROBEC R.: *Zpracování odpadů kompostováním*. Ostrava, 2014. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Hornicko – geologická fakulta.
- [20] ČERVENÁ, K.; LYČKOVÁ, B.; KUČEROVÁ, L.; BOUCHALOVÁ, M.; BARABÁŠOVÁ, T.: *Biologické metody zpracování odpadu: Kompostování – fáze procesu kompostování* [online učební text]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/bmzo/pages/Faze_procesu_kompostovani.html.
- [21] MACH, P.: *Kompostování. Technika pro zpracování odpadů - technika pro bioenergetické transformace organických odpadů*. [online prezentace] 2014, [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/9224210-Kompostovani-technika-pro-zpracovani-odpadu-technika-pro-bioenergeticke-transformace-organickyh-odpadu.html>.
- [22] MISRA, R. V.; ROY, R. N.: *On-farm Composting Methods* [online]. FAO, Řím, 2002, [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: http://www.fao.org/organicag/doc/on_farm_comp_methods.pdf.
- [23] *AgBag Composting* [online]. AgBag Systems Ltd.: © 2015 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.agbag.co.uk/services/composting/>.
- [24] PLÍVA, P.: *Kompostování ve vaku – I*. In: *Komunalweb.cz* [online]. 3/6/2011 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.komunalweb.cz/kompostovani-ve-vaku-i/>.

- [25] *Kompostujeme na sídlišti* [online]. Kompostuj: © 2018 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.kompostuj.cz/vime-jak/kompostujeme-na-sidlisti/>.
- [26] *Pražské služby a.s. Svoz bioodpadu* [online]. PSAS: © 2019 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.psas.cz/svoz-bioodpadu/>.
- [27] *Samosprávy přesedlávají na kompostování gastroodpadů* [online]. JRK: © 2019, poslední aktualizace 13/4/2017 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.meneodpadu.cz/samospravy-predlavaji-kompostovani-gastroodpadu/>.
- [28] MILLER, S.: *Electric Composters: What Are They and How Do They Work?* In: *Nofoodwaste.com* [online]. 15/5/2019 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.nofoodwaste.com/blogs/the-foodcycler-blog/electric-composters-what-you-need-to-know-in-2019>.
- [29] *Elektrický kompostér Greengood. Praktické informace pro každodenní využití* [online]. JRK: © 2019 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.meneodpadu.cz/wp-content/uploads/2017/08/greengood-prakticke-dotazy.pdf>.
- [30] LUDVÍK, P.: *Praktické zkušenosti jídelen s elektrickými kompostéry*. In: *Jidelny.cz* [online]. 12/6/2019 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.jidelny.cz/show.aspx?id=1972>.
- [31] *Bokashi: All You Need to Know*. In: *Planetnatural.com* [online]. [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.planetnatural.com/composting-101/indoor-composting/bokashi-composting/>.
- [32] *Bokashi (horticulture)* [online]. Wikipedie, poslední aktualizace 15/2/2020 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bokashi_\(horticulture\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bokashi_(horticulture)).
- [33] TOMÁŠKOVÁ, H.: *Nemáte místo pro kompost a v bytě vám žížaly vadí? Zkuste kompostování s pomocí Bokashi bakterií!* In: *Prumyslovaekologie.cz* [online]. 20/3/2019 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/nemate-misto-pro-kompost-a-v-byte-vam-zizaly-vadi-zkuste-kompostovani-s-pomoci-bokashi-bakterii->.
- [34] *Bokashi FAQ* [online]. Earth Probiotic, JAR, [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: https://www.earthprobiotic.co.za/FAQ_Bokashi/.
- [35] FOOTER, A.: *Bokashi Composting: Scraps to Soil in Weeks*. Gabriola, Kanada, 2014. ISBN 978-0-86571-752-7.
- [36] FILIP, J.; ORAL, J.: *Odpadové hospodářství*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2003. ISBN 80-7157-608-5.

- [37] ČERVENÁ, K.; LYČKOVÁ, B.; KUČEROVÁ, L.; BOUCHALOVÁ, M.; BARABÁŠOVÁ, T.: *Biologické metody zpracování odpadu: Vermikompostování* [online učební text]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/bmzo/pages/Vermikompostovani.html>.
- [38] *Vermikompostování* [online]. Kompostuj: © 2018 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.kompostuj.cz/vime-jak/vermikompostovani/>.
- [39] *Vermicompost Business Information* [online]. Kisancentral: © 2020 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.kisancentral.com/vermicompost-business-information>.
- [40] STRAKA, F.; a kol.: *Bioplyn*. GAS s.r.o., 2. rozšířené a doplněné vydání. Praha, 2006. ISBN 80-7328-090-6.
- [41] PASTOREK, Z.; KÁRA, J.; JEVIČ, P.: *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. FCC Public, Praha, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [42] ŠVEHLA, P.; TLUSTOŠ, P.; BALÍK, J.: *Odpadní vody*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2007. ISBN 978-80-213-1716-1.
- [43] BOND, T.; TEMPLETON, M. R.: History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development* 15. 2011, s. 347 – 354. ISSN 0973-0826.
- [44] MORAVEC, A.: *Od prasečího perpetuum mobile k bioplynové stanici*. In: *Biom.cz* [online] 12/5/2014. Poslední aktualizace 14/5/2014 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/od-praseciho-perpetuum-mobile-k-bioplynovove-velmoci>. ISSN 1801-2655.
- [45] *Česká bioplynová asociace* [online]. CZBA: © 2020 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.czba.cz>.
- [46] KURAŠ, M.: *Odpady a jejich zpracování*. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s.r.o., vydání 1. Chrudim, 2014. ISBN 978-80-86832-80-7.
- [47] TABATABAEI, M.; a kol.: Prominent Parameters in Biogas Production Systems. In: *Biofuel and Refinery Technologies Volume 6 – Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*. Springer International Publishing. Chum, Švýcarsko, 2018, s. 135 – 161. ISBN 978-3-319-77334-6.
- [48] VALIJANIAN, E.; TABATABAEI, M.; a kol.: Biogas Production Systems. In: *Biofuel and Refinery Technologies Volume 6 – Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*. Springer International Publishing. Chum, Švýcarsko, 2018, s. 95 – 116. ISBN 978-3-319-77334-6.

- [49] KORZ, D. J.: Biogas Production: Mechanical and Thermal Pre-Treatment Technologies. In: TABATABAEI, M.: *Biofuel and Refinery Technologies Volume 6 – Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*. Springer International Publishing. Chum, Švýcarsko, 2018, s. 95 – 116. ISBN 978-3-319-77334-6.
- [50] POKORNÁ, D.: *Typy anaerobních fermentorů* [prezentace online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019, [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~pokornd/Bioplyn/6.%20přednáška/typy%20fermentorů.pdf>.
- [51] BUDÍN, O.: *Nakládání s odpady z bioplynových stanic*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [52] VÁŇA, J.: *Využití digestátů jako organického hnojiva*. In: *Biom.cz* [online] 25/4/2007. Poslední aktualizace 11/5/2007 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-digestatu-jako-organickeho-hnojiva>.
- [53] JEŘÁBKOVÁ, J.; DUFFKOVÁ, R.: *Využití digestátu jako hnojiva*. In: *Biom.cz* [online] 21/6/2019. Poslední aktualizace 7/2/2020 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-digestatu-jako-hnojiva>.
- [54] CZ Biom: *Nakládání s digestátem, možnost využití jako kvalitní hnojivo*. In *Biom.cz* [online] 11/9/2015. Poslední aktualizace 12/9/2018 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-digestatem-moznost-vyuziti-jako-kvalitni-hnojivo>
- [55] ROSARIO, M. R.; a kol.: Biogas Purification and Upgrading Technologies. In: TABATABAEI, M.: *Biofuel and Refinery Technologies Volume 6 – Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*. Springer International Publishing. Chum, Švýcarsko, 2018, s. 239 – 276. ISBN 978-3-319-77334-6.
- [56] U.S. Department of Energy Hydrogen Program: *Hydrogen Fuel cells* [online]. DOE, 11/2006 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/files/doe_fuelcell_factsheet.pdf.
- [57] *Výroba vodíku parním reformováním* [online]. Petroleum: © 2020 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>.
- [58] ROSTRUP-NIELSEN, J. R.; ROSTRUP-NIELSEN T.: Large-scale Hydrogen Production [online]. *CATTECH* 6, 2002, s. 150 – 159. Dostupné z: http://www.topsoe.com/sites/default/files/topsoe_large_scale_hydrogen_produc.pdf.

- [59] SCHROEDER, D.: Energy, Entrophy, and Everything: Chapter 4 [online učební text]. Weber State University – Department of Physics, Ogden, Utah, 2003 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://physics.weber.edu/schroeder/eee/chapter4.pdf>.
- [60] *Fuel Cell Benefits* [online]. FuellCellToday, 2020, [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/benefits>.
- [61] TIAN, H.; DUAN, N.; LIN, C.; LI, X.; ZHONG, M.: Anaerobic co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios. *Journal of Bioscience and Bioengineering Volume 120*. 2015, s. 51 – 57. ISSN 1389-1723.
- [62] ZHANG, L.; GUO, B.; ZHANG, Q.; FIORENTINO, A.; XU, R.; ZHANG, Y.; LIU, Y.: Co-digestion of blackwater with kitchen organic waste: Effects of mixing ratios and insights into microbial community. *Journal of Cleaner Production* 236. 2019, 117703. ISSN 0959-6526.
- [63] MEHARIYA, S.; PATEL, A. K.; OBULISAMY, P. B.; PUNNIYAKOTTI, E.; WONG, J. W. C.: Co-digestion of food waste and sewage sludge for methane production: Current status and perspective. *Bioresource Technology* 265. 2018, s. 519 – 531. ISSN 0960-8524.
- [64] HAN, W.; ZHAO, Y.; CHEN, H.: Study on Biogas Production of Joint Anaerobic Digestion with Excess Sludge and Kitchen Waste. *Procedia Environmental Sciences* 35. 2016, s. 756-762. ISSN 1878-0296.
- [65] AUMBREEN, T.; ZULFIQAR, A.; TARIQ, M.; AZEEM, K.; SAMIA, Q.; SHADID, M.; SHAISTA, A.; MUZAMMIL, A.: Anaerobic co-digestion of catering food waste utilizing *Parthenium hysterophorus* as co-substrate for biogas production. *Biomass and Bioenergy* 124. 2019, s. 74 – 82. ISSN 0961-9534.
- [66] FUQING, X.; YANGYANG, L.; XUMENG, G.; LIANGCHENG, Y.; YEBO, L.: Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities. *Bioresource Technology* 247. 2018, s. 1047 – 1058. ISSN 0960-8524.
- [67] Český statistický úřad. *Vývoj stavů hospodářských zvířat v letech 1990 až 2019 – ČR* [online]. 13/5/2019 [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/91232923/2701421901.pdf/743e3cf5-ef9a-41fa-8515-bb8175db11be?version=1.2>.
- [68] NORDIN, A.; POMMER, L.; NORDWAEGER, M.; OLOFSSON, I.: Biomass conversion through torrefaction. In: DAHLQUIST, E.: *Sustainable Energy Developments Volume 4 – Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. CRC Press, Leiden, Nizozemsko, 2013, s. 217 – 244. ISBN 978-0-415-62088-8.

- [69] BASU, P.: *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. 2nd Edition, Elsevier Inc., 2013. ISBN 987-0-12-396488-5.
- [70] POUDEL, J.; OHM, T.; OH, S. C.: A study on torrefaction of food waste. *Fuel* 140. 2015, s. 275-281. ISSN 0016-2361
- [71] HORÁK, M.: *Pyrolýza* [online] [cit. 4/3/2020]. Dostupné z: <http://www.udrzitelnost.cz/soubory/pyrolyza.pdf>.
- [72] KANTARELIS, E.; YANG, W.; BLASIAK W.: Biomass pyrolysis for energy and fuels production. In: DAHLQUIST, E.: *Sustainable Energy Developments Volume 4 – Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. CRC Press, Leiden, Nizozemsko, 2013, s. 245 – 277. ISBN 978-0-415-62088-8.
- [73] RAWAT, J.; SAXENA, J.; SANWAL, P.: Biochar: A Sustainable Approach for Improving Plant Growth and Soil Properties. In: *Biochar – An Imperative Amendment for Soil and the Environment*. [online] InTechOpen, 2019, [cit. 5/3/2020]. Dostupné z: [DOI: 10.5772/intechopen.82151](https://doi.org/10.5772/intechopen.82151).
- [74] BLACKWELL, P.; RIETHMULLER, G.; COLLINS, M.: Biochar Application to Soil. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S.: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, 2009, s. 207 – 226. ISBN 978-1-84407-658-1.
- [75] ENGVALL, K.; LILIEDAHL, T.; DAHLQUIST, E.: Biomass and black liquor gasification. In: *Sustainable Energy Developments Volume 4 – Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. CRC Press, Leiden, Nizozemsko, 2013, s. 175 – 216. ISBN 978-0-415-62088-8.
- [76] LIBRA, J.; a kol.: Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels Volume 2*. 2011, s. 89 – 124. ISSN 1759-7269
- [77] FELGENTRÄGEROVÁ K.: *Hydrotermální rozklad bioodpadu*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.
- [78] TENGFEI, W.; a kol.: Co-hydrothermal carbonization of food waste-woody biomass blend towards biofuel pellets production. *Bioresource Technology* 267. 2018, s. 371 – 377. ISSN 0960-8524
- [79] TRADLER, S. B.; a kol.: Hydrothermal carbonization as an all-inclusive process for food-waste conversion. *Bioresource Technology Reports* 2. 2018, s. 77 – 83. ISSN 2589-014X

- [80] CHUPENG, Z.; XIAOQIAN, M.; ZHONGLIANG, Y.; XINFEI, C.: The properties and combustion behaviors of hydrochars derived from co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and food waste. *Bioresource Technology* 285. 2019, 121347. ISSN 0960-8524
- [81] HABART, J.: *Komposty – významný článek využití odpadů a zajištění půdní úrodnosti*. Racionální použití hnojiv – sborník z konference. ISBN 978-80-213-2006-2
- [82] Vyhláška 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 a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady)
- [83] VEČEŘOVÁ, V.: *Legislativní podmínky uvádění kompostu na trh*. In: *Kompostuj.cz* [online]. Dostupné z: http://www.kompostuj.cz/fileadmin/1_Bioodpad_a_kompostovani/Vime_jak/legislativni_podminky_uvadeni_kompostu_na_trh.pdf.
- [84] DINČA, M.; a kol.: *International symposium recovery of organic waste through composting process*. In: *ResearchGate.net* [online] 11/2017, [cit. 5/3/2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321276372_INTERNATIONAL_SYMPIUM_RECOVERY_OF_ORGANIC_WASTE_THROUGH_COMPOSTING_PROCESS_VALORIFICAREA_PRIN_COMPOSTARE_A_REZIDUURILOR_ORGANICE.
- [85] HANČ, A; PLÍVA, P.: *Vermikompostování bioodpadů: Certifikovaná metodika*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2013. ISBN 978-80-213-2422-0
- [86] SOUČEK, S.: *Kogenerační jednotky Micro*. [online prezentace] Tedom a.s., 2013, [cit. 6/3/2020]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2684576/>.
- [87] *Elektronická učebnice – Elektrochemie: Standardní redoxní potenciály kovů a galvanické články*. [online] ELUC, [cit. 6/3/2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2282>.
- [88] HONUS, S.: *Nekonvenční způsoby výroby tepelné a elektrické energie*. [online prezentace] VŠB-TUO, [cit. 6/3/2020]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/07_Elektroenergetika_18-20/19_MMP/171_Nekonvenční_způsoby_vyroby_energie---Honus.pdf

- [89] Ministerstvo zemědělství České republiky: *Vyhláška 299/2003 Sb. o opatřeních pro předcházení a zdolávání nález a nemocí přenosných ze zvířat na člověka*, 2003. Sbírka vyhlášek, ročník 2003, částka č. 102.
- [90] Ministerstvo zemědělství České republiky: *Vyhláška č. 389/2004 Sb. o opatřeních pro tlumení slintavky a kulhavky a k jejímu předcházení a o změně vyhlášky č. 299/2003 Sb., o opatřeních pro předcházení a zdolávání nález a nemocí přenosných ze zvířat na člověka, ve znění vyhlášky č. 356/2004 Sb.*, 2004. Sbírka vyhlášek, ročník 2004, částka č. 128.
- [91] Zákon č. 541/2020 Sb. *o odpadech*. Sbírka zákonů, ročník 2020, částka číslo 222
- [92] Nařízení vlády č. 352/2014 Sb. *o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024*. Ročník 2014, částka č. 141.
- [93] PLÍVA, P.: Inovativní hygienizační kontejner CSC pro samosprávy a kompostárny. *Odpady*. 2017, 8, s. 23 – 24. ISSN 1210-4922.
- [94] Nařízení Komise Evropské unie č. 142/2011
- [95] ELKHALIFA, S.; AL-ANSARI, T.; MACKAY, H. R.; MCKAY, G.: Food waste to biochars through pyrolysis: A review. *Resources, Conservation and Recycling Volume 144*. 2019, s. 310 – 320. ISSN 0921-3449.
- [96] FIORI, L.; BASSO, D.; CASTELLO, D.; BARATIEN, M.: Hydrothermal Carbonization of Biomass: Design of a Batch Reactor and Preliminary Experimental Results. *Chemical Engineering Transactions Volume 37*. 2014, s. 55 – 60. ISSN 2283-9216
- [97] GÓMEZ, J.; CORSI, G.; PINO-CORTÉS, E.; DÍAZ-ROBLES, L. A.; CAMPOS, V.; CUBILLOS, F.; PELZ, S. K.; PACZKOWSKI, S.; CARRASCO, S.; SILVA, J.; LAPUERTA, M.; PAZO, A.; MONEDERO, E.: Modeling and simulation of a continuous biomass hydrothermal carbonization process, *Chemical Engineering Communications 207/6*. 2020, s. 751-768. ISSN 0098-6445
- [98] HOEKMAN, S.; BROCH, A.; ROBBINS, C.: Hydrothermal Carbonization (HTC) of Lignocellulosic Biomass. *Energy & Fuels* 25. 2011, s. 1802 – 1810. ISSN 1520-5029
- [99] SHARMA, H. B.; SARMAH, A. K.; DUBEY, B.: Hydrothermal carbonization of renewable waste biomass for solid biofuel production: A discussion on process mechanism, the influence of process parameters, environmental performance and fuel properties of hydrochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 123*. 2020, 109761, ISSN 1364-0321

- [100] BACH, Q.; TRAN, K.; KHALIL, R. A.; SKREIBERG, Ø.; SEISENBAEVA, G.: Comparative Assessment of Wet Torrefactio. *Energy & Fuels* 27. 2013, s. 6743 – 6753.
- [101] KADLIMATI, H. M.; MOHAN, B. R.; SAIDUTTA, M. B.: Bio-oil from microwave assisted pyrolysis of food waste – optimization using response surface methodology. *Biomass and Bioenergy, Volume 123*. 2019 ,s. 25-33. ISSN 0961-9534
- [102] LIU, J.; HUANG, S.; CHEN, K.; WANG, T.; MEI, M. LI, J.: Preparation of biochar from food waste digestate: Pyrolysis behavior and product properties. *Bioresource Technology, Volume 302*. 2020, 122841, ISSN 0960-8524
- [103] ROBBIANI, Z.: *Conception and construction of a HTC prototype research unit for developing countries*. Curych, 2013. Diplomová práce. Švýcarský federální technologický institut v Curychu. Fakulta mechanického inženýrství.
- [104] *Grenol GmbH* [online]. Grenol: © 2020 [cit. 18/12/2020]. Dostupné z <https://www.grenol.org>
- [105] TRADLER, S. B.; SIEGFRIED, M.; HIMMELSBACH, M.; PRIEWASSER, R.; BAUMGARTNER, W.; STADLER, A. T.: Hydrothermal carbonization as an all-inclusive process for food-waste conversion. *Bioresource Technology Reports, Volume 2*. 2018, s. 77 – 83, ISSN 2589-014X
- [106] AHMED, I. I.; GUPTA, A. K.: Pyrolysis and gasification of food waste: Syngas characteristics and char gasification kinetics, *Applied Energy Volume 87*. 2010, s. 101 – 108, ISSN 0306-2619
- [107] YANG, Z.; KOH, S. K.; NG, W. C.; LIM, R. C. J.; TAN, H. T. W.; TONG, Y. W. DAI, Y.; CHONG, C.; WANG, C.: Potential application of gasification to recycle food waste and rehabilitate acidic soil from secondary forests on degraded land in Southeast Asia. *Journal of Environmental Management, Volume 172*. 2016, s. 40 – 48, ISSN 0301-4797
- [108] LIN, J.; MA, R.; LUO, J.; SUN, S.; CUI, C.; FANG, L.; HUANG, G.: Microwave pyrolysis of food waste for high-quality syngas production: Positive effects of a CO₂ reaction atmosphere and insights into the intrinsic reaction mechanisms. *Energy Conversion and Management, Volume 206*. 2020, 112490, ISSN 0196-8904
- [109] SINGH, D.; YADAV, S.: Steam gasification with torrefaction as pretreatment to enhance syngas production from mixed food waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 9, Issue 1*. 2021, 104722, ISSN 2213-3437

- [110] NAGY, G.; DOBÓ, Z.: Experimental investigation of fixed-bed pyrolysis and steam gasification of food waste blended with woody biomass. *Biomass and Bioenergy*, Volume 139. 2020, 105580, ISSN 0961-9534
- [111] SU, H.; KANCHANATIP, E.; WANG, D.; ZHENG, R.; HUANG, Z.; CHENM Y.; MUBEEN, I. YAN, M.: Production of H₂-rich syngas from gasification of unsorted food waste in supercritical water. *Waste Management*, Volume 102. 2020, s. 520-527, ISSN 0956-053X
- [112] SU, W.; CAI, CH.; LIU, P.; LIN, W.; LIANG, B.; ZHANG, H.; MA, Z.; MA, H.; XING, Y.; LIU, W.: Supercritical water gasification of food waste: Effect of parameters on hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 29. 2020, s. 14744-14755, ISSN 0360-3199
- [113] NARYANTO, R.; ENOMOTO, H.; CONG, A.; FUKADU, K.; ZONG, Z.; KARTIKA, D.; MERA, CH.; CHUNTI, CH.; NODA, R.: The Effect of Moisture Content on the Tar Characteristic of Wood Pellet Feedstock in a Downdraft Gasifier. *Applied Sciences* 10. 2020, 2760
- [114] MALAŤÁK, J.; VACULÍK, P.: *Biomasa pro výrobu energie*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6
- [115] KRZYŻANOWSKI, F. C.; WEST, S. H.; FRANÇA, N.; BARROS, J.: Drying peanut seed using air ambient temperature at low relative humidity. *Revista Brasileira de Sementes*, vol. 28 no. 3. 2006, ISSN 0101-3122
- [116] KROSOFSKY, A.: *Can You Put Moldy Food in Compost?* In: *Greenmatters* [online] 9/11/2020. Poslední aktualizace 10/5/2021 [cit. 10/5/2021]. Dostupné z: <https://www.greenmatters.com/p/can-you-compost-moldy-food>
- [117] NOVÁK, J.: *Výhřevnosti paliv*. In: *tzbinfo* [online] Topinfo s.r.o.: ©2021. [cit. 10/5/2021]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [118] HU, X.; GUO, H.; GHOLIZADEH, M.; SATTARI, B.; LIU, Q.: Pyrolysis of different wood species: Impacts of C/H ratio in feedstock on distribution of pyrolysis products. *Biomass and Bioenergy*, Volume 120. 2019, s. 28-39, ISSN 0961-9534
- [119] GORZELANY, J.; MATŁOK, N.: Investigation of Mechanical Properties and Chemical Composition of Root Vegetables on the Example of Carrot Roots. *American Research Journal of Agriculture*, Volume 2016. 2016, ISSN 2378-9018

- [120] KABENGE, I.; OMULO, G.; BANADDA, N.; SEAY, J.; ZZIWA, A.; KIGGUNDU, N.: Characterization of Banana Peels Wastes as Potential Slow Pyrolysis Feedstock. *Journal of Sustainable Development*, Vol. 11, No. 2. 2018, ISSN: 1913-9071
- [121] SETHUPATHY, B.; MURUGAN, D. K.; DEENADAYALAN, D.; DHAMODHARAN, M. I.: Gasification of Biomass Using Fluidized Bed. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 3, Issue 2. 2014,ISSN: 2317-8753
- [122] PEREA-MORENO, M.; MANZANO-AGUGLIARO, F.; QUETZALCOATL, H.; PEREA-MORENO, A.: Peanut Shell for Energy: Properties and Its Potential to Respect the Environment. *Sustainability* 2018 10, No. 9, 3254. ISSN: 2071-1050
- [123] BananaLink. *All About Bananas And Why Bananas Matter...* [online]. BananaLink: ©2021 [cit. 10/5/2021]. Dostupné z: <https://www.bananalink.org.uk/all-about-bananas/>
- [124] Alimentarium. *Carrot*. [online]. Alimentarium: ©2021 [cit. 10/5/2021]. Dostupné z: <https://www.alimentarium.org/en/knowledge/carrot>
- [125] Statista. *Consumption of tree nuts worldwide in 2018*. [online]. Statista: ©2021 [cit. 10/5/2021]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/1030815/tree-nut-global-consumption-by-type/>
- [126] SKRZYPIEC, M.: *Do peanuts Go Bad?* In: *Doesitgobad* [online] Doesitgobad.com: ©2021 [cit. 10/5/2021]. Dostupné z: <https://www.doesitgobad.com/do-peanuts-go-bad>