

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Diplomová práce

**Návrh využití gastroodpadů v malých fermentačních
reaktorech**

Adam Bureš

© 2022 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Adam Bureš

Procesní inženýrství
Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

Návrh využití gastroodpadů v malých fermentačních reaktorech

Název anglicky

The proposal for the use of gastro-waste in small fermentation reactors

Cíle práce

Cílem diplomové práce je návrh technologie na využití gastroodpadů v malých fermentačních reaktorech. Seznámit se s problematikou zpracování gastroodpadů a výroby bioplynu a na základě rozboru současného stavu vybrané technologické linky navrhnout technologii se zaměřením na posouzení nákladů na investice, předpokládané úspory (např. energie, práce) a dodržení potřebných provozních parametrů. Na základě poznatků z literatury, vlastní analýzy a měření, provést rozbor jednotlivých možností a navrhnout a doporučit vhodná opatření a řešení pro praktickou aplikaci, která budou posouzena z hlediska technického a ekonomického.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Současný stav sledované problematiky
5. Vlastní řešení
6. Výsledky a diskuse
7. Závěr a doporučení
8. Seznam použitých zdrojů
9. Přílohy

Doporučený rozsah práce

45 až 55 stran

Klíčová slova

Odpadové hospodářství, gastroodpad, bioplyn, anaerobní digesce

Doporučené zdroje informací

BRANDEJSOVÁ, E. – PŘIBYLA, Z.: Bioplynové stanice: zásady zřízení a provozu plynového hospodářství.

Praha, GAS, 2009, 118 s., ISBN 978-80-7328-192-2

CENEK, M. et al.: Obnovitelné zdroje energie. FCC PUBLIC, Praha 2001, 208 s., ISBN 80-901985-8-9

PASTOREK, Z. – KÁRA, J. – JEVIČ, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie. FCC PUBLIC, Praha 2004, 286 s.,

ISBN 80-86534-06-5

Příslušné zákony, nařízení vlády, vyhlášky, ČSN, oborové předpisy a odborné časopisy

STRAKA, F. et al.: Bioplyn. GAS s.r.o., Říčany 2003, 517 s., ISBN 80-7328-029-9

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

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Vaculík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 20. 12. 2021

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 14. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

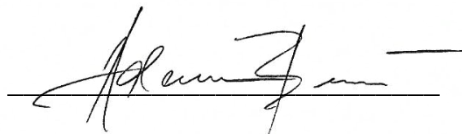
Děkan

V Praze dne 14. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "**Návrh využití gastroodpadů v malých fermentačních reaktorech**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28.3.2022

Handwritten signature of Adam Zeman, consisting of a stylized cursive script above a horizontal line.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D., za veškeré rady a připomínky a směřování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům katedry Technologických zařízení staveb za pomoc s měřením, cenné rady a diskuzi, nejenom ke zpracování diplomové práce, ale i k celému studiu. Poděkování také patří laborantům VÚZT v Praze Ruzyni za provedené měření. V neposlední řadě bych rád závěrem mého studia na TF ČZU poděkoval všem vyučujícím, díky kterým mi toto studium přineslo široký technický rozhled, který mi umožnil lepší orientaci nejenom v odborném prostředí, ale i v každodenním životě. Závěrem mé poděkování míří celé mé rodině, která mě po celé studium podporovala v té nejlepší víře a pro kterou je i tato práce věnována.

Návrh využití gastroodpadů v malých fermentačních reaktorech

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je analýza současné situace v oblasti energetického využití kuchyňských odpadů pomocí technologie anaerobní digesce a přiblížení potřebných požadavků pro aplikaci této technologie přímo v restauračních provozech, včetně návržení hlavních komponentů a hrubého ekonomického zhodnocení projektu v takovém rozsahu. V první části práce je zanalyzována současná situace v dané problematice pomocí literární, datové a legislativní rešerše. Následuje část s popisem odebraných vzorků a provedených měření, včetně zobrazení a popsání výsledků dílčích měření. Na základě výsledků měření je dále proveden návrh hlavních komponentů technologie a jejich výběr. Na tuto část navazuje hrubé ekonomické posouzení vybrané technologie pro přibližnou představu návratnosti projektu. Poslední část obsahuje závěr včetně diskuze nad získanými výsledky a možnostmi realizace této a podobných technologií.

Klíčová slova: anaerobní digesce, bioplyn, kuchyňské odpady, fermentor, kogenerace, energetika, biomasa, energetická soběstačnost, restaurace, úspora, udržitelnost

The proposal for the use of gastro-waste in small fermentation reactors

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to analyze the current situation in the field of energy recovery of food waste using anaerobic digestion technology and approach the necessary requirements for the application of this technology directly in restaurants, including the design of major components and rough economic evaluation of the project to such an extent. The first part of the thesis analyzes the current situation in the issue using literary, data and legislative research. The following section describes the samples taken and the measurements performed, including the display and description of the results of partial measurements. Based on the measurement results, the design of the main components of the technology and their selection is also performed. This part is followed by a rough economic assessment of the selected technology for a rough idea of the return on the project. The last part contains a conclusion, including a discussion of the results obtained and the possibilities of implementing this and similar technologies.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, food waste, digester, CHP, energetics, biomass, energy self-sufficiency, restaurant, savings, sustainability

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce	2
3 Metodika.....	3
4 Současný stav sledované problematiky	4
4.1 Základní definice a pojmy v oblasti výroby bioplynu	4
4.2 Právní předpisy v oblasti výroby bioplynu.....	5
4.3 Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven.....	7
4.3.1 Způsoby nakládání s BROKS	7
4.3.1.1 Kompostování	8
4.3.1.2 Anaerobní digesce	9
4.3.1.3 Hydrotermální karbonizace	10
4.3.2 Analýza současné situace nakládání s BROKS	11
4.2 Anaerobní digesce	13
4.2.1 Princip anaerobní digesce	13
4.2.1.1 Surovinová vsádka	14
4.2.1.2 Charakteristika bioplynu	15
4.2.1.3 Typy anaerobní digesce.....	17
4.2.1.4 Čištění bioplynu	18
4.2.1.5 Kogenerace bioplynu.....	21
4.2.1.6 Digestát.....	22
5 Vlastní řešení.....	23
5.1 Profil hodnocené společnosti a navrhované technologie.....	23
5.1.1 Popis zpracovávaných odpadů	23
5.1.2 Popis navrhované technologie	23
5.1.2.1 Popis jednotlivých technických zařízení technologie	24
5.2 Vlastní měření a návrh technologie	26
5.2.1 Vlastní měření a výsledky.....	29
5.2.2 Návrh technologie	40
5.2.2.1 Užitečný objem reaktoru.....	41

5.2.2.2 Spotřeba tepelné energie	43
5.2.2.3 Spotřeba elektrické energie	48
5.2.2.4 Výběr kogenerační jednotky	48
5.3 Technický popis činnosti zařízení	53
5.4 Ekonomické posouzení návrhu.....	54
5.4.1 Investiční náklady	54
5.4.2 Provozní náklady	55
5.4.3 Úspory.....	56
5.4.4 Výnosy	57
5.4.5 Návratnost	58
6 Závěr a diskuze.....	61
7 Seznam použitých zdrojů.....	63
7.1 Seznam použité literatury	63
7.2 Seznam použitých obrázků.....	69
7.3 Seznam použitých tabulek	70
8 Přílohy	I
8.1 Příloha – tabulka p.1	I
8.2 Příloha – tabulka p.2.....	II
8.3 Příloha – tabulka p.3.....	III
8.4 Příloha – tabulka p.4.....	IV
8.5 Příloha – tabulka p.5	V

Seznam použitých zkratk

AD – anaerobní digesce

bioCNG - biological compressed natural gas (biologický zemní plyn)

BRO – biologicky rozložitelný odpad

BROKS - biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven

BPS - bioplynová stanice

ČR – Česká republika

ČSÚ – Český statistický úřad

ČZU - Česká zemědělská univerzita

ERÚ - Energetický regulační úřad

HTC - hydrotermální karbonizace

KGJ - kogenerační jednotka

KO – komunální odpad

NPO - Národní plán obnovy

ppmv - parts per million volume

TF - Technická fakulta

VÚZT – Výzkumný ústav zemědělské techniky

1 Úvod

Tato diplomová práce analyzuje potenciál k energetickému využití biologicky rozložitelného odpadu z kuchyní a stravoven, v českém právním řádu označovaným kódem 20 01 08, patřícího mezi komunální odpady. Následným cílem je navrhnout ekonomicky proveditelnou technickou realizaci pro jeho zužitkování, a to přímo v provozovnách stravovacích a restauračních zařízení.

Podle dostupných dat ČSÚ je produkce BRO z kuchyní a stravoven za roky 2017, 2018 a 2019 (v době psaní této práce nebyla ještě data pro rok 2020 zveřejněna) poměrně stálá a nepřevyšuje 40 tis. tun za rok (i když tento údaj vzhledem k povaze odpadu nemusí být zcela přesný (viz kapitola 4.3.2) a celková produkce bude zřejmě vyšší). Dalo by se tedy říci, že z celkového množství vyprodukovaného odpadu v ČR tvoří zhruba 1 promile. To by však nemělo odradit od jeho lepšího zpracování a využívání, jelikož v této oblasti se ČR příliš nedaří a ČSÚ uvádí, že pouhých 52 % komunálního odpadu bylo v roce 2019 nějakým způsobem využito, zbytek byl povětšinou skládkován. A pokud toto číslo porovnáme s minulými léty, tak nelze vidět žádný výrazný trend ve využívání KO, ale spíše jen stagnaci kolem hodnoty 50 % [1].

Tato diplomová práce se bude zaměřovat konkrétně na využití BRO z kuchyní a stravoven pomocí anaerobní digesce a následného energetického zužitkování vzniklého bioplynu. Práce bude počítat s novou technologickou metodou, a to s energetickým zužitkováním přímo v místě produkce odpadu. Pomocí této metody by tak došlo kromě snížení celkové produkce odpadu i k snížení emisí z přepravy odpadu na místo dalšího zpracování. Největší výhodou této metody spočívá v ekologickém využitím BRO z kuchyní a stravoven, při kterém vzniká elektrická energie a teplo. Tato technologie by mohla vést k mnohem větší soběstačnosti provozoven restauračních zařízení.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je návrh technologie na využití kuchyňských odpadů v malých fermentačních reaktorech. Seznámit se s problematikou zpracování kuchyňských a biologicky rozložitelných odpadů a výroby bioplynu a na základě rozboru současného stavu vybraného provozu navrhnout technologii se zaměřením na posouzení nákladů na investice, předpokládané úspory (např. energie, práce) a dodržení potřebných provozních parametrů.

Na základě poznatků z literatury, vlastní analýzy a měření, provést rozbor jednotlivých možností a navrhnout a doporučit vhodná opatření a řešení pro praktickou aplikaci, která budou posouzena z hlediska technického a ekonomického.

3 Metodika

Tato diplomová práce si bere za úkol zanalyzování a navržení možnosti energetického využití kuchyňských odpadů v provozech restauračních zařízení s primárním cílem energetické soběstačnosti těchto podniků, s kterou je spojena úspora nákladů, ale i ekologická stránka.

V první části diplomové práce bude provedena teoretická analýza současné situace, ve které bude přiblížena charakteristika kuchyňského odpadu a jeho produkce na území České republiky. Zároveň budou popsány možnosti nakládání a využití tohoto odpadu včetně stručného výčtu právních norem, které se touto tematikou zabírají.

V další části diplomové práce bude popsána navrhovaná technologie, která by byla pro dané použití vhodná.

Na tuto část navazuje část vlastního měření, ve které budou popsány jednotlivé metody měření vzorků, které byly použity a následně prezentovány. Dílčí výsledky jednotlivých měření budou okomentovány.

Na základě výsledků měření bude proveden návrh technologie energetického využití kuchyňských odpadů a výběr hlavních komponentů. Činnost zařízení bude zobrazena na jednoduchém schématu a bude popsána činnost jednotlivých technologických zařízení.

Následně bude provedena ekonomická kalkulace investičních, provozních a dalších nákladů, která bude porovnána s úsporami a výnosy, které tato technologie přinese. Ekonomické vyhodnocení bude vyjádřeno pomocí doby návratnosti investice.

V samotném závěru budou slovně shrnuty veškeré dílčí závěry měření, technologického návrhu i ekonomické kalkulace a bude zhodnocena vhodnost použití této technologie, včetně uchopení tohoto a podobných technologických řešení v blízké budoucnosti s ohledem na socio-ekonomické podmínky v českém a globálním prostředí.

4 Současný stav sledované problematiky

4.1 Základní definice a pojmy v oblasti výroby bioplynu

Bioplyn je plyn s energetickým potenciálem 6 - 6,5 kWh·m⁻³, který obsahuje metan. Vznik metanu je biologický proces, ke kterému dochází přirozeně, když se organický materiál (biomasa) rozkládá ve vlhké atmosféře bez přístupu vzduchu, ale za přítomnosti skupiny přírodních mikroorganismů, které jsou metabolicky aktivní, tedy metanových bakterií. V přírodě se metan tvoří jako bahenní plyn, v trávicím traktu přežvýkavců, v rostlinách pro mokré kompostování a třeba i v zaplavených v zaplavených rýžových polích. Kromě metanu obsahuje bioplyn i oxid uhličitý a některé nečistoty. Bioplyn je zápalný, pokud obsahuje alespoň 45 % metanu. Koncentrace bioplynu ve vzduchu pro mez výbušnosti je 6 - 12 % a zápalná teplota této směsi je 650 - 750 °C [2].

Bioplyn lze energeticky využívat, a to buď jako palivo pro generátory nebo kogenerační jednotky pro výrobu energie a tepla, lze ho také v jeho podobě s vysokým obsahem metanu použít (tzv. biometan) pro vstřikování do plynovodní sítě zemního plynu nebo ho také v podobě tzv. bioCNG využívat jako palivo pro dopravní prostředky.

Bioplyn lze cíleně získávat v hermeticky uzavřených zařízeních, ve kterých jsou udržovány ideální podmínky pro proces metanizace. Těmto zařízením se obecně říká fermentory a mohou být několika typů. Dělí se podle velikosti, od velkých v objemu několika set m³ až po malé, které jsou vhodné pro použití v domácnostech nebo menších provozech. Dále mohou být fermentory děleny podle způsobu vsázky substrátu, a to na diskontinuální nebo semikontinuální. Existují také buď mokré nebo suché fermentory, lišící se v množství sušiny v substrátu. Konstrukce fermentoru může být buď horizontální nebo vertikální. Existuje také vícestupňová fermentace tvořena několika fermentory, které mohou být zapojeny i tzv. do kruhu, tj. jeden fermentor se nachází uvnitř toho druhého a substrát jimi postupně prochází. Fermentory se mohou konstrukčně lišit i formou vytápění, míchacího zařízení, odběru plynu apod [3].

Látka vstupující do fermentoru se nazývá substrát, jelikož je sama substrátem pro metanové bakterie, které ve fermentoru přeměňují substrát na bioplyn. Tímto substrátem může být v podstatě jakákoliv organická látka, která je schopná biologického rozkladu (nicméně některé org. látky jako třeba lignin nebo syntetické polymery - plasty se rozkládají velmi pomalu a nejsou tedy vhodné [2]). Pro lepší a rychlejší rozklad, a tedy i tvorbu bioplynu je však zapotřebí substrát homogenizovat a také ho zbavit nežádoucích příměsí, z tohoto důvodu by měla být v příjmové části větších bioplynových stanic zavedena drtící a třídící jednotka [3].

Výsledkem proběhlého procesu metanizace je bioplyn a fermentační zbytek, který se nazývá digestát. Digestát lze dále ještě separovat na pevnou část (separát) a část kapalnou (fugát). Digestát lze vzhledem k vysokému množství živin použít jako hnojivo [4].

4.2 Právní předpisy v oblasti výroby bioplynu

Provozování bioplynových stanic (BPS) s sebou nese v českém právním prostředí mnoho legislativních předpisů, které je nutné dodržet, pokud chceme zařízení na výrobu bioplynu provozovat. O tom, jaký druh bioplynu je skutečně vyráběn a jaké jsou jeho možné způsoby použití, hovoří **zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů** [5].

Pokud chceme podnikat v oboru výroby bioplynu budeme potřebovat získat živnostenský list a k němu potřebnou licenci dle **Energetického zákona**, která může být udělována jak fyzickým, tak právnickým osobám po splnění zákonných požadavků [6].

Podle **Živnostenského zákona** jsou kromě licence a živnostenského listu ještě potřeba živnostenské listy pro:

- nakládání s odpady (s výjimkou nebezpečných odpadů) z oboru volných živností;
- nakládání s nebezpečnými odpady – živnost vázaná;
- nákup a prodej (hnojiv, kompostů) [7].

Obecným dokumentem, který je vhodný jak pro provozovatele, tak pro úředníky je **Metodický pokyn MŽP k podmínkám schvalování BPS před uvedením do provozu**, který je souhrnem platné legislativy a podmínek pro výstavbu a provoz BPS. Touto legislativou je především:

- **zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí** - Pokud zařízení podléhá posouzení podle zákona č.100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí, je nezbytné záměr zařízení podrobit procesu EIA;
- **zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci** - Pokud zařízení podléhá tomuto zákonu, je nutné sehnat integrované povolení;
- **zákon č. 183/2006 Sb., stavební zákon** - Při výstavbě bioplynové stanice lze požádat stavební úřad o vyhlášení ochranného pásma podle § 83 stavebního zákona s návrhem na vydání územního rozhodnutí pro zemědělské BPS minimálně 300 m vzhledem k územnímu plánování rodinné výstavby a pro ostatní BPS minimálně 800 m vzhledem k územnímu plánování rodinné výstavby [8];
- **zákon č. 254/2001 Sb., vodní zákon** - je nutné mít povolení od příslušného vodoprávního úřadu k vypouštění odpadních vod do vod povrchových nebo podzemních. Dále úřad stanovuje limity pro odpadní vody a četnost odebírání vzorků odpadních vod [8];
- **zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší** - je potřeba získat povolení od krajského úřadu na základě studie od investora. V povolení jsou stanoveny emisní limity jak pro vlastní bioplynový provoz, tak i pro zařízení na využití bioplynu [8];
- **zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech, a jeho prováděcí vyhlášky** - provozovatel BPS zpracovává BRO a potřebuje souhlas k provozování, dále také potřebuje kladné

vyjádření příslušného orgánu ochrany veřejného zdraví ke zpracování provozního řádu, pokud zpracovává i vedlejší živočišné produkty [8];

- **zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech** - tento zákon přichází v potaz, pokud bude digestát využíván jako hnojivo. Musí splnit všechny podmínky dané zákonem a registraci u Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského (ÚKZÚZ) [8];
- **Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 ze dne 21. října 2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě, a o zrušení nařízení (ES) č. 1774/2002 (nařízení o vedlejších produktech živočišného původu)** - novela tohoto nařízení nově stanovuje odpady ze stravovacích zařízení jako materiál kategorie 3, pro který není potřeba předchozí sterilizace při zpracování na bioplyn;
- **vyhláška č. 477/2012 Sb., o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů** - vyhláška provádí kategorizaci druhů biomasy do jednotlivých skupin, pro které jsou cenovým rozhodnutím stanoveny výše výkupních cen a zelených bonusů [8];
- **cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů** - podpora elektřiny se uskutečňuje formou zelených bonusů na elektřinu nebo výkupních cen. Aktuální cenové rozhodnutí ERÚ je cenové rozhodnutí č. 6/2021, ze dne 29. září 2021 [9].

4.3 Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven

Jak již název napovídá, biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven patří mezi organické odpady podléhající rozkladu. Ze základní definice je známo, že tento rozklad může být buď aerobní nebo anaerobní, tedy může probíhat v prostředí s obsahem kyslíku nebo za podmínek s absencí kyslíku. Definici tohoto odpadu můžeme přebrat na příklad z nařízení Komise EU č. 142/2011, která zní: „*Odpadem ze stravovacích zařízení se rozumí veškerý potravinářský odpad včetně použitého kuchyňského oleje s původem v restauracích, stravovacích zařízeních a kuchyních včetně ústředních kuchyní a kuchyní v domácnosti.*“ [10].

Tento druh organického odpadu je specifický tím, že vzniká ve stravovacích zařízeních a patří pod něho různé zbytky zpracovaných či nezpracovaných potravin. BROKS má vysoký obsah vody, vysoký obsah organických látek a nízké hodnoty výhřevnosti, což představuje obrovskou výzvu pro jeho úpravu a likvidaci [11].

Tzv. kuchyňské odpady jsou poměrně problematické, protože pocházejí z velmi složitých živých organismů a mohou se pohybovat od celých, nepoužitých materiálů až po frakce a směsi vyráběné fyzikálním, tepelným, chemickým a biochemickým zpracováním původní suroviny. Při výrobě hotových pokrmů, které jsou složeny jak ze živočišného, tak z rostlinného materiálu, často vznikají složitější směsné odpady. Odpady ze zpracování potravin jsou tedy svým složením heterogenní v důsledku dopadu různých činností při jejich složitém zpracování [12].

4.3.1 Způsoby nakládání s BROKS

Jak již bylo zmíněno, odpady z kuchyní a stravoven tvoří povětšinou komplikovanou heterogenní směs rozlišnou ve svém složení. Nakládání s nimi tedy představuje poměrně komplikovaný problém. Dle zákona č. 541/2020 Sb., o odpadech, je průvodce odpadu povinen zajistit oddělené shromažďování každého druhu odpadu podle jeho katalogového čísla a dále s ním nakládat podle příslušných předpisů. Nelze tedy BROKS například přimíchávat do směsného komunálního odpadu nebo ho drtit v drtiči odpadu a dále ho odvádět do veřejné kanalizace – zde může hrozit i zanášení kanalizačního potrubí jedlými oleji a tuky [13].

Nejčastějším způsobem nakládání z odpady z kuchyní a stravoven bylo historicky především zkrmování. Zbytky z jídelen byly často posílány na výkrm prasat či jiných hospodářských zvířat. Tento způsob nakládání již ale není možný, a to díky dvou právním normám. Tou první je nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu, které nejsou určeny pro lidskou spotřebu, které zakazuje zkrmování zbytky z jídelen především z důvodu zkrmování produkty živočišného původu, které mohou být zdrojem různých chorob hospodářských zvířat. V českém právním řádu pak tuto problematiku upravuje vyhláška Ministerstva zemědělství č.

299/2003 Sb., o opatřeních pro předcházení a zdolávání nákaz a nemocí přenosných ze zvířat na člověka, a to konkrétně v paragrafu 58 [14 a 15].

Další způsob nakládání s biologicky rozložitelným odpadem z kuchyní a stravoven, který již současná legislativa neumožňuje je skládkování. Toto opatření má také původ v několika právních normách. Tou historicky první je Směrnice Rady 1999/31/ES, která upravuje nakládání se skládkovaným odpadem v Evropské unii a jejím cílem je postupné snížení ukládaného BRO na skládky. Druhou normou je vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, která je novější verzí původní vyhlášky z roku 2001 a která stanovuje zákaz ukládání samostatné kategorie BRO na skládky. Důvodem je především skutečnost, že BRO podléhá v tělese skládky anaerobnímu rozkladu za vzniku metanu a oxidu uhličitého, což jsou skleníkové plyny [16 a 17].

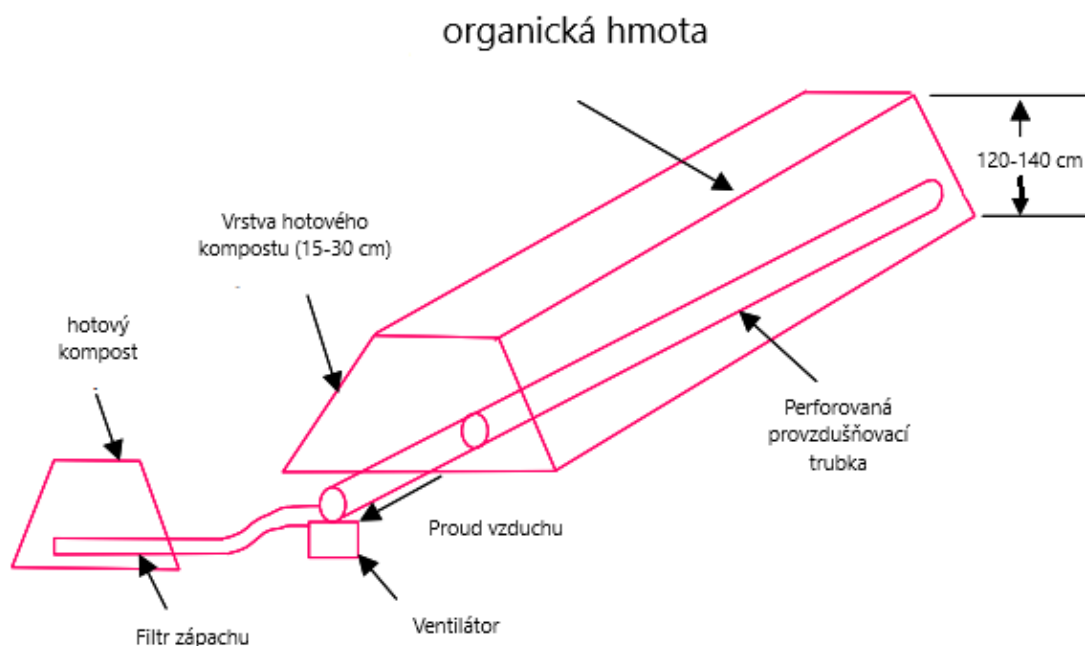
4.3.1.1 Kompostování

Další z možností nakládání a zároveň materiálového využívání BROKS je kompostování. Kompostování je v podstatě aerobní rozklad organického materiálu, při kterém vzniká hmota bohatá na živiny (tzv. kompost) a vedlejšími produkty tohoto procesu je teplo a CO₂. Pro správný průběh kompostování je důležitý především dostatečný přístup kyslíku (vzduchu) a dostatečná homogenizace materiálu. Kyslík tak může rovnoměrně prostoupit k celému objemu zpracovávané suroviny a může tak správně proběhnout proces aerobního rozkladu materiálu [18].

Kompostování má největší využití v zemědělských podnicích, kde vzniká velké množství organického odpadu. Jednou z hlavních výhod kompostování je právě jeho nízká náročnost na potřebné technologie. Byť je kompostování nejběžnější v zemědělských podnicích, tak první průmyslový kompost vznikl zřejmě v roce 1915 ve staré pražské čistírně odpadních vod a sloužil primárně k zpracování čistírenských kalů a uličních smetků [19].

V současnosti se využívá několika metod kompostování, ze kterých nejpoužívanější jsou nereaktorové systémy, takzvaně volně ložené hromady, které mohou mít buď pasivní nebo aktivní aeraci. Pokročilejší technologie využívá promíchávání a předhomogenizaci těchto hromad. V současnosti nejúčinnější technologie jsou různé kompostovací reaktory, ve kterých dochází jak k homogenizaci, promíchání, tak aeraci odpadu [20].

Obrázek 1 Příklad technologie volně ložené hromady s aktivním provzdušňováním [21]

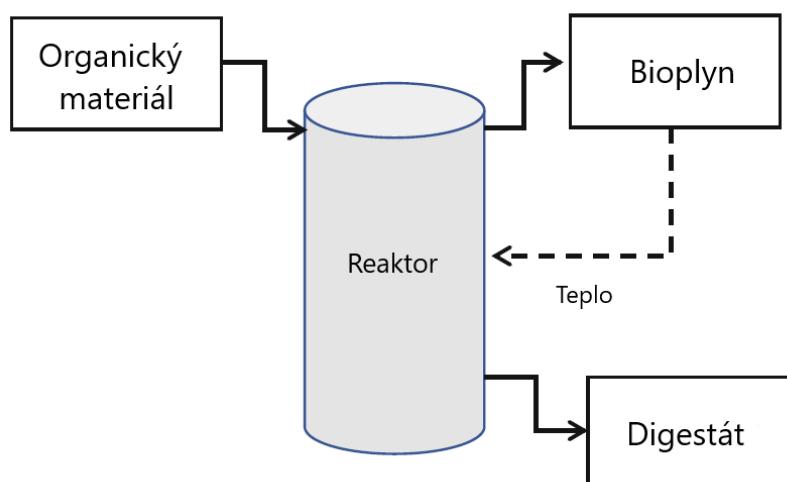


4.3.1.2 Anaerobní digesce

Velmi častou metodou ve zpracování BROKS je anaerobní digesce, která je vlastně opakem kompostování. Při kompostování dochází k rozkladu organických látek za přístupu kyslíku, kdežto při anaerobní digesci (též fermentaci) dochází k rozkladu v prostředí s absencí kyslíku.

Anaerobní digesce přináší hlavní výhodu oproti kompostování v možnosti energeticky využít zpracovávaný odpad, jelikož při fermentaci organických složek vzniká jako jeden z produktů tzv. bioplyn, který lze nadále termicky zpracovávat a který má dobrou energetickou hodnotu. V anaerobním procesu mikroorganismy rozkládají biologicky rozložitelný materiál řadou biologických procesů, než se vyrobí užitečný konečný produkt, který je v tomto případě bioplyn a digestát. Bioplyn tvoří směs plynů, ve které hraje nejdůležitější roli metan pro svoji vysokou výhřevnost. Digestát je pevný zbytek, který zůstane v reaktoru po proběhnutí celé nebo větší části rozkladné reakce. Proces fermentace je realizován v reaktorech (téže fermentorech) [22]. (viz obr.2)

Obrázek 2 Jednoduché schéma reaktoru [22]



4.3.1.3 Hydrotermální karbonizace

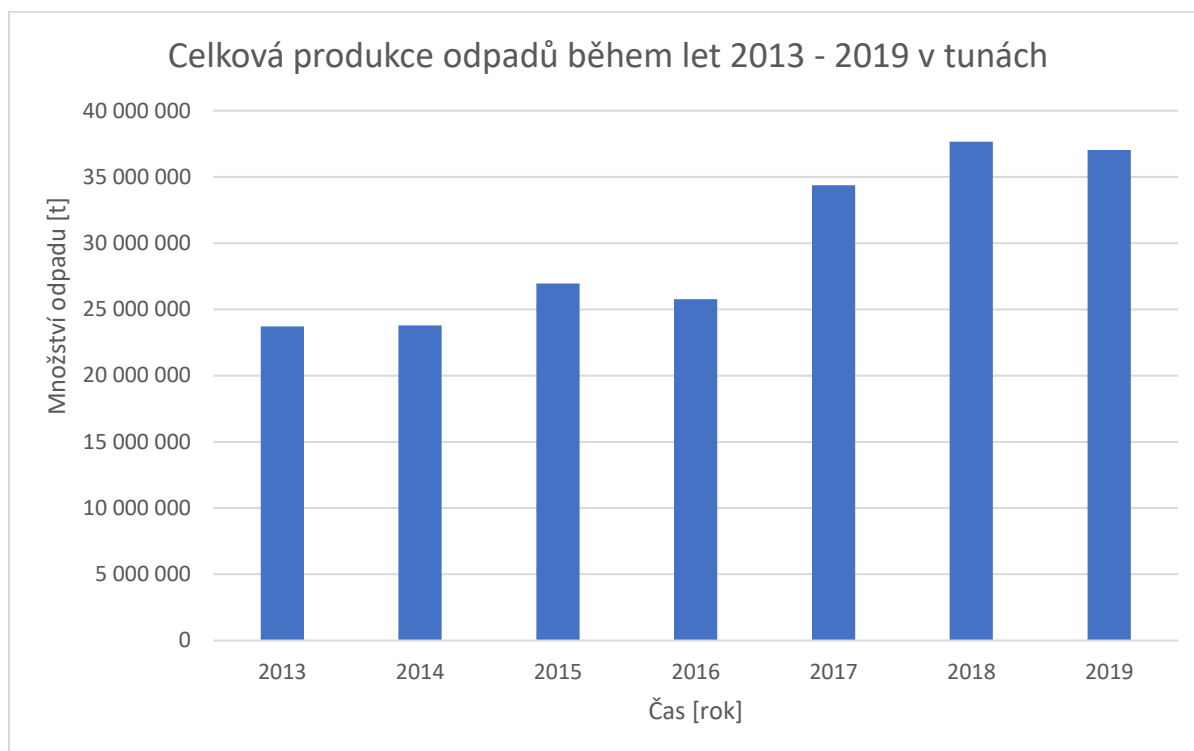
Další technologii (která byť je známá více než století, tak je zatím velmi málo rozšířena) pro zpracování BROKS může být hydrotermální karbonizace (HTC). Hydrotermální karbonizaci lze definovat jako kombinovanou dehydrataci a dekarboxylaci organické hmoty za účelem zvýšení obsahu uhlíku v ní, s cílem dosáhnout vyšší výhřevnosti. Realizuje se aplikací zvýšených teplot (180–220 °C) na biomasu v suspenzi s vodou pod nasyceným tlakem po dobu několika hodin. S tímto procesem přeměny lze ze zbytků biomasy vytvořit i lignitové palivo s dobrými palivářskými vlastnostmi, a to i při vysokém obsahu vlhkosti. Může tedy přispět k širšímu využití biomasy pro energetické účely [23].

Během HTC prochází surovina několika současně probíhajícími reakcemi. Konečnými produkty jsou pevné zbytky obohacené uhlíkem (tzv. hydrochar), kapalná fáze a relativně malé množství plynu s nízkým obsahem uhlíku a malou škodlivostí pro životní prostředí [24].

4.3.2 Analýza současné situace nakládání s BROKS

Zvýšená produkce odpadů je dlouhodobým celosvětovým problémem, a ačkoliv Česká republika nepatří hustotou zalidnění a produkcí odpadů mezi giganty jako je například Čína nebo Indie, tak i zde zaznamenáváme rostoucí trend v produkci odpadů [25]. (viz graf 1)

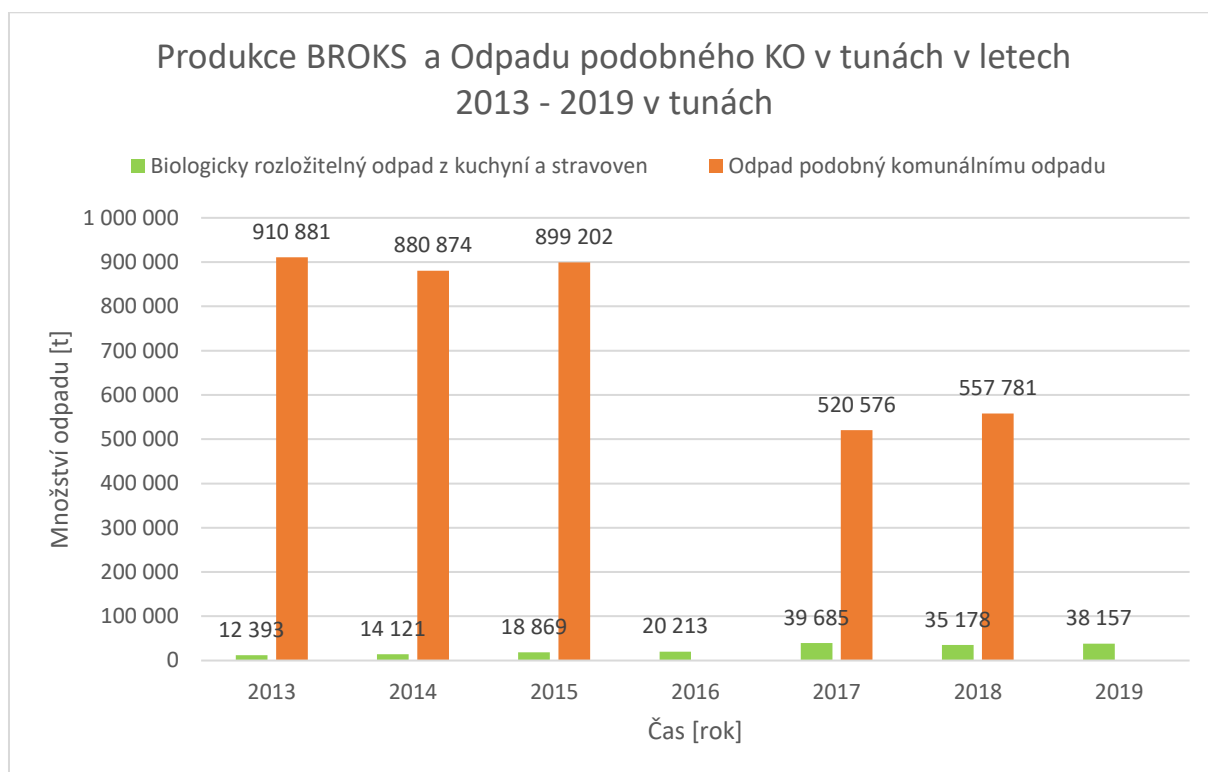
Obrázek 3 Celková produkce odpadů na území ČR mezi lety 2013 a 2019 v tunách [25]



Kromě celkové produkce odpadů, roste i produkce komunálních a biologicky rozložitelných odpadů, s jejichž odstraněním je značný legislativní a enviromentální problém. Jak již bylo zmíněno, BRO produkují při svém rozkladu množství skleníkových plynů, z nichž největší zastoupení mají metan, oxid uhličitý a samozřejmě i vodní pára. Legislativní opatření, které má zabránit těmto emisím, a to především emisím metanu, který vzniká při anaerobním rozkladu BRO, je například již zmíněná Směrnice Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkování odpadů.

S odpady obecně bychom měli nakládat podle principu hierarchie ze zákona o odpadech a spíše než odstraňovat, bychom měli hledat cesty energetického využívání a recyklace. To se týká i biologicky rozložitelných odpadů z kuchyní a stravoven. Jejich produkce poslední roky také roste a můžeme předpokládat, že tento trend bude pokračovat [25 a 26]. (viz graf 2)

Obrázek 4 Produkce BROKS a Odpadu podobného KO v ČR v tunách v letech 2013 - 2019 v tunách [25]



Zajímavé je i porovnání BROKS s Odpadem podobným komunálnímu odpadu (viz Graf 2), jehož jeho producentem jsou výhradně jen právnické osoby a jehož součástí by měl být i BROKS. Ačkoliv vidíme rostoucí produkci BROKS v posledních letech, tak množství evidovaného Odpadu podobného komunálnímu spíše klesá (data za rok 2016 a 2019 nebyla k dispozici). Tento jev může mít několik vysvětlení, buď skutečně reálná produkce tohoto odpadu klesá, což je ale velmi nepravděpodobné vzhledem k trendu, který je viditelný na obr. 1 nebo obce více spolupracují s právnickými osobami v otázce nakládání s jejich odpady a za poplatek jim umožňují využít sběrného systému města. Poslední variantou, která se nabízí a která bohužel stále představuje problém, je nezaevidování vzniklého odpadu. Tím pádem se vzniklý odpad nedostane vůbec do systému odpadového hospodářství a často končí na černých skládkách nebo je s ním nakládáno jinými nevhodnými způsoby.

INCIEN ve své studii proveditelnosti pro bioplynovou stanici na komunální odpad v Praze uvádí, že BROKS je třetím nejvíce zastoupeným druhem BRO. Dále zmiňuje, že část BROKS je zpracovávána mimo svozový a evidenční systém. Podle INCIENU agentura CZ Biom odhaduje, že evidovaný gastro odpad tvoří jen 1/3 celkové produkce. Zbylé 2/3 končí mimo evidenci buď v kanalizaci, nebo jako krmivo pro hospodářská zvířata, nebo ve smíšeném komunálním odpadu [27].

Pokud se domněnky CZ Biomu a INCIENU zakládají na pravdě, můžeme tedy tvrdit, že současná reálná produkce BROKS bude určitě přesahovat 100 tisíc tun ročně. Takové

množství je již signifikantní a pro svozový systém a zařízení pro energetické a materiálové využití BRO představují značnou zátěž. Jedním z důvodů neevidování BROKS může být právě i poddimenzovaný systém pro nakládání s tímto odpadem. I tento problém by tak pomohlo vyřešit zpracovávání odpadů v místě jejich produkce.

4.2 Anaerobní digesce

Vlastní řešení této práce spočívá ve zpracování kuchyňských odpadů pomocí anaerobní digesce a v následující kapitole bude vysvětlen její princip, aplikovatelnost na kuchyňské odpady a možnosti samotné realizace malého zařízení na zpracování odpadu přímo v provozu.

Ačkoliv se to možná na první pohled nemusí zdát, jelikož se o anaerobní digesci a s ní souvisejících bioplynových stanicích mluví především v posledních letech, je tato technologie velmi stará. Zřejmě první dochovaná zmínka o použití technologie anaerobní digesce je 4 000 let stará a pochází z Číny, kde se AD využívala pro ohřev solanky při výrobě soli. Další zmínky o použití AD pochází z 10. a 6. století př.n.l. z Asýrie a Perské říše, kde byla tato technologie použita k ohřevu vody [28].

V moderní době se o objevení principu metanogeneze prosadili především francouzští chemici Antoine Bechamp a Louis Pasteur. Oba se velmi přeli o to, kdo skutečně objevil princip fermentace, ale dá se říct, že Bechamp objevil mikroorganismy, které stojí za rozkladem organických látek a produkují metan, oxid uhličitý a mastné kyseliny a Pasteur a jeho pomocník Ulysse Gayon poprvé uskutečnili fermentaci kravské mrvy v mezofilních podmínkách. Všechny tyto snahy vyvrcholily v roce 1865 navržením metanu jako názvu pro to, co bylo zatím známé jako bažinatý plyn nebo sycený vodík [28].

Další rozšíření technologie anaerobní digesce pak nastalo především jako součást čistíren odpadních vod, kde se AD využívala pro stabilizaci čistírenských kalů. První bioplynová stanice vznikla v Indii v devadesátých letech 19. století. Ve 20. století se následně začalo s energetickým využíváním bioplynu ve větším měřítku. Za zmínku stojí i první česká bioplynová stanice, která byla postavena v roce 1974 v Třeboni a která sloužila ke stabilizaci kejdy a odpadních vod [29 a 30].

4.2.1 Princip anaerobní digesce

Jak již bylo zmíněno, tak organický odpad a obecně jakákoliv organická látka na bázi uhlovodíků podléhá rozkladu. Tento rozklad můžeme dělit na oxidaci, tj. za aerobních podmínek, a fermentaci, tj. za anaerobních podmínek. Anaerobní digesce je často popisována i pod názvy jako je fermentace, vyhnívání či metanizace. Ve výsledku se ale jedná o součást stejného procesu, jehož hlavním „pohonem“ jsou anaerobní mikroorganismy (bakterie), které se běžně vyskytují v bažinách, na skládkách, na dně jezer nebo v žaludcích zvířat.

Proces začíná umístěním tzv. vsádky (organického odpadu) do fermentoru (též reaktoru), který je hermeticky uzavřen, aby se zabránilo přístupu vzduchu. Následně přirozeně se vyskytující bakterie rozkládají materiál, který uvolňuje bioplyn bohatý na metan. Plyn pak může být použit jako palivo pro výrobu tepla a/nebo elektřiny nebo může být rafinován pro použití jako palivo pro silniční vozidla nebo pro vstřikování do plynárenské sítě. V rafinovaném stavu je složením velmi podobný zemnímu plynu a nazývá se bioCNG. Materiál ponechaný ve fermentoru se nazývá digestát, je bohatý na živiny (dusík, draslík a fosfát) a může sloužit jako hnojivo. Technologie anaerobní digesce tak při dobré realizaci může odpad zužitkovat na maximum [31].

4.2.1.1 Surovinová vsádka

Vstupní surovina, která se často označuje i jako „substrát“, jelikož je skutečně substrátem pro anaerobní bakterie, je hlavním faktorem pro projektování nového provozu bioplynové stanice. Typ suroviny a její množství určuje velikost, design, účinnost a výstup (jak produktový, tak finanční) provozu. To znamená, že zařízení pro anaerobní digesci musí být optimalizováno tak, aby vyhovovalo surovině specifické pro dané místo nebo směsi surovin, které má používat. Vstupní surovina by měla být tedy dobře známa před samotným projektováním fermentoru [32].

Množství suroviny musí být relativně konstantní. Je také žádoucí, aby kvalita substrátu byla, pokud možno bez větších výchylek, obzvláště co se týče podílu sušiny, který má velký vliv na produkci bioplynu. To nepředstavuje příliš velký problém pro zemědělské bioplynové stanice, kde se složení a vlastnosti substrátu zásadně nemění. Naopak kvalita a homogenní vlastnosti substrátu mohou být zásadním problémem například městských bioplynových stanic na komunální odpad. Dalším požadavkem na vstupní surovinu je její čistota, to znamená, že by surovina měla být zbavena všech nežádoucích nečistot, jako jsou plasty, kovy, větší kusy dřeva, chemikálie, antibiotika apod [32].

K dispozici je velmi málo přesných informací o energetickém potenciálu výchozích surovin pro nezemědělské fermentory, tj. pekařský odpad, potravinářský odpad, komunální odpad atd. Jakékoliv informace, které existují, mají tendenci být specifické pro zdroj odpadu a nelze je použít na podobné suroviny z jiného zdroje. Například pekařský odpad z lokality A může mít vyšší obsah sušiny než pekařský odpad z lokality B apod. Proto je potřeba zanalyzovat vždy daný odpad pro daný provoz, ze kterého bude vsádka získávána [32].

Tabulka 1 Přibližná výtěžnost bioplynu u různých substrátů [33]

Surovina	Podíl sušiny [%]	Výtěžnost bioplynu [m ³ ·t]
Chlévská mrva	10	15–25
Prasečí kejda	8	15–25
Drůbeží trus	20	30–100
Senáž	28	160–200
Celá pšenice	33	185
Siláž	33	200–220
Kukuřice	80	560
Surový glycerin	80	580–1000
Pšeničné zrno	85	610
Řepkový šrot	90	620
Zvířecí tuky	až 100	až 1200
Kopřiva	–	120–420
Slunečnice	–	154–400
Celá kukuřice	–	205–450
Cukrová řepa	–	236–381
Sláma	–	242–324
Brambory	–	276–400
Žitné zrno	–	283–492
Řepka olejná	–	340–440
Jetel	–	345–350
Ječmen	–	353–658
Konopí	–	355–409
Listí	–	417–453
Krmná řepa	–	420–500

4.2.1.2 Charakteristika bioplynu

Výtěžek bioplynu ze vstupní suroviny závisí na mnoha faktorech, a to především na:

- druhu vstupní suroviny;
- obsahu sušiny;
- energetické hodnotě materiálu;
- době zdržení suroviny v reaktoru;
- druhu reaktoru a vnitřních podmínkách;
- čistota vsádky [32].

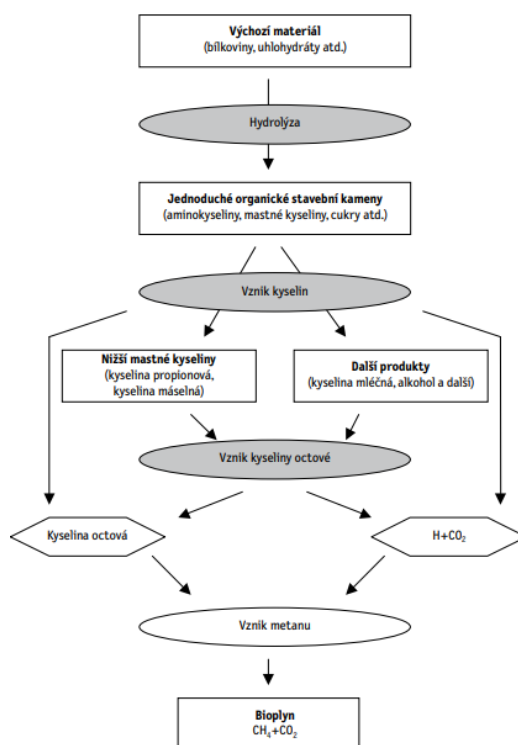
Samotný proces vzniku bioplynu je poměrně komplikovaný, graficky znázorněn je tento proces na obr. 5. Přeměna organické látky na metan probíhá díky několika druhům bakterií, které upřednostňují jeden nebo více ze 4 metanogenezních substrátů. Těmito substráty jsou:

- H_2+CO_2 ;
- CH_3COOH ;
- $HCOOH$;
- CH_3OH [34].

Samotná proměna složitější organické látky v metan je specifikována těmito dílčími procesy:

- **Hydrolyza** – je první fází rozkladu makromolekulárních látek, polysacharidů, lipidů a proteinů na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě pomocí mimobuněčných hydrolytických enzymů, které jsou produktem bakterií ve fermentoru. [34]
- **Acidogeneze** - díky hydrolyze jsou výsledné nízkomolekulární produkty schopné transportu do buňky, kde jsou dále rozkládány na kyseliny, alkoholy, oxid uhličitý a vodík [34].
- **Acetogeneze** – acetogeneze je speciální případ acidogeneze nazývaný též „Syntrofní acidogeneze“. Produkty tohoto procesu jsou pak vodík, oxid uhličitý a kyselina octová [34].
- **Metanogeneze** – metanogeneze je souhrnné označení několika koncových procesů, při kterých je hlavním výstupem metan a CO_2 . Při těchto procesech využívají bakterie především kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý [35].

Obrázek 5 Schématické znázornění procesu metanizace organických látek [3]



Samotné výsledné složení bioplynu se velmi liší. Záleží na použitých surovinách ale i prostředí a technologickém řešení fermentoru. V zásadě se různé zdroje shodují na podobném složení bioplynu. Malat'ák například uvádí 50 – 85 % CH₄ a 20 – 35 % CO₂ a Pullen uvádí 50 – 95 % CH₄ a 10 – 50 % CO₂. Metan a oxid uhličitý jsou majoritními plynnými složkami bioplynu, další složky jsou spíše marginálního charakteru, nicméně velmi značně ovlivňují kvalitu plynu a následné čisticí technologie. Mezi tyto složky patří především H₂, O₂, H₂S, CO, N₂. Důležitými složkami jsou nicméně jen ty, které lze přeměnit na využitelnou energii, a to je pouze metan, kyslík a vodík. Vzhledem k nízkému objemu kyslíku a vodíku v bioplynu je tak primárně kladen důraz na co největší produkci metanu [32 a 36].

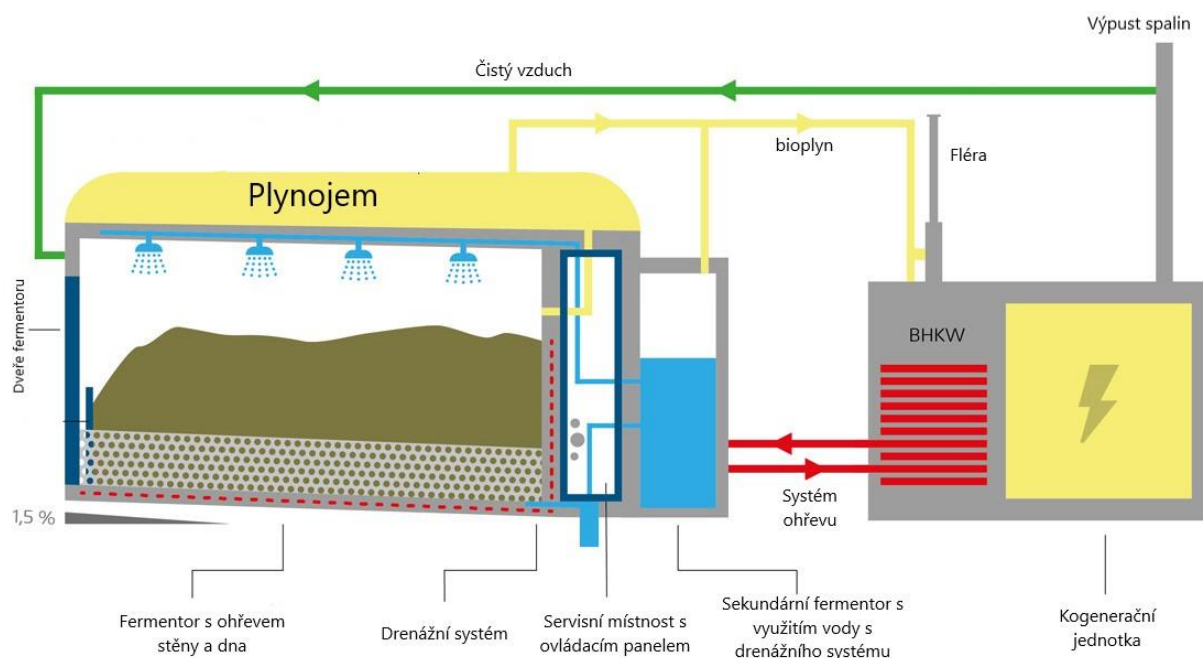
4.2.1.3 Typy anaerobní digesce

Typy anaerobní digesce se dají rozdělit podle provozních parametrů a dělí se především podle podmínek, ve kterých proces probíhá, a to podle teploty, obsahu sušiny v reaktoru a kontinuity provozu.

První dělení je podle teploty ve fermentoru a dělí se na psychofilní (15 – 20 °C), mezofilní (25 – 40 °C) a termofilní (až 60 °C). Různé teploty vyhovují různým druhům bakterií a v současnosti se nejvíce preferuje mezofilní a termofilní oblasti. Termofilní systémy mají rychlejší propustnost než mezofilní systémy a v důsledku toho mají rychlejší produkci bioplynu, což znamená, že menší fermentor dosáhne stejného výkonu bioplynu. Vyšší teplota také znamená, že v termofilním procesu je zabito více patogenů. Investiční náklady termofilních systémů jsou daleko vyšší, k jejich ohřevu a provozu je potřeba více energie, jsou citlivější na změny surovin a obecně vyžadují větší management. Vzhledem k tomu, že termofilní systémy jsou citlivé na změny, jsou obecně používány tam, kde je vstupní surovina omezena na jeden nebo dva typy a pravděpodobně nebudou existovat žádné variace (např. kaly z ČOV). Mezofilní systémy se používají naopak tam, kde je vyšší pravděpodobnost, že bude kvalita a množství vstupních surovin více kolísat [35 a 37].

Další důležité rozdělení je podle obsahu sušiny v substrátu a použité technologii a tím je mokrá proces a suchý proces. Mokré procesy probíhají v obsahu sušiny 5 – 15 % a suché procesy probíhají ve vyšších koncentracích sušiny v substrátu, nejčastěji v rozsahu 30 – 40 %. V mokrých procesech se používá pro ředění substrátu přímo procesní voda, která má i očkovací a pufrací účinky. Suché systémy mají tendenci být levnější, protože je zde méně vody k ohřevu a poskytují větší produkci plynu na jednotku suroviny (také protože je méně vody na jednotku suroviny). Mokré procesy mají však nižší vstupní kapitálové náklady [37, 38 a 39].

Obrázek 6 Příklad technologie suchého procesu od firmy Bekon [40]



Posledním rozdělením, které stojí za zmínku je dělení podle kontinuity procesu. Fermentory se dělí na kontinuální, semi-kontinuální a diskontinuální. Většina fermentorů má kontinuální průtok, což umožňuje větší automatizaci. Diskontinuální (též vsádkový systém nebo „batch system“) proces vyžaduje otevření fermentoru pro naložení suroviny a vyžaduje restartování celého procesu a jeho parametrů každých několik týdnů, což může být provozní problém. Kontinuální systém také obecně poskytuje více bioplynu na jednotku suroviny, protože větší kontrola nabízená nad vstupem a průtokem zajišťuje lepší bakteriální aktivitu a zajišťuje, že surovina zůstane ve vyhnívací nádrži po optimální dobu. Naopak spousta suchých systémů parametry vstupní suroviny tíhne k vsádkovému systému a nedostatky v kontinuitě se vyrovnávají použitím několika vsádkových fermentorů současně [37].

Samotný proces fermentace se dá nadále dělit podle různých technických a technologických specifik, jako například podle tvaru fermentoru, poloze fermentoru, typu ohřevu fermentoru apod.

4.2.1.4 Čištění bioplynu

Bioplyn obsahuje nejen metan, oxid uhličitý a vodu, ale může v malých množstvích obsahovat i další sloučeniny. Tyto nečistoty mohou ovlivnit zařízení pro využití bioplynu tím, že způsobují korozi a mechanické opotřebení, ale mohou také vést k nežádoucím emisím. V závislosti na tom, jak bude bioplyn využíván, je často potřeba určitá forma čištění, aby se snížilo množství nežádoucích nečistot [41].

Nejčastějšími nečistotami v surovém bioplynu jsou sirovodík, amoniak, kyslík a dusík. Jejich výskyt a množství závisí především na tom, jaká surovina byla použita. Nečistoty se v surovém bioplynu vyskytují z různých důvodů. Některé nečistoty jsou přítomny v substrátu,

kteřý je přiváděn do reaktoru, ty se odpařují a budou tak přítomny ve vyrobeném bioplynu. Příklady takových sloučenin jsou siloxany. Množství, které se odpaří, závisí na tom, jak těžká sloučenina je, a také na teplotě ve fermentoru. Voda se nachází v surovém bioplynu, množství závisí na podmínkách v reaktoru [41].

Nečistoty mohou vznikat i při samotném procesu anaerobní digesce, při něm jsou rozložitelné sloučeniny rozkládány na menší sloučeniny různými mikroorganismy přítomnými v reaktoru. Nečistoty jako amoniak a vodík vznikají při procesu metanogeneze mikroorganismy [41].

Během procesu AD mohou být také některé nečistoty přidány, například kyslík (nebo vzduch) může být přidán v malých množstvích k odstranění sirovodíku oxidací, a tak mohou být v bioplynu přítomna malá množství kyslíku (a dusíku) [41].

Jaká technologie čištění bude použita závisí především na dalším účelu využití bioplynu. Obecně se dá ale říci, že mnohem menší nároky na čistotu bioplynu budou kladeny na bioplyn pro tepelné a energetické využití než na bioplyn pro dodávky do plynovodní sítě nebo jako palivo pro spalovací motory. Pro tyto účely je většinou požadován bioplyn s vysokou čistotou a kvalitou srovnatelnou se zemním plynem.

Motory používané pro výrobu tepla a energie v kogeneračních jednotkách mohou tolerovat různé složení plynů, nicméně sirovodík obsažený v bioplynu může zreagovat se vzdušnou vlhkostí a způsobit tak korozi některých kovových částí. Problémy mohou způsobit i siloxany [41].

Voda lze odstranit změnou parametrů, které ovlivňují rozpustnost vody v plynu, tj. změnou tlaku a teploty. Vodní pára bude kondenzovat, pokud se tlak zvýší nebo pokud se sníží teplota, protože koncentrace odpovídající nasycení v plynu se pak sníží. Technologie pro odstranění vody z bioplynu jsou tedy komprese nebo chlazení. Dále lze vodu odstranit absorpcí a adsorpcí. Ostatní nečistoty, které se mohou rozpouštět ve vodě, jako jsou třeba siloxany, budou odstraněny společně s vodou, a to je třeba vzít v úvahu při navrhování systémů pro likvidaci vody [41].

Sirovodík lze odstraňovat v samotném fermentoru nebo za fermentorem. Sirovodík má vyšší rozpustnost než oxid uhličitý ve vodě a bude tedy odstraňován společně s oxidem uhličitým ve vodní pračce. Technologie používané k odstraňování sirovodíku lze rozdělit na biologické, fyzikální nebo chemické metody. Biologické odstranění sulfanu pracuje na principu vhánění vzduchu nebo kyslíku do fermentoru. Sirovodík bude reagovat s kyslíkem a biologickou oxidací vytvoří elementární síru. Může se také vytvořit určité množství oxidu siřičitého. Oxidaci katalyzují bakterie Thiobacillus, které jsou běžně přítomné ve fermentoru. Fyzikální metodou odstranění sirovodíku může být technologie absorpce vodou nebo organickými rozpouštědly. Jednou z nejstarších metod odstraňování sirovodíku je čištění hydroxidem sodným. Může být také použita chemická absorpce a v tomto případě je kapalným médiem vodný roztok obsahující NaOH, FeCl₂ nebo Fe(OH)₃. Sirovodík reaguje a tvoří sulfidy nebo hydrogensulfid sodný. Sulfan lze odstranit také adsorpcí pomocí aktivního uhlí. Chemické

odstranění sulfanu spočívá v přidávání iontů železa (Fe^{2+} nebo Fe^{3+}) do fermentoru ve formě $FeCl_2$, $FeCl_3$ nebo $FeSO_4$. Vzniká nerozpustný sulfid železnatý (FeS), který se vysráží uvnitř fermentoru. Sulfid železnatý opustí fermentor společně s digestátem [41]. Jedná se o tyto reakce:



Při úpravě bioplynu na úroveň zemního plynu, taktéž nazývaného biometan, je potřeba odstranit především **oxid uhličitý**, která tvoří druhou největší složku.

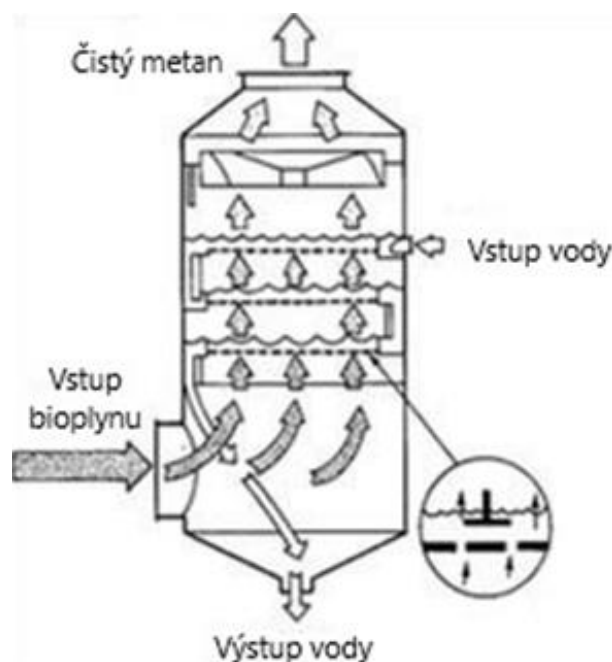
První a principiálně nejjednodušší technologií je tzv. vodní vypírka, jejíž princip pracuje na rozdílné rozpustnosti CO_2 a CH_4 ve vodě. Oxid uhličitý má totiž mnohem lepší rozpustnost a rozpouští se tak dříve a rychleji než metan. Technologie vodní vypírky spočívá ve vpouštění bioplynu do vertikální kolony, ve které je bioplyn zkrápěn vodní sprchou. Výpust z kolony by tak měl opouštět již metan bez CO_2 [27].

Další velmi přesnou ale poměrně i nákladnou technologií může být membránová technologie, která funguje na principu propouštění molekul podle velikosti. V membránových systémech lze definovat tři různé toky: vstup (surový bioplyn), permeát (plyn bohatý na CO_2) a retentát (plyn bohatý na CH_4). Různé parciální tlaky příslušných sloučenin mezi vstupní a výstupní stranou mohou sloužit jako hnací síla systému [42].

Jednou z dalších metod pro získání čistého metanu může být i tzv. metoda PSA (Pressure swing adsorption). PSA je adsorpční technologie, adsorpce znamená, že sloučeniny plynů (adsorbáty) jsou zadržovány na povrchu pevných látek (adsorbentů) a jsou zachycovány velikostí molekulového síta [43]. Jako adsorbenty lze použít aktivní uhlí, zeolity nebo uhlíková molekulová síta [44]. Nízké teploty a vysoké tlaky zvyšují rychlost adsorpce [43]. Technologie PSA byla zavedena v komerčním měřítku v 60. letech 20. století [42].

Poslední hojně používanou technologií je chemická absorpce organickými rozpouštědly, tzv. aminová vypírka. Aminová vypírka je chemisorpční metoda, což znamená, že CO_2 a teoreticky H_2S jsou chemicky vázány na organické činidlo [45].

Obrázek 7 Jednoduché schéma technologie vodní vypírky [46]



4.2.1.5 Kogenerace bioplynu

Bioplyn je považován za uhlíkově neutrální biopalivo a lze jej použít jako palivo ve všech stacionárních spalovacích zařízeních vhodných pro zemní plyn. Výhřevnost bioplynu se pohybuje mezi 19,7 a 23,3 MJ·m³ a je závislá na množství CH₄ v bioplynu [47]. Tato výhřevnost se obvykle pohybuje mezi 50 a 70 % výhřevnosti zemního plynu v komerční kvalitě 31,6–39 MJ·m³, což závisí na zdroji a složení [48].

V kogeneračních jednotkách se elektřina vyrábí spalováním paliva (zemního plynu nebo bioplynu) a poté se k zachycení tepla z proudu spalin spalínového systému používá rekuperační výměník. Toto teplo lze přeměnit na užitečnou tepelnou energii, obvykle ve formě páry nebo horké vody. Tyto kogenerační systémy jsou běžně vybaveny čtyřdobým nebo dieselovým motorem [48].

Složení bioplynu a energetický obsah ovlivňují výběr zařízení pro využití bioplynu. Náklady na údržbu pístových spalovacích motorů se zvyšují se zvyšující se koncentrací sulfanu a odstraňování sulfanu je nutné při koncentracích vyšších než 1000 ppmv [49]. Mikroturbíny jsou ve srovnání s plynovými motory odolnější vůči sloučeninám síry a mají nižší emise oxidů dusíku a oxidu uhelnatého [48]. Komponenty, které jsou předmětem zájmu z hlediska emisí a bezpečnosti zařízení a údržby, jsou:

- **reduované sloučeniny síry** (sulfan, merkaptany, dimethylsulfid...) kvůli jejich vlivu na emise SO₂, bezpečnostním problémům a korozi v důsledku tvorby kyseliny sírové;
- sloučeniny obsahující **dusík** kvůli jejich potenciálu zvyšovat emise NO_x a potenciál tvořit oxid dusný, který je skleníkovým plynem;

- sloučeniny **chloru** kvůli možnosti tvorby dioxinů během spalování;
- **siloxany**, které se spalováním přeměňují na mikrokrystalický oxid křemičitý a usazují se na ventilech, stěnách válců a vložkách, což způsobuje opotřebení a může vyústit až v zablokování pístů, válců nebo ventilů.

4.2.1.6 Digestát

Ve většině BPS je doba zdržení biomasy v reaktoru cca. 20 dní. Během této doby se rozloží pouze část organické hmoty a v reaktoru zůstává určité množství zbytkové organické hmoty, které se nazývá digestát [50].

Digestát má různý obsah vody, který závisí na vstupní surovině a použité technologii fermentace. Digestáty z mokrých termofilních procesů mají obecně větší obsah vody než digestáty z mokrých nebo suchých mezofilních procesů [50].

Kapalnou část lze z digestátu odseparovat a vzniká tzv. **fugát**. Pevná část digestátu se pak nazývá **separát**. Digestát, fugát i separát lze využít. Všechny tyto frakce jsou používány jako hnojivo, fugát lze také vracet zpět do fermentoru jako procesní kapalinu [4].

Legislativní požadavky na kvalitu a parametry digestátu jako hnojiva klade *vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva* v příloze 5 - Organická hnojiva. (tab. 2)

Tabulka 2 Příloha 5 vyhlášky č. 474/200 - požadavky na digestát jako hnojivo [51]

typ	označení typu	požadovaná hodnota	součásti určující typ, formy a rozpustnost živin	hodnocené součásti a další požadavky	složení, způsob výroby	zvláštní ustanovení
1	2	3	4	5	6	7
18.4	digestát	3-13% min. 0,3 %	sušina celkový dusík	dusík hodnocený jako celkový ve vzorku	hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu	výhradně z krmiv a statkových hnojiv
18.5	fugát digestátu	méně než 3 % min. 0,1 %	sušina celkový dusík	dusík hodnocený jako celkový ve vzorku	hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu, tekutý podíl po separaci, svým charakterem může vykazovat působení minerálního hnojiva	výhradně z krmiv a statkových hnojiv
18.6	tuhý digestát separát digestátu	více než 13 % min. 0,5 %	sušina celkový dusík	dusík hodnocený jako celkový ve vzorku	hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu, v případě separátu digestátu se jedná o tuhý podíl po separaci	výhradně z krmiv a statkových hnojiv

5 Vlastní řešení

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout technologické zařízení pro zpracování kuchyňských odpadů, které by bylo rozměrově a kapacitně malé a mohlo by být umístěno přímo v restauračních provozech. Ideálním stavem by byla schopnost tohoto zařízení nejenom pokrýt energetické nároky na svůj provoz ale například i na provoz restaurace. Toto zařízením můžeme označovat jako **mini fermentor**.

V závěru bude zhodnocena ekonomika provozu tohoto mini fermentoru vzhledem k množství vyprodukovaného bioplynu a sekundárních produktů z procesu fermentace.

5.1 Profil hodnocené společnosti a navrhované technologie

5.1.1 Popis zpracovávaných odpadů

Pro analýzu produkce bioplynu byly vybrány kuchyňské odpady z provozu jedné z fast-foodových restaurací, která si nepřejí, aby její jméno v diplomové práci figurovalo. Provoz této restaurace se zaměřuje především na přípravu pokrmů z masa, zeleniny, pečiva a hranolek. Většinu těchto jídel připravuje pomocí fritování a za použití jedlých rostlinných olejů, které tvoří velkou část vyprodukovaných organických odpadů.

Ve složení odebraného vzorku odpadu bylo různé pečivo, zbytky masa a zeleniny, kávový filtrát, hranolky apod. Tento odpad spadá v Katalogu odpadů pod biologicky rozložitelné komunální odpady a má konkrétní označení 20 01 08 „Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven“. Denní produkce tohoto odpadu se pro tuto provozovnu pohybuje kolem 30 kg.

Společně s tímto odpadem byl odebrán i vzorek rostlinného oleje, který byl použit při fritování. Oleje a tuky mají obecně potenciál zvyšovat produkci metanu při anaerobní digesci a z tohoto důvodu byl odebrán vzorek pro analýzu pro případnou kodigesci se zbylým kuchyňským odpadem [52]. Tento odpad je označen v Katalogu odpadů jako 20 01 25 „Jedlý olej a tuk“. Denní produkce tohoto odpadu v této provozovně je přibližně 20 l.

5.1.2 Popis navrhované technologie

V současnosti se podle Pullena asi 95 % potravinového odpadu na celém světě posílá na skládku, kde se pomocí anaerobní digescce přeměňuje na metan, oxid uhličitý a další skleníkové plyny [32, s. 29]. Bohužel toto není kontrolovaná AD a tyto skleníkové plyny se uvolňují do atmosféry. Kromě toho se ztrácí potenciální nutriční hodnota půdy, která mohla být extrahována z potravinového odpadu a použita jako kompost nebo hnojivo.

Biologický odpad tedy mimo jeho materiálního využití pro půdu skýtá i energetický potenciál, který může být při cílené AD využit pro výrobu tepla nebo elektrické energie.

Výhodou anaerobní digesce je, že při dobře nastavené technologii fermentace lze tato využití propojit. Bioplyn vznikající při AD lze spalovat v kogenerační jednotce za vzniku elektřiny a plynu a zbylý pevný zbytek - digestát lze využít jako hnojivo pro půdu.

Jistou nevýhodou potravinových odpadů je jejich složení, které se může natolik rozlišovat, že to představuje pro návrh fermentoru velký problém. Avšak výhodu zpracování odpadů přímo v dané provozně tak představuje jejich větší homogenita složení. Obzvláště u fast-foodových řetězců se složení kuchyňských odpadů prakticky nemění. Tato skutečnost může pomoci při návrhu konkrétní technologie.

Další výhodou zpracování kuchyňských odpadů „on-site“ je absence transportu odpadu na místo určené k dalšímu jeho zpracování. Tímto se ušetří emise, které by při přepravě odpadu jinak vznikaly. Provozovna tak ušetří nejen na nákladech za energii, které získá z bioplynu, ale také tímto ušetří náklady za placení poplatků externí firmě, která s odpady nakládá.

Dalším finančním přínosem by mohl být prodej digestátu, s kterým by mohlo být nadále nakládáno jako s kompostem nebo hnojivem.

5.1.2.1 Popis jednotlivých technických zařízení technologie

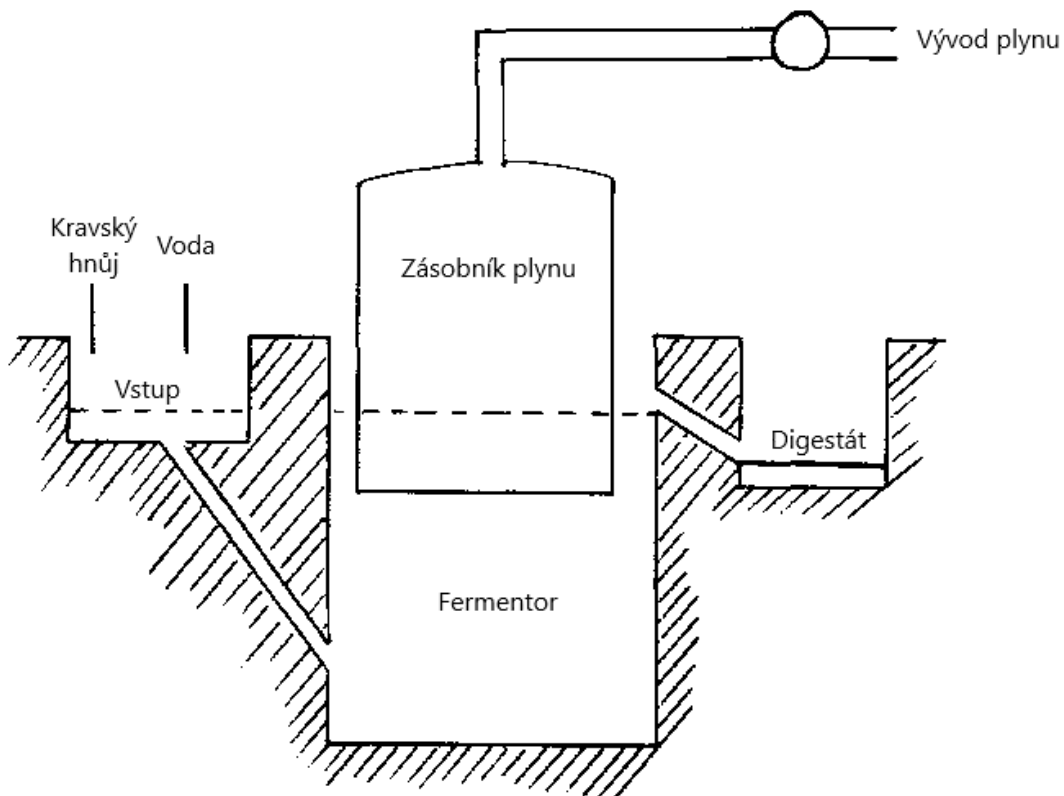
S ohledem na charakter provozu, fyzikální vlastnosti odpadu a charakter zařízení, které by mělo být přímo v provozu, bychom měli při výběru návrhu technologie zvažovat především snadnou manipulaci odpadu, snadnou obsluhu zařízení a nízké provozní náklady.

Vzhledem k vyššímu obsahu sušiny v kuchyňském odpadu a potřeby snadné manipulace a minimální náročnosti obsluhy se nabízí technologie suché fermentace, která probíhá diskontinuálně, tedy vsádkově. Toto by velmi snížilo provozní i pořizovací náklady na mini fermentor, jelikož technologie suché fermentace nepotřebuje zařízení jako high-density čerpadla, drtiče a míchací zařízení. Odpad je zanesen do fermentoru jen jednou v podobě vsázky a je vyjmut po doběhnutí celého procesu (podrobněji je tato technologie popsána v kapitole 4.2.1.3 a princip je znázorněn na obr. 6). Problémem v použití této technologie je nutnost použití několika vsádek najednou, aby byla zajištěna stabilní produkce bioplynu. Pokud bereme v úvahu dobu proběhnutí procesu AD u této technologie 4-5 týdnů [53] a pravidelný přísun odpadu, který by vzhledem jeho charakteru musel probíhat několikrát týdně, aby nedocházelo k jeho degradaci, museli bychom počítat s 8 až 20 vsádkovými reaktory, což by vedlo k vysokým nárokům na prostor a ve výsledku i k vyšším pořizovacím nákladům. Z tohoto důvodu není suchý vsádkový systém pro navrhovaný odpad a provoz vhodný.

Nabízí se tedy využití mokrého procesu AD, který je popsán v kapitole 4.2.1.3. Pro použití přímo v restauračním provozu bychom měli použít malý fermentor s pokud možno co nejjednodušší obsluhou a nízkou technickou náročností. Díky mokré fermentaci, při které se ideální obsah sušiny pohybuje kolem 10 %, bychom mohli uvažovat i kofermentaci s jedlými oleji.

Inspiraci můžeme hledat například na venkově v Indii a Pákistánu, kde mají dlouholetou tradici tzv. „Gobar fermentory“. „Gobar“ znamená v hindštině „kravský hnůj“ a ten je také nejčastější vstupní surovinou do těchto fermentorů. Konstrukčně jsou tyto Gobar fermentory velmi jednoduché. Samotný fermentor je zapuštěný v zemi a nad zemí je pouze jednoduchý zásobník plynu a nádrž pro vstupní suroviny a nádrž pro digestát [53].

Obrázek 8 Schéma jednoduchého Gobar fermentoru [54]



Na konci zásobníku plynu je zaveden odvod bioplynu, který je veden například přímo do plynového sporáku v kuchyni. V případně větších Gobar fermentorů s vyšší produkcí bioplynu je však možné bioplyn využívat například v kogenerační jednotce pro výrobu elektřiny a tepla. Tento nejjednodušší model (obr. 8) má zcela minimální pořizovací náklady, jelikož nepotřebuje žádná čerpadla a využívá samospádu vstupní a výstupní suroviny. Zbytek konstrukce je také velmi jednoduchý, jelikož je tvořen jen dvěma plastovými nebo plechovými sudy, které jsou do sebe vloženy, kde jeden tvoří funkci vyhnívací nádrže a druhý funkci jednoduchého plynoměru, u kterého lze k regulaci tlaku a množství plynu jednoduché závaží, například cihly. Posledním zařízením je plynová hadice opatřena ventilem, případně regulátor. I takto jednoduchá konstrukce může fungovat a pro jednoduchý účel zásobování plynu do kuchyňského hořáku je dostačující. Některé systémy obsahují i dělící přepážku uvnitř fermentorů, která ho dělí na dvě komory, ve kterých lépe probíhá vyhnívací proces. Cenově se

tyto systémy pohybují mezi 338 až 375 americkými dolary, což v přepočtu na české koruny nepředstavuje částku vyšší než 8 000 Kč [53 a 55].

Obrázek 9 Příklad použití jednoduchého Gobar fermentoru v Indii [53]



5.2 Vlastní měření a návrh technologie

První měření proběhlo v laboratořích Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze, kde byla stanovena vlhkost vzorku ve vážicí peci (termogravimetrickém analyzátoru) LECO TGA701 sušením 1 g vzorku při 105 °C do konstantní hmotnosti. Tato měřicí metoda odpovídá ČSN EN ISO 18134-3.

Dále byl v laboratořích TF ČZU stanoven obsah popelovin ve vážicí peci žháním stejného vzorku při 550 °C do konstantní hmotnosti za zvýšené koncentrace kyslíku, metoda měření byla provedena v souladu s ČSN EN ISO 18122.

Spalné teplo bylo měřeno v isoperibolickém kalorimetru LECO AC600 spálením v kalorimetrické bombě. Plnicí tlak byl 3 MPa a referenční teplota 28 °C. Pro měření byly použity nerezové spalovací kelímky. Zapálení bylo provedeno bavlněnou nití. Kalorimetr byl kalibrován pomocí kyseliny benzoové (materiál LECO), přepočty hodnot spalného tepla a výhřevnosti byly provedeny dle ČSN ISO 1928:2021. U vzorků kuchyňských odpadů bylo použito množství 1 g, u oleje 0,3 g a pomocná spalovací látka, což byla celulóza.

Elementární prvková analýza byla stanovena přístrojem LECO CHN628 společně s instrumentální spalnou metodou LECO pro biomasu. Pro stanovení C, H, N je vzorek (cca 0,1g) spalován v kyslíku při 950 °C. Standardy použité při kalibraci byly opět od firmy LECO: EDTA (kyselina ethylendiamintetraoctová), rýžová mouka, žitná mouka. Síra byla stanovena v přídatném modulu spálením přibližně 0,1g vzorku v kyslíku při 1200 °C.

Měření odebraných vzorků odpadů na tvorbu a složení bioplynu bylo provedeno v bioplynové laboratoři ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky v Praze Ruzyni, kde je instalováno měřící zařízení obsahující soustavu 12 fermentorů o objemu 1 litr, uložených ve

vyhříváné vodní lázni. Vyprodukovaný bioplyn je odváděn do skleněných plynojemů naplněných vodou.

Příprava pokusu probíhala podle normy DIN 38-414 S8, která se běžně používá při testech, kde se předpokládá míchání celých eudiometrických sad, používaných v akreditovaných laboratorních jednotkách, které vzhledem ke své jednotné konstrukci mohou způsobovat problémy. Měření také probíhalo dle doporučení formulovaných v normě VDI 4630, která poskytuje pravidla a specifikace pro testy ke stanovení produkce bioplynu organických materiálů, které slouží k interpretaci a provozní optimalizaci bioplynových stanic.

Jako substrát pro laboratorní měření byla použita směs odebraných vzorků kuchyňských odpadů a jedlého oleje smíchaných s fermentátem z bioplynové stanice Krásná Hora. Fermentát zároveň posloužil jako inokulum a jako substrát pro referenční měření. Celková sušina vzorku byla připravena na 10 % hm. Vzorek odpadů a fermentát byly namíchány v poměru 70:30 a přesně odváženy v hmotnosti 1 kg do pokusných fermentorů. Měření bylo provedeno analytickými váhami KERN ALJ 220 s chybou měření 0,1 mg. Zároveň byla během tohoto měření stanovena z hmotnosti vzorků měrná hmotnost kuchyňských odpadů - $\rho_{\text{BROKS}} = 780 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a měrná hmotnost odpadních olejů - $\rho_{\text{olej}} = 935 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Fermentory byly následně uzavřeny a vloženy do vodních lázní temperovaných na 42 °C (mezofilní podmínky) a 55 °C (termofilní podmínky) a byly zde ponechány po dobu 50 dní. Odebraný bioplyn byl odváděn do laboratorních plynojemů, což jsou skleněné nádoby naplněné vodou a otočené dnem vzhůru, do kterých je vyvedena hadička z fermentoru. Voda v plynojemech byla bioplynem vytlačována a ze stupnice na povrchu sklenice byla odečtena produkce bioplynu.

Složení bioplynu bylo zjišťováno pomocí analyzátoru bioplynu AIR LF a získané výsledky byly porovnány s výsledky měření zkušebního vzorku, který obsahoval pouze fermentát. Výtěžky metanu byly vztaženy na množství sušiny substrátu, která byla stanovena pomocí elektrické laboratorní muflové pece MF5/1100 °C/2,3kW/OMRON.

Obrázek 10 Laboratorní zařízení pro měření produkce bioplynu, nahoře jsou fermentory a dole plynojemy



Obrázek 11 Plynojemy měřícího zařízení



5.2.1 Vlastní měření a výsledky

Nejdříve byla provedena elementární látková analýza (tab. 3) v laboratořích Technické Fakulty České zemědělské univerzity v Praze, pomocí níž bylo stanoveno látkové složení vzorku kuchyňských odpadů a vzorku oleje. Vzorek (obr. 12) byl sušen při teplotě 60 °C a následně nadrobno namletý kuchyňským sekáčkem (obr. 13).

Tabulka 3 Výsledky elementární látkové analýzy

Vzorek	Vlhkost vzorku	Popel celkem	C	H	N	S	O	Spalné teplo za konst. tlaku	Výhřevnost za konst. tlaku
	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
BROKS	43,35	1,95	29,28	4,05	1,39	0,09	19,88	12,47	10,53
Olej	0,22	0,00	78,40	11,45	0,22	0,00	9,94	39,40	36,90

Obrázek 12 Vzorek kuchyňských odpadů



Obrázek 13 Usušený a namletý vzorek kuchyňských odpadů



Posléze byly v bioplynové laboratoři VÚZT odebrány a naváženy dva vzorky o celkové hmotnosti jednoho kilogramu. První vzorek obsahoval pouze fermentát o sušině 12 %, který byl naředěn vodou, aby vytvořil kal o 10 % sušiny z celkové hmotnosti. Tento vzorek byl použit jako referenční měření. Vzorec pro potřebnou hmotnost vody pro kal o potřebném množství sušiny lze získat z těchto dvou rovnic, které byly poskytnuty a konzultovány s laborantem VÚZT:

$$m_w \cdot W_w + m_f \cdot W_f = m_c \cdot W_c \quad (3)$$

$$m_c = m_w + m_f \quad (4)$$

Kde:

m_w je požadovaná hmotnost vody [g];

W_w je „množství vody ve vodě“ (100) [%];

W_f je množství vody ve fermentátu [%];

m_f je hmotnost fermentátu [g];

m_c je celková hmotnost výsledné směsi vody a fermentátu [g];

W_c je množství vody ve výsledné směsi vody a fermentátu [%].

Jelikož známe množství vody v každé složce konečného substrátu a známe hmotnost fermentátu, můžeme rovnice sloučit do jedné, ze které již můžeme dopočítat potřebné množství vody.

$$m_w = m_f \cdot \frac{(W_c - W_f)}{(W_w - W_c)} \quad (5)$$

Pro naředění prvního vzorku byla potřeba 200 g vody. Podobný výpočet (6) použijeme i pro druhý vzorek, ve kterém namícháme vzorek odpadu s fermentátem v poměru 70:30, tedy 700 gramů odpadů a 300 gramů fermentátu. Kuchyňské odpady byly namíchány s použitým jedlým rostlinným olejem v poměru 90:10. Větší množství oleje by ve fermentoru způsobovalo tvorbu vrstvy, která by komplikovala tvorbu bioplynu. Množství sušiny těchto odpadů bylo 56 %.

$$m_w = \frac{m_o \cdot (W_c - W_o) + m_f \cdot (W_c - W_f)}{(W_w - W_c)} \quad (6)$$

Kde:

m_o je hmotnost vzorku odpadů [g];

W_o je množství vody ve vzorku odpadů [g].

Potřebné množství vody pro druhý substrát bylo 3280 g. Celková hmotnost namíchaného 1. substrátu tedy činila 1200 g a druhý substrát vážil 4280 g. Pro účely měření bylo však potřeba použít pouze 1kg substrát. Pro zachování poměrného složení substrátů byly použity pro každou složku následující poměrové výpočty, které byly konzultovány s laborantem VÚZT:

$$m'_f = \frac{m_f}{m_c} \cdot m_{ps} \quad (7)$$

$$m'_w = \frac{m_w}{m_c} \cdot m_{ps} \quad (8)$$

$$m'_o = \frac{m_o}{m_c} \cdot m_{ps} \quad (9)$$

Kde:

m_{ps} je hmotnost původního substrátu (ta je vždy rovna 1000 g);

m'_f je výsledná hmotnost fermentátu v 1kg substrátu [g];

m'_w je výsledná hmotnost vody v 1kg substrátu [g];

m'_o je výsledná hmotnost vzorku odpadů v 1kg substrátu. [g]

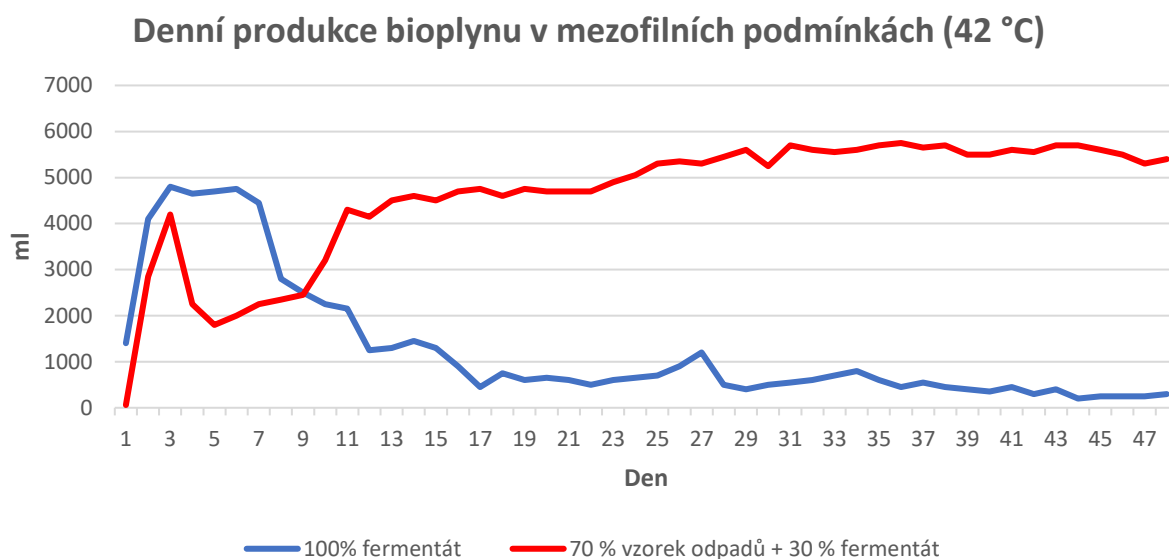
Výsledné hodnoty obou substrátů potřebné pro další výpočty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 4 Vybrané vlastnosti substrátů

	Fermentor	1	2
Fermentát	hmotnost (g)	1000	300
	sušina (%)	12	12
Vzorek odpadu	hmotnost (g)	0	700
	sušina (%)	56	56
	požadovaná sušina substrátu (%)	10	10
	celková hm. původního substrátu (g)	1000	1000
	požadovaná hmotnost vody (g)	200	3280
	(l)	0,2	3,28
	výsledná hmotnost substrátu (g)	1200	4280
	Pro celkovou hmotnost substrátu 1 kg:		
Fermentát	hmotnost (g)	833	70
Vzorek odpadu	hmotnost (g)	0	164
	požadovaná hmotnost vody (g)	167	766
	kontrola	1000	1000

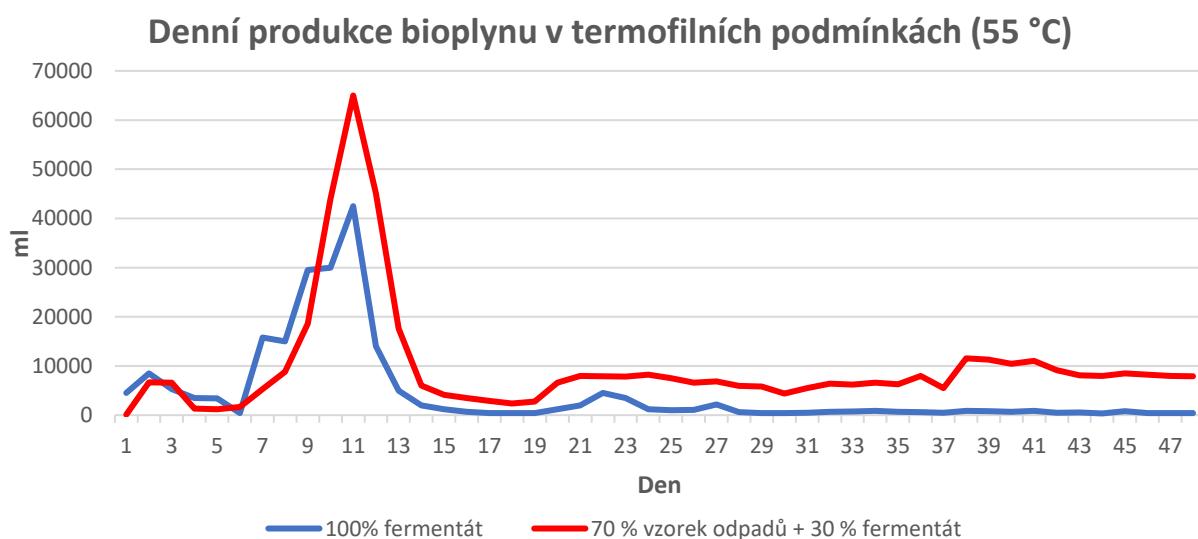
Po přesném odměření na laboratorních vahách byly připravené substráty umístěny do zkušebních fermentorů a hermeticky uzavřeny. Po dobu 48 dní byla na denní bázi odečítána produkce vzniklého bioplynu. Každá vsádka, tzn. referenční vzorek obsahující pouze fermentát a druhý vzorek namíchaný z fermentátu a vzorku odpadů (kuchyňské odpady a olej) byla měřena jak v mezofilních podmínkách (42 °C), tak i v podmínkách termofilních (55 °C). Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v příloze 1 – tabulky p. 2, včetně kumulativní funkce produkce bioplynu, která znázorňuje celkovou výtěžnost bioplynu. Porovnání produkce bioplynu referenčního měření a měření s vzorky odpadů jsou znázorněny v mezofilních podmínkách na obr. 12. Porovnání obou produkcí v termofilních podmínkách je znázorněno na obr. 13. Na obr. 14 je pak porovnána kumulativní produkce substrátu se vzorkem odpadů v mezofilních a termofilních podmínkách.

Obrázek 14 Porovnání denní produkce obou substrátů v mezofilních podmínkách



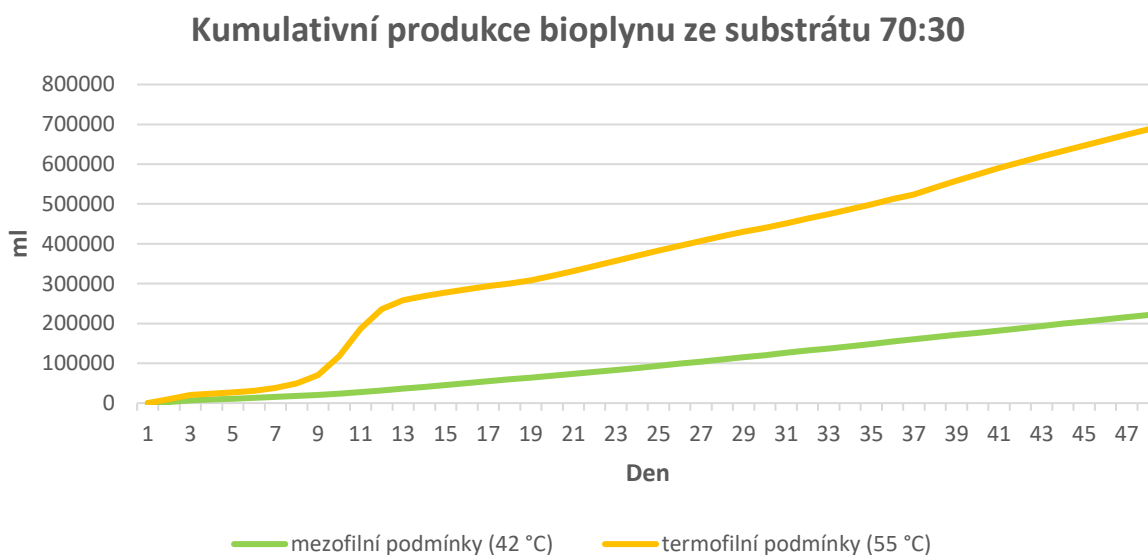
Na obr. 12 je možné pozorovat mnohem větší produkci bioplynu v případě fermentoru s odebraným vzorkem odpadů, byť byla v prvních dnech produkce bioplynu v tomto fermentoru poněkud nestabilní a nástup byl od nástupu produkce bioplynu z fermentátu opožděn, což lze přičíst faktu, že fermentát již touto nabíhající fází prošel v bioplynové stanici. Dále lze pozorovat klesající produkci bioplynu z fermentátu, což lze opět přisoudit tomu, že fermentát je org. látkou, která svůj metanizační potenciál z velké části již vyčerpala v BPS. Naopak tam, kde produkce z fermentátu začala stagnovat, se produkce bioplynu z kuchyňských odpadů začala přibližovat stabilním hodnotám mezi 4,5 l až 5,5 l denně. Tato fáze nastala po prvních dvou týdnech.

Obrázek 15 Porovnání denní produkce obou substrátů v termofilních podmínkách



Z obr. 13 lze pozorovat, že termofilní podmínky způsobily mnohem větší produkci bioplynu z org. hmoty. Na první pohled je dobře pozorovatelný „peak“ produkce, který nastal kolem jedenáctého dne měření. V dalších dnech se produkce bioplynu z kuchyňských odpadů ustálila na hodnotách 5 – 10 l denně.

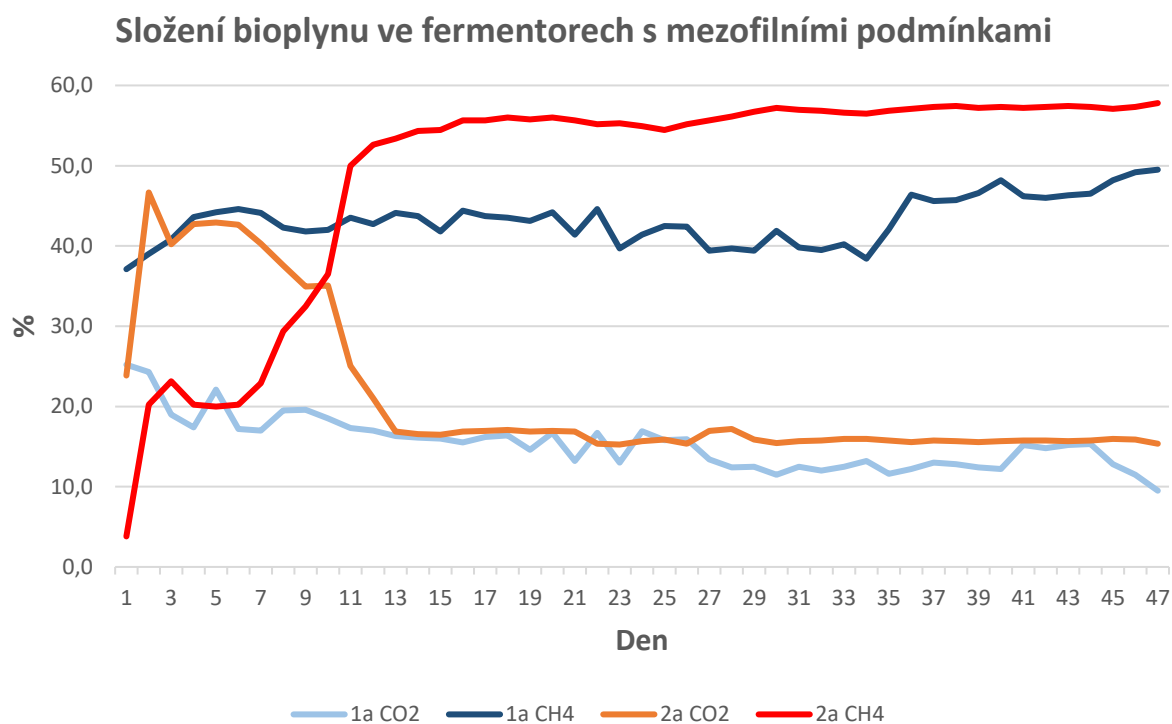
Obrázek 16 Kumulativní produkce bioplynu substrátu s vzorkem odpadů v mezofilních a termofilních podmínkách



Obr. 14 znázorňuje graficky to, co je z předchozích dvou grafů produkce patrné. Kumulativní celková produkce ve vsázce se 70 % BROKS a 30 % fermentátu byla mnohem vyšší při termofilních podmínkách, a to téměř trojnásobně.

Současně byl na denní bázi vzniklý bioplyn analyzován pomocí přístroje AIR LF. Byly sledovány dvě hlavní složky bioplynu - metan a oxid uhličitý, a to po celou dobu měření (výsledky měření jsou uvedeny v Příloze – tabulce p. 2). Výsledky byly zaneseny do dvou grafů, jeden porovnával složení bioplynu v mezofilních podmínkách - 42 ° C (obr. 15) a druhý porovnával složení bioplynu v podmínkách termofilních, tj. 55 ° C (obr. 16).

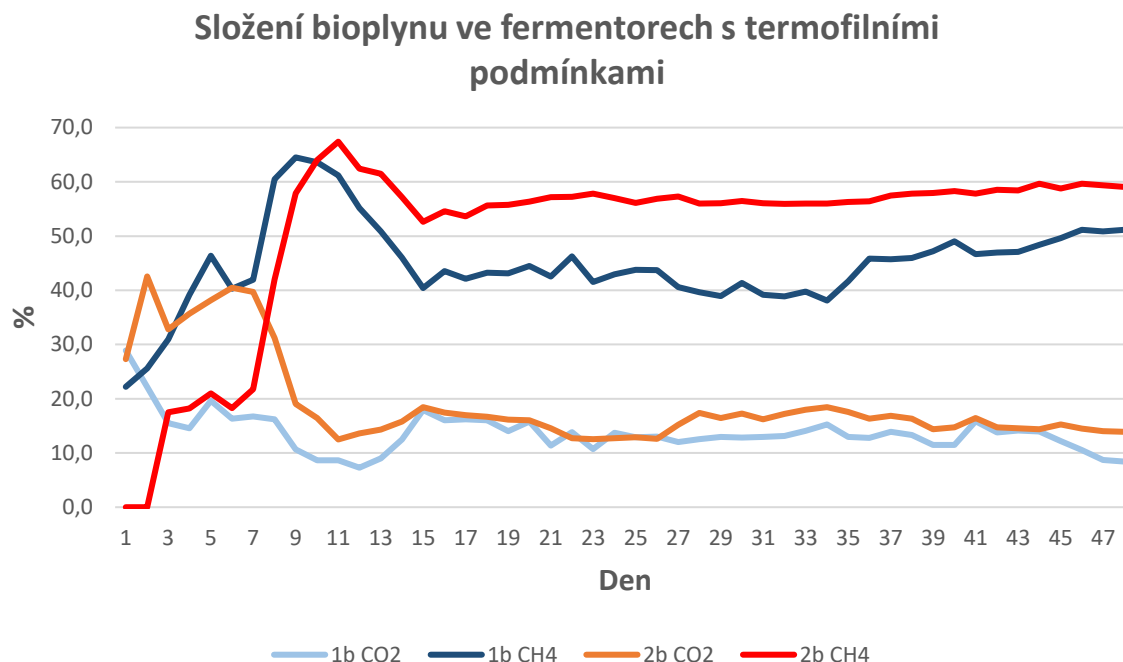
Obrázek 17 Složení bioplynu ve fermentorech s mezofilními podmínkami



Na obr. 15 lze porovnat poměrné složení dvou hlavních složek bioplynu – CH₄ a CO₂. Na první pohled lze pozorovat, že produkce obou plynů byla ve fermentoru s kuchyňskými odpady mnohem stabilnější a produkce metanu se po dvou týdnech měření stabilizovala na hodnotách kolem 55 % z celkového objemu bioplynu, což byl znatelný nárůst oproti čistému

fermentátu. Poměrné množství CO₂ bylo v obou fermentorech podobné a pohybovalo se kolem 15 %.

Obrázek 18 Složení bioplynu ve fermentorech s termofilními podmínkami



Obr. 16 sleduje stejné hodnoty ze stejných substrátů, nicméně zde jsou fermentory umístěny v termofilních podmínkách. Oproti předchozímu grafu zde lze pozorovat „peak“ poměrné produkce metanu a to kolem 11 dne měření (opět lze u substrátu s BROKS pozorovat zpoždění oproti fermentátu o cca 2 dny). Zde se množství metanu blížilo k 70 % objemu. Po prvních dvou týdnech opět došlo ke stabilizaci produkce mezi hodnotami 55 – 60 %

Z výsledků měření lze na první pohled usoudit, že mnohem větší produkce bioplynu i metanu byla zaznamenána ve fermentoru s inokulem a se substrátem v podobě kuchyňských odpadů a oleje. Tento předběžný výsledek je potvrzením hypotézy o vhodnosti kuchyňského odpadu pro technologii anaerobní digesce. Produkce ze samotného substrátu se dopočítá pomocí vzorce pro konverzi produkce ze smíšeného substrátu (10), jelikož samotný substrát odpadů by nebyl možný do zkušebních fermentorů vložit z důvodu absence inokula.

Dílní výsledky porovnávající mezofilní a termofilní podmínky také zobrazují mnohem větší produkci bioplynu u termofilního systému, který má ale mnohem větší energetické nároky. Co se týče složení bioplynu, tak to se mezi termofilním a mezofilním systémem příliš nelišilo a produkce metanu se po cca dvou týdnech stabilizovala na stejné hodnotě.

Pro další návrh technologie bude přepočítána produkce metanu z odpadního substrátu očištěná od produkce inokula. Tímto výpočtem zjistíme vlastnosti bioplynu, který by vznikl při vsázce skládající se čistě z kuchyňských odpadů, a to především jeho výhřevnost.

Nejvýhřevnější a nejvýznamnější složkou bioplynu je právě metan, jehož výhřevnost je 35,8 MJ.m⁻³ a spalné teplo 39,8 MJ.m⁻³ [56]. V prvé řadě ale musíme spočítat skutečnou produkci bioplynu u odpadního substrátu, která je zobrazena v Příloze – tabulka p. 3 a obr. 17 a pro kterou můžeme použít následující vztah, který byl poskytnut pracovníkem laboratoře VÚZT:

$$y_{BO} = \frac{y_{BS} - 0,3 \cdot y_{BF}}{0,7} \quad (10)$$

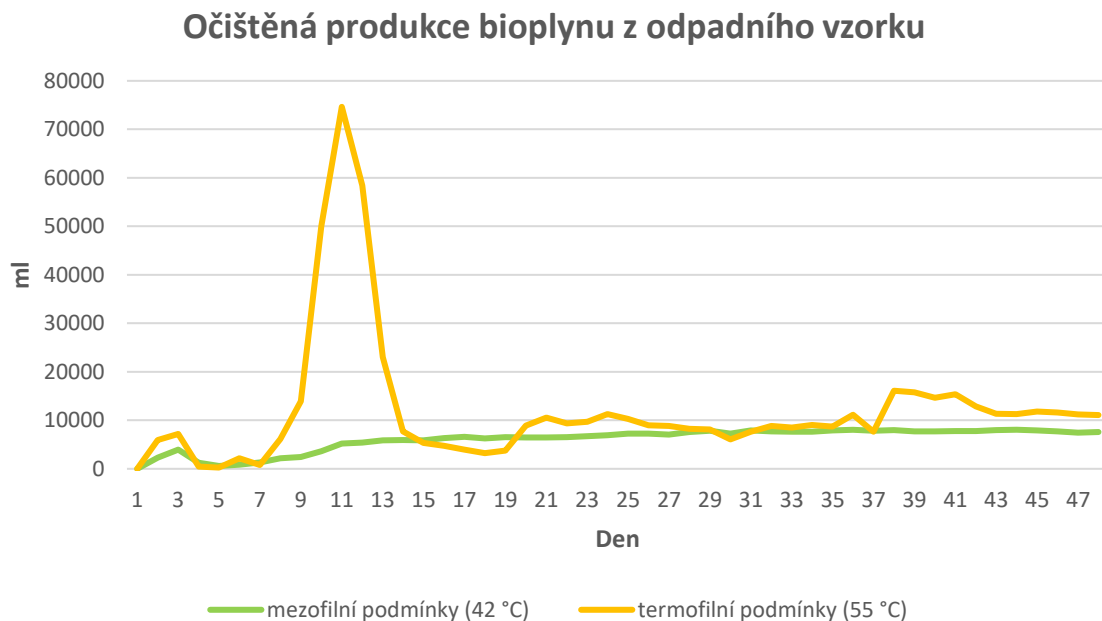
Kde:

y_{BO} je očištěná produkce bioplynu ze vzorku odpadů [ml];

y_{BS} je produkce bioplynu ze směsi inokula a vzorku odpadů [ml];

y_{BF} je produkce bioplynu z fermentátu [ml].

Obrázek 19 Porovnání očištěné produkce bioplynu v mezofilních a termofilních podmínkách



Na obr. 17 je opět patrná mnohem vyšší produkce bioplynu při termofilních podmínkách. Je zde také patrný „peak“ termofilní AD kolem 11 dne. V porovnání

s termofilními podmínkami je produkce bioplynu v mezofilních podmínkách sice mnohem menší ale za to stabilnější a bez větších výkyvů.

Podobně jako produkci bioplynu přepočteme i relativní množství metanu podle následujícího vzorce (dílní výsledky z denní produkce jsou znázorněny v tabulce p. 4 a obr. 18):

$$y_{MO} = \frac{y_{MS} - 0,3 \cdot y_{MF}}{0,7} \quad (11)$$

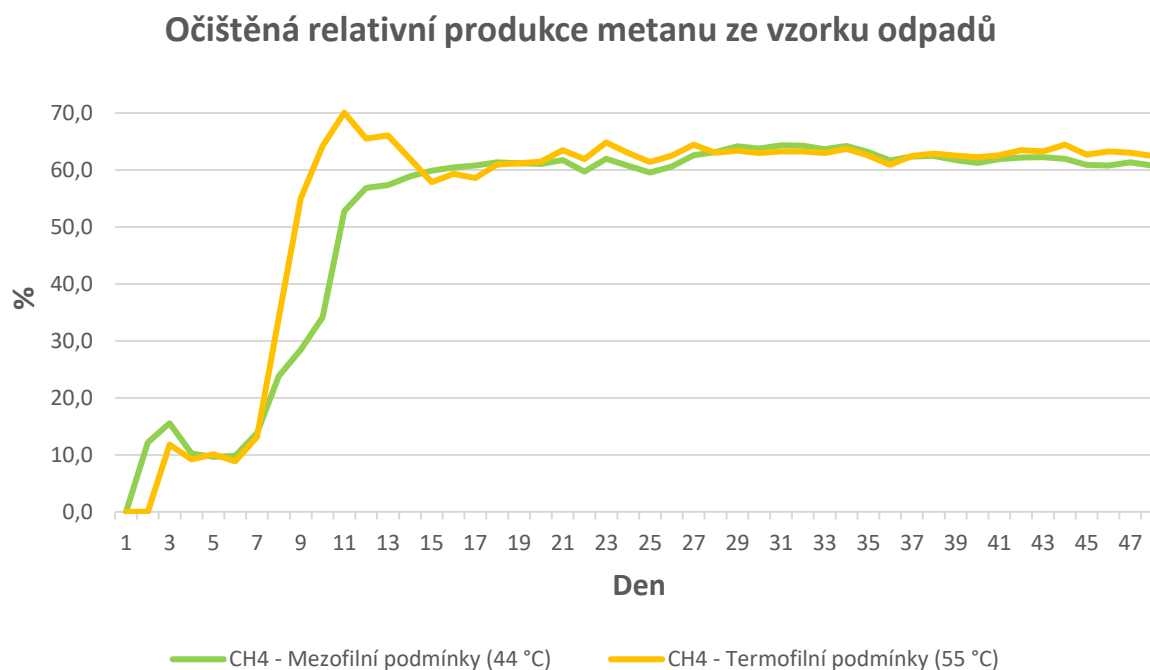
Kde:

y_{MO} je očištěná relativní produkce metanu ze vzorku odpadů [%];

y_{MS} je relativní produkce metanu ze směsi inokula a vzorku odpadů [%];

y_{MF} je relativní produkce metanu z fermentátu [%].

Obrázek 20 Porovnání očištěné relativní produkce metanu ze vzorku odpadů



Na obr. 18 lze vidět, že v třetím týdnu měření se produkce metanu u obou fermentorů stabilizovala a pro substrát složený pouze z BROKS by se ustálila v hladině 60 – 65 %. Hlavním rozdílem mezi termofilní a mezofilní fází je pomalejší nástup u termofilní fáze. Na druhou stranu se u termofilní fáze opět objevuje „peak“ kolem jedenáctého dne, který dosahuje 70 % metanu.

Pro výslednou kumulovanou denní měrnou produkci metanu a kumulovanou měrnou produkci metanu je potřeba mezi sebou měrnou produkci bioplynu a relativní produkci metanu

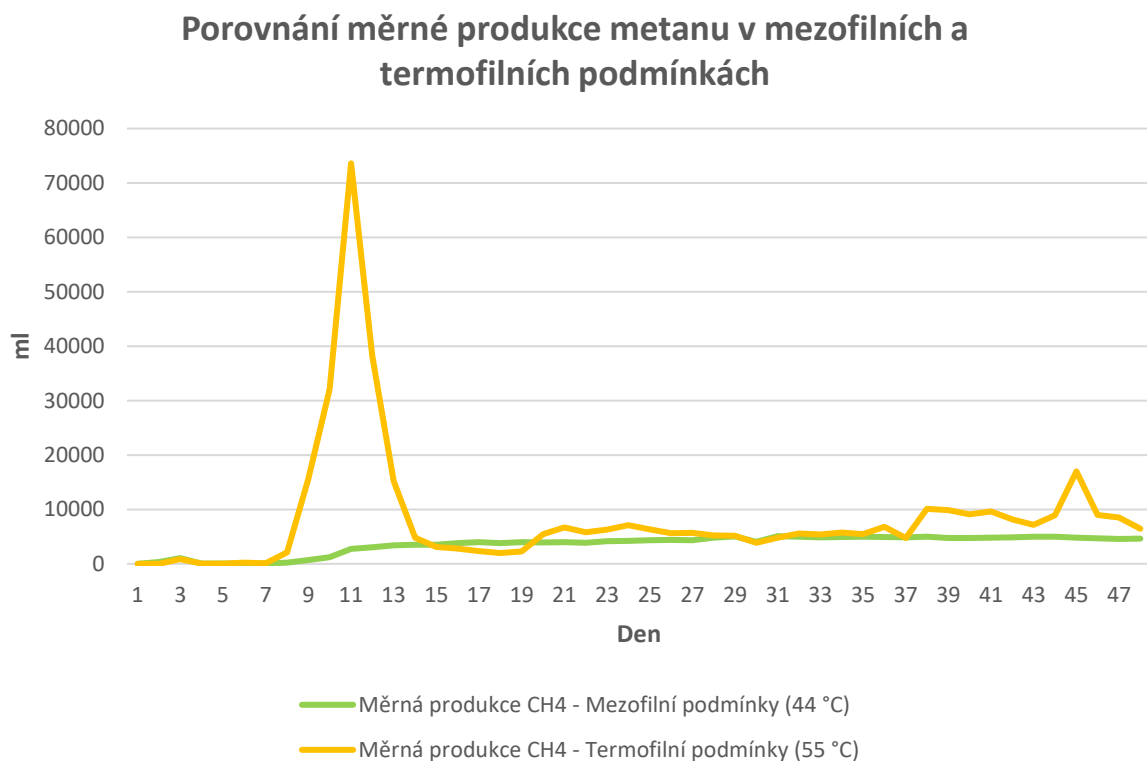
vynásobit (vztah 12). Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v příloze p.5 a výsledná produkce metanu je znázorněna na obr. 19 a obr. 20.

$$Y_{MO} = y_{BO} \cdot y_{MO} \quad (12)$$

Kde:

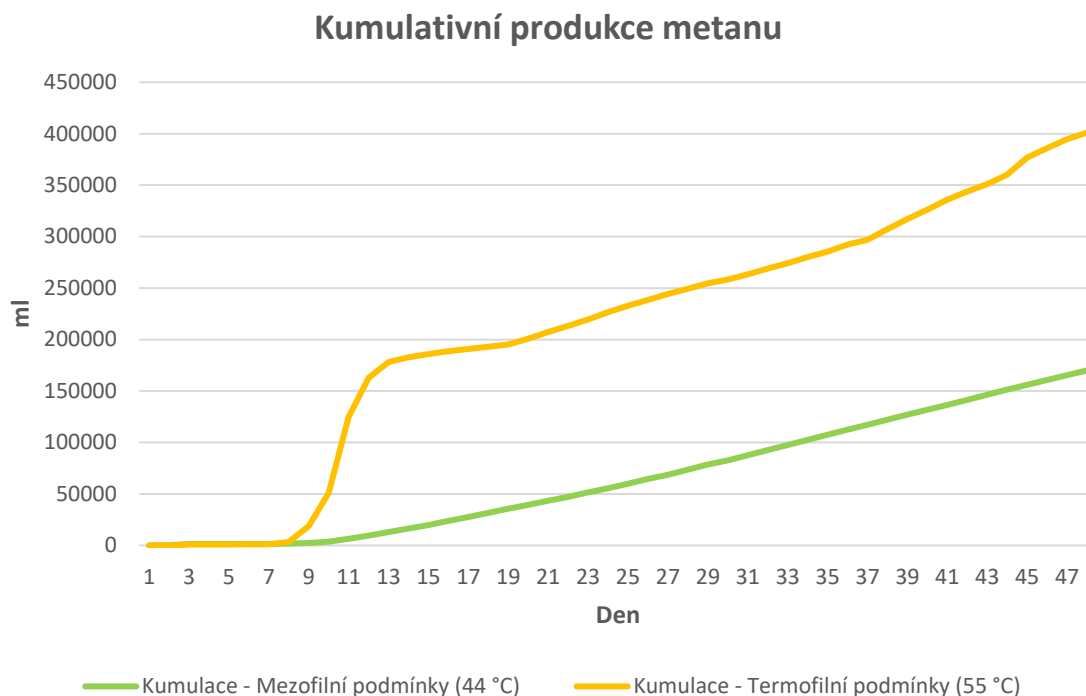
Y_{MO} je výsledná měrná produkce metanu vzorku odpadů

Obrázek 21 Porovnání měrné produkce metanu ze vzorku odpadů v mezofilních a termofilních podmínkách



Obr. 19 víceméně kopíruje obr. 17 a potvrzuje premisu větší metanové výtěžnosti při termofilních podmínkách. Mezofilní podmínky jsou méně výtěžné, produkce je ale stabilnější.

Obrázek 22 Kumulativní produkce metanu ze vzorku odpadů v mezofilních a termofilních podmínkách



Z obr. 20, který značí celkovou kumulativní produkci metanu ze vzorku kuchyňských odpadů, je patrné, že mnohem výnosnější jsou termofilní podmínky, při nichž bylo vyprodukováno více než dvojnásobné množství metanu. Jak v mezofilních, tak v termofilních podmínkách byly výtěžky metanu v prvním týdnu minimální a proces začal přinášet znatelné výtěžky metanu až od druhého týdne.

5.2.2 Návrh technologie

V následující kapitole bude proveden návrh technologie mini fermentoru z naměřených vstupních dat. Bude navržena především velikost (objem) navrhovaného mini fermentoru, kapacita plynojemu, doba zdržení substrátu apod.

Pro výpočty budou použity následující fyzikální a jiné vlastnosti odpadu a provozu, které byly zjištěny předchozím měřením nebo byly poskytnuty vedoucím provozu:

Tabulka 5 Základní vlastnosti odpadu pro další výpočty

Parametr	Hodnota parametru
Denní produkce BROKS ρ_{BROKS}	30 kg·d ⁻¹
Denní produkce oleje ρ_{ol}	20 l·d ⁻¹
Měrná hmotnost BROKS ρ_{BROKS}	780 kg·m ⁻³
Měrná hmotnost oleje ρ_{ol}	935 kg·m ⁻³

5.2.2.1 Užitený objem reaktoru

Prvním a nejdůležitějším parametrem pro další návrh je **užitný objem reaktoru V_R** , který udává potřebný objem reaktoru, ve kterém bude umístěn substrát [57]:

$$V_R = \tau_z \cdot Q_S \quad (13)$$

Kde:

V_R je užitený objem reaktoru [m^3]

τ_z je střední doba zdržení substrátu v reaktoru [d]

Q_S je denní dávka surového materiálu za den do fermentoru [$m^3 \cdot d^{-1}$]

Při provedeném měření byla doba zdržení substrátu ve fermentoru 48 dní. I na konci této doby však tvorba bioplynu stále pokračovala, někteří autoři uvádí dobu zdržení, po kterou stále běží proces metanizace jako 90 dní [58]. Pro další výpočet budete brát v potaz dobu zdržení 60 dní.

Denní dávku surového materiálu v m^3 získáme podělením hmotnosti denní produkce měrnou hmotností materiálu. Předpokládáme, že vsázka bude probíhat jednou denně. Uvažujeme-li kofermentaci BROKS s jedlými oleji, neměli bychom překračovat množství oleje 10 % v sázce, z důvodu případného vzniku vrstvy oleje v reaktoru, která by mohla mít nepříznivý vliv na produkci bioplynu.

$$Q_{BROKS} = \frac{p_{BROKS}}{\rho_{BROKS}} \quad (14)$$

$$Q_{BROKS} = \frac{30}{780} = 0,0385 \text{ m}^3 \cdot d^{-1}$$

Kde:

Q_{BROKS} je denní dávka surového BROKS do fermentoru [$m^3 \cdot d^{-1}$].

$$Q_{ol} = 0,1 \cdot Q_{BROKS} = 0,0039 \text{ m}^3 \cdot d^{-1} \quad (15)$$

Kde:

Q_{ol} je denní dávka surového oleje do fermentoru [$m^3 \cdot d^{-1}$].

$$Q_O = Q_{BROKS} + Q_{ol} = 0,0424 \text{ m}^3 \cdot d^{-1} \quad (16)$$

Kde:

Q_O je denní dávka odpadů do fermentoru [$m^3 \cdot d^{-1}$].

Následně je potřeba dopočíst množství vody, které je potřeba přidat k této směsi odpadů, které je známo z předchozí kapitoly, že má množství vody 44 %. Cílené množství vody v substrátu je 90 %. Pomocí jednoduché úpravy vzorců 5 a 6 můžeme dopočítat potřebný objem vody pro namíchání 10% kalu. Tento výpočet by mohla používat i obsluha fermentátu, pro určení objemu vodu pro potřebnou koncentraci substrátu.

$$Q_w = Q_o \cdot \frac{(W_s - W_o)}{(1 - W_s)} = 0,195 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \quad (17)$$

Kde:

Q_w je denní dávka vody, potřebná pro namíchání substrátu o 10 % sušiny [$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$];

W_o je množství vody v odpadech [-];

W_s je požadované množství vody v substrátu (90 %) [-].

Celková hmotnost denního substrátu tedy je:

$$Q_s = Q_o + Q_w = 0,2374 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \quad (18)$$

Dále tedy můžeme dopočíst užitečný objem reaktoru podle vzorce 13:

$$V_R = \tau_z \cdot Q_s = 60 \cdot 0,0392 = \mathbf{14,244 \text{ m}^3}$$

Je doporučeno dodržovat poměr mezi výškou fermentoru a průměrem fermentoru H:D zhruba 2:1. [59] Můžeme tedy dosazením do rovnice pro výpočet objemu válce (což je navrhovaný tvar hlavní části fermentoru) získat velikost průměru podstavy a výšky hlavní části fermentoru:

$$V_R = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 H \quad (18)$$

$$V_R = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 2D \quad (19)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{2V_R}{\pi}} = \mathbf{2,085 \text{ m}} \quad (20)$$

$$H = 2D = \mathbf{4,170 \text{ m}} \quad (21)$$

Kde:

D je průměr podstavy [m];

H je výška hlavní části reaktoru [m].

Nad užitný objem se doporučuje přidat alespoň dalších 25 % z objemu užitého reaktoru pro prvotní zachycení denní produkce bioplynu [59], zároveň bude mít vršek fermentoru často používaný „vejcovitý tvar“:

$$V_P = 0,25 \cdot V_R = 0,25 \cdot 14,244 = 3,561 \text{ m}^3 \quad (22)$$

Kde:

V_P je požadovaný přidaný objem fermentoru [m^3].

Dále lze z empirického vzorce pro objem tohoto oválného vršku dopočítat jeho skutečný objem a potvrdit tak původní premisu, aby tento vršek měl alespoň 25 % užitého objemu [59]:

$$V_{PS} = \frac{D^3}{1,1184} = 8,1 \text{ m}^3 \quad (23)$$

Kde:

V_{PS} je skutečný objem oválného vršku fermentoru [m^3].

Přidaný vršek splňuje podmínku, tím pádem jsou známy veškeré rozměry fermentoru a lze postoupit k návrhu dalších technických zařízení.

5.2.2.2 Spotřeba tepelné energie

Dalším důležitým prvkem pro správný chod fermentoru je dodržení termofilních podmínek - 55 °C. To znamená, že reaktor musí být vybaven otopným systémem. Pro potřebu tepla pro otopný systém použijeme následující vztah [60]:

$$Q_K = m_S \cdot c_S \cdot (T_2 - T_1) \quad (24)$$

Kde:

Q_K je teplo potřebné pro ohřev substrátu [J];

m_S je denní hmotnost substrátu [kg];

c_S je měrná tepelná kapacita substrátu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

T_1 je teplota vstupujícího substrátu [°C];

T_2 je teplota uvnitř nádrže [°C].

Pro určení denní hmotnosti substrátu sečteme hmotnosti jednotlivých složek v jejich poměru:

$$m_S = \rho_{BROKS} \cdot Q_{BROKS} + \rho_{ol} \cdot Q_{ol} + \rho_W \cdot Q_W = 228,6 \text{ kg} \quad (25)$$

Kde:

ρ_W je hustota vody - $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Pro určení měrné tepelné kapacity substrátu sečteme měrné tepelné kapacity jednotlivých prvků (tab. TATO) substrátu v jejich poměrovém množství dle tab. 3.

Tabulka 6 Hodnoty měrných tepelných kapacit vody a vybraných prvků [61]

	voda	uhlík	vodík	dusík	síra	kyslík
měrná tepelná kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	4 187	837	14 304	1 040	720	917

Nejprve je nutné spočítat měrnou tepelnou kapacitu vzorku odpadů a oleje:

$$\begin{aligned} c_{BROKS} &= c_W \cdot W_{BROKS} + c_C \cdot C_{BROKS} + c_H \cdot H_{BROKS} + c_N \cdot N_{BROKS} + c_S \cdot S_{BROKS} + c_O \cdot O_{BROKS} \\ O_{BROKS} &= 2837,572 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (26)$$

Kde:

c_{BROKS} je měrná tepelná kapacita BROKS [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_W je měrná tepelná kapacita vody [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_C je měrná tepelná kapacita uhlíku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_H je měrná tepelná kapacita vodíku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_N je měrná tepelná kapacita dusíku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_S je měrná tepelná kapacita síry [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_O je měrná tepelná kapacita kyslíku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

W_{BROKS} je množství vody v BROKS [-];

C_{BROKS} je množství uhlíku v BROKS [-];

H_{BROKS} je množství vodíku v BROKS [-];

N_{BROKS} je množství dusíku v BROKS [-];

S_{BROKS} je množství síry v BROKS [-];

O_{BROKS} je množství kyslíku v BROKS [-].

$$c_{ol} = c_W \cdot W_{ol} + c_C \cdot C_{ol} + c_H \cdot H_{ol} + c_N \cdot N_{ol} + c_S \cdot S_{ol} + c_O \cdot O_{ol} = 2396,177 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (27)$$

Kde:

W_{ol} je množství vody v oleji [-];

C_{ol} je množství uhlíku v oleji [-];

H_{ol} je množství vodíku v oleji [-];

N_{ol} je množství dusíku v oleji [-];

S_{ol} je množství síry v oleji [-];

O_{ol} je množství kyslíku v oleji [-].

Následně lze dopočíst celkovou měrnou tepelnou kapacitu substrátu sečtením měrných tepelných kapacit jednotlivých složek substrátu v jejich poměru.

$$c_S = c_{BROKS} \cdot \frac{m_{BROKS}}{m_S} + c_{ol} \cdot \frac{m_{ol}}{m_S} + c_W \cdot \frac{m_W}{m_S} = 3981,82 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (28)$$

Kde:

c_S je měrná tepelná kapacita substrátu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

m_{BROKS}, m_{ol}, m_W jsou dílčí hmotnosti složek substrátu v denní vsázce [kg].

Teplotu T_2 uvnitř nádrže předpokládáme $55 \text{ }^\circ\text{C}$, aby byly dodrženy potřebné teplotní podmínky pro termofilní prostředí. Teplotu vstupujícího substrátu T_1 bude odpovídat teplotě provozu, tedy $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Nyní už můžeme dosadit do vztahu 24:

$$Q_K = m_S \cdot c_S \cdot (T_2 - T_1) = 228,6 \cdot 3981,82 \cdot (55 - 20) = 31858542 \text{ J} = \mathbf{31,859 \text{ MJ}}$$

Teplo potřebné pro ohřev substrátu činí 31,859 MJ, což odpovídá přibližně **8,85 kWh**. Kromě tepla pro ohřev substrátu je nutné spočítat i teplo, které se spotřebuje pro pokrytí tepelných ztrát mezi fermentorem a okolním prostředím [62].

$$Q_Z = k \cdot A \cdot (T_2 - T_3) \quad (29)$$

Kde:

Q_Z jsou tepelné ztráty do okolí [W];

k je koeficient prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

A je plocha prostupu tepla [m^2];

T_2 je teplota uvnitř nádrže [$^\circ\text{C}$];

T_3 je teplota vně nádrže [$^\circ\text{C}$].

Jelikož bude velká část fermentoru umístěna v zemi a menší část nad zemí, je potřeba tepelné ztráty prostupem rozdělit na dvě dílčí složky. Pro první část umístěnou v zemi budeme

předpokládat že sdílená plocha bude odpovídat plášti válce bez horní podstavy a jako izolace bude použit polystyren o tloušťce 0,05 m a o tepelné vodivosti $0,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Fermentor bude umístěn v nezámrazné hloubce a teplota půdy bude uvažována $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Koeficient přestupu tepla mezi substrátem a stěnou fermentoru bude $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a mezi stěnou a půdou $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [63]. Jako materiál pro fermentor bude použit nerezový válcovaný plech za tepla z nerezové austenitické oceli o tloušťce 0,08 m a tepelné vodivosti $14,538 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [61]. Vzorec 29 tedy můžeme upravit na:

$$Q_{z_1} = k_1 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \pi \right] + (H \cdot \pi \cdot D) \right\} \cdot (T_2 - T_{3_1}) \quad (30)$$

Kde:

Q_{z_1} jsou tepelné ztráty podzemní části fermentoru [W];

k_1 je koeficient prostupu tepla podzemní části fermentoru [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

D je průměr fermentoru [m];

H je výška podzemní části fermentoru [m];

T_{3_1} je teplota okolní půdy [$^\circ\text{C}$].

Dále je nutné spočítat koeficient prostupu tepla podzemní části fermentoru k_1 [62]:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,904 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (31)$$

Kde:

α_1 je koeficient přestupu tepla mezi substrátem a stěnou fermentoru [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

α_2 je koeficient přestupu tepla mezi stěnou a půdou [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

d_i je tloušťka „i“ vrstvy [m];

λ_i je tepelná vodivost „i“ vrstvy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Následně je možné dosadit do rovnice 30 a dopočítat:

$$Q_{z_1} = k_1 \cdot \left\{ \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \pi \right] + (H \cdot \pi \cdot D) \right\} \cdot (T_2 - T_{3_1}) = 1388,9 \text{ W}$$

K výpočtu nadzemních ztrát využijeme podobný vzorec jako vzorec 30, jen jako plochu budeme uvažovat pro zjednodušení polovinu pláště koule. Pro výpočet koeficient prostupu tepla použijeme dílčí koeficienty přestupu tep

la mezi bioplynem a stěnou $15 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$ a mezi stěnou a venkovní vzduchem také $15 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$ [63]. Teplotu okolního vzduchu budeme uvažovat $20 \text{ }^\circ\text{C}$. U nadzemní části budeme počítat se stejnou izolací jako u podzemní části fermentoru.

$$Q_{Z_2} = k_2 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{2} \cdot (T_2 - T_{3_2}) \quad (32)$$

Kde:

Q_{Z_2} jsou tepelné ztráty podzemní části fermentoru [W];

k_2 je koeficient prostupu tepla nadzemní části fermentoru $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$;

T_{3_2} je teplota okolního vzduchu $[^\circ\text{C}]$.

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_4}} = 0,878 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (33)$$

Kde:

α_3 je koeficient přestupu tepla mezi bioplynem a stěnou fermentoru $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$;

α_4 je koeficient přestupu tepla mezi stěnou fermentoru a okolním vzduchem $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$.

Nyní lze dosadit do rovnice 32:

$$Q_{Z_2} = k_2 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{2} \cdot (T_2 - T_{3_2}) = 209,8 \text{ W}$$

Sečtením obou dílčích ztrát získáme celkové tepelné ztráty fermentoru:

$$Q_Z = Q_{Z_1} + Q_{Z_2} = \mathbf{1598,7 \text{ W} = 1,59 \text{ kW}} \quad (34)$$

Při předpoklade nepřetržitého denního ohřevu můžeme převést potřebné teplo na kWh. Celková potřebná energie pro ohřev fermentoru je tedy rovna:

$$Q_F = Q_k + Q_Z \cdot 24 = 8,85 \text{ kWh} + (1,59 \cdot 24) \text{ kWh} = \mathbf{47 \text{ kWh}} \quad (35)$$

Celková denní tepelná energie, která je nutná přivést do otopného systému fermentoru je přibližně **47 kWh**.

5.2.2.3 Spotřeba elektrické energie

Elektrická energie spotřebovaná na provoz mini fermentoru se bude skládat z energie potřebné pro míchací zařízení uvnitř fermentoru, mixéru pro homogenizaci vstupního substrátu v přípravné nádrži a čerpadla pro nádrž s digestátem. Tyto zařízení a jejich elektrická spotřeba jsou uvedeny v tab. 6

Tabulka 7 Spotřeba el. energie jednotlivých zařízení fermentoru [64 a 65]

Zařízení	Výkon [kW]	Denní čas provozu [h]	Spotřeba el. energie [kWh]
Fluimac Mixer RLV300	12	0,5	6
2x Tyčové míchadlo DN-MIX 300	6	0,03	0,18
Kalové čerpadlo COK 50	1,3	0,03	0,039
Celkem			6,22

Celková denní spotřeba elektrické energie fermentoru bude **6,1 kWh**. Je tedy potřeba, aby vybraná kogenerační jednotka pokryla tepelné a elektrické potřeby fermentoru.

5.2.2.4 Výběr kogenerační jednotky

Nejprve z předchozích měření produkce bioplynu určíme průměrnou denní produkci bioplynu:

$$\bar{y}_{BP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{BP} = 0,013406 \text{ m}^3 \quad (36)$$

Kde:

\bar{y}_{BP} je průměrná denní produkce bioplynu [m^3];

y_{BP} je denní produkce bioplynu [m^3];

n je počet dní měření [-].

Tato produkce počítá s množstvím BROKS a oleje pro 1kg substrát, hmotnost směsi BROKS a oleje spočteme obdobně jako v rovnici (9). Tato hmotnost bude dána do poměru se skutečnou vsázkou a tímto poměrem bude vynásobena průměrná denní produkce bioplynu (36). Celý tento vztah následně vynásobíme počtem vsázek v reaktoru, který by měl při vsázce jednou denně odpovídat zdržné době, tj. 60:

$$m_o'' = \frac{m_o}{m_c} \cdot m_{ps} = 179 \text{ g} \quad (37)$$

Kde:

m_o'' je hmotnost vzorku odpadů ve fiktivní vsázce bez inokula ve zkušebním fermentoru [g];

m_o je hmotnost vzorku odpadů [g];

m_{ps} je hmotnost původního substrátu (ta je vždy rovna 1000 g);

m_c je celková hmotnost výsledné směsi vody a substrátu [g];

$$y_{BP_{MF}} = \frac{m_{BROKS} + m_{ol}}{m_o''} \cdot \bar{y}_{BP} \cdot n_z = \frac{33,6}{0,179} \cdot 0,013406 \cdot 60 = 150,1 \text{ m}^3 \quad (38)$$

Kde:

$y_{BP_{MF}}$ je denní produkce bioplynu mini fermentoru [m^3];

m_{BROKS} je denní hmotnost BROKS [kg];

m_{ol} je denní hmotnost oleje [kg];

n_z je počet vsázek v reaktoru [-].

Dále je třeba zjistit výhřevnost bioplynu. Je známa výhřevnost metanu $35,8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ (viz kapitola 5.2.1. Pro průměrnou výhřevnost bioplynu je třeba určit průměrné množství metanu v bioplynu z provedeného měření.

$$\bar{y}_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_M = 54 \% \quad (39)$$

Kde:

\bar{y}_M je průměrný denní podíl metanu v bioplynu [%];

y_M je denní podíl metanu v bioplynu [%];

n je počet dní měření [-].

$$H_{BP} = \bar{y}_M \cdot H_M = 19,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (40)$$

Kde:

H_{BP} je výhřevnost bioplynu [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$];

H_M je výhřevnost metanu [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$].

Nyní lze spočítat energetický obsah denního množství vyprodukovaného bioplynu [60]:

$$Q_{BP} = y_{BP_{MF}} \cdot H_{BP} = 2896,9 \text{ MJ} = 804,7 \text{ kWh} \quad (41)$$

Kde:

Q_{BP} je energetický obsah bioplynu [MJ].

Pro volbu mikrokogenerační jednotky je třeba znát příkon z paliva. Bude předpokládán nepřetržitý denní provoz kogenerační jednotky.

$$P_{BP} = \frac{Q_{BP}}{t_{CHP}} = \frac{804,7 \text{ kWh}}{24 \text{ h}} = \mathbf{33,53 \text{ kW}} \quad (42)$$

Kde:

P_{BP} je příkon získaný z paliva [kW];

t_{CHP} je denní doba provozu kogenerační jednotky [h].

Posledním krokem pro výběr kogenerační jednotky je určit energetickou náročnost samotného provozu a tu připočíst s energetickou náročností samotného fermentoru, pod tuto hodnotu by neměl výkon kogenerační jednotky klesnout, aby zůstal provoz energeticky soběstačný. Provozovatel v současnosti odebírá elektrickou energii z distribuční soustavy od dodavatele a tepelnou energii získává pomocí plynového kotle.

Tabulka 8 Roční energetická potřeba provozu

Roční spotřeba el. energie E_P	35 MWh
Roční spotřeba tepelné energie E_T	33 MWh
Roční spotřeba zemního plynu V_T	3060 m ³

Pokud budeme uvažovat spotřebu elektrické energie po celý rok konstantní a spotřebu tepelné energie pouze v topném období (od 1. září do 31. května), můžeme pak určit požadovaný elektrický a tepelný výkon kogenerační jednotky pro chod provozu v zimních měsících, kdy bude energeticky nejnáročnější:

$$P_E = \frac{E_P \cdot 1000}{365 \cdot 24} = 4 \text{ kW} \quad (43)$$

$$P_T = \frac{E_T \cdot 1000}{273 \cdot 24} = 5 \text{ kW} \quad (44)$$

Kde:

P_E je potřebný elektrický výkon kogenerační jednotky [kW];

P_T je potřebný tepelný výkon kogenerační jednotky [kW].

Celkový potřebný elektrický a tepelný výkon kogenerační jednotky pak získáme sečtením parametrů provozu a parametrů fermentoru:

$$P_{TF} = \frac{Q_F}{24} = 1,96 \text{ kW} \quad (45)$$

$$P_{EF} = \frac{Q_E}{24} = 0,26 \text{ kW} \quad (46)$$

Kde:

P_{TF} je potřebný tepelný výkon kogenerační jednotky pro provoz fermentoru [kW];

P_{EF} je potřebný elektrický výkon kogenerační jednotky pro provoz fermentoru [kW].

Tabulka 9 Tabulka provozních parametrů pro výběr kogenerační jednotky

	Provoz	Mini fermentor	Celkem
Potřebný elektrický výkon	4 kW	0,26 kW	4,26 kW
Potřebný tepelný výkon	5 kW	1,96 kW	6,96 kW
Příkon z bioplynu			33,53 kW

Po zjištění všech parametrů pro navrhovanou kogenerační jednotku byly kontaktovány firmy, které vyrábí a dodávají kogenerační jednotky. Nabídka všech firem nicméně postrádá kogenerační jednotky na bioplyn pro příkon paliva menší než 65 kW. V úvahu připadá vybrat nejmenší možnou kogenerační jednotku a zbytek palivového příkonu doplnit zemním plynem. Pro tento účel bude vybrána kogenerační jednotka české firmy TEDOM Micro 30.

Obrázek 23 Kompaktní kogenerační jednotka Micro 30 od firmy TEDOM [66]



Tabulka 10 Parametry kogenerační jednotky TEDOM Micro 30 [66]

Elektrický výkon (kW)	Tepelný výkon (kW)	Elektrická účinnost (%)	Tepelná účinnost (%)	Celková účinnost (%)	Příkon v palivu (kW)
20	41,8	29,5	62,0	91,5	67,7

Nyní lze z potřebného příkonu v palivu dopočítat roční množství zemního plynu, které je potřeba do kogenerační jednotky přivést. Výhřevnost zemního plynu budeme uvažovat $34 \text{ MJ}\cdot\text{m}^3$ [67].

$$V_{ZP} = \frac{(P_{CHP} - P_{BP}) \cdot 24 \cdot 365 \cdot 3,6}{H_{ZP}} = 30100 \text{ m}^3 \quad (47)$$

Kde:

V_{ZP} je celková roční objem zemního plynu spotřebovaný v KGJ [m^3];

P_{CHP} je příkon KGJ [kW];

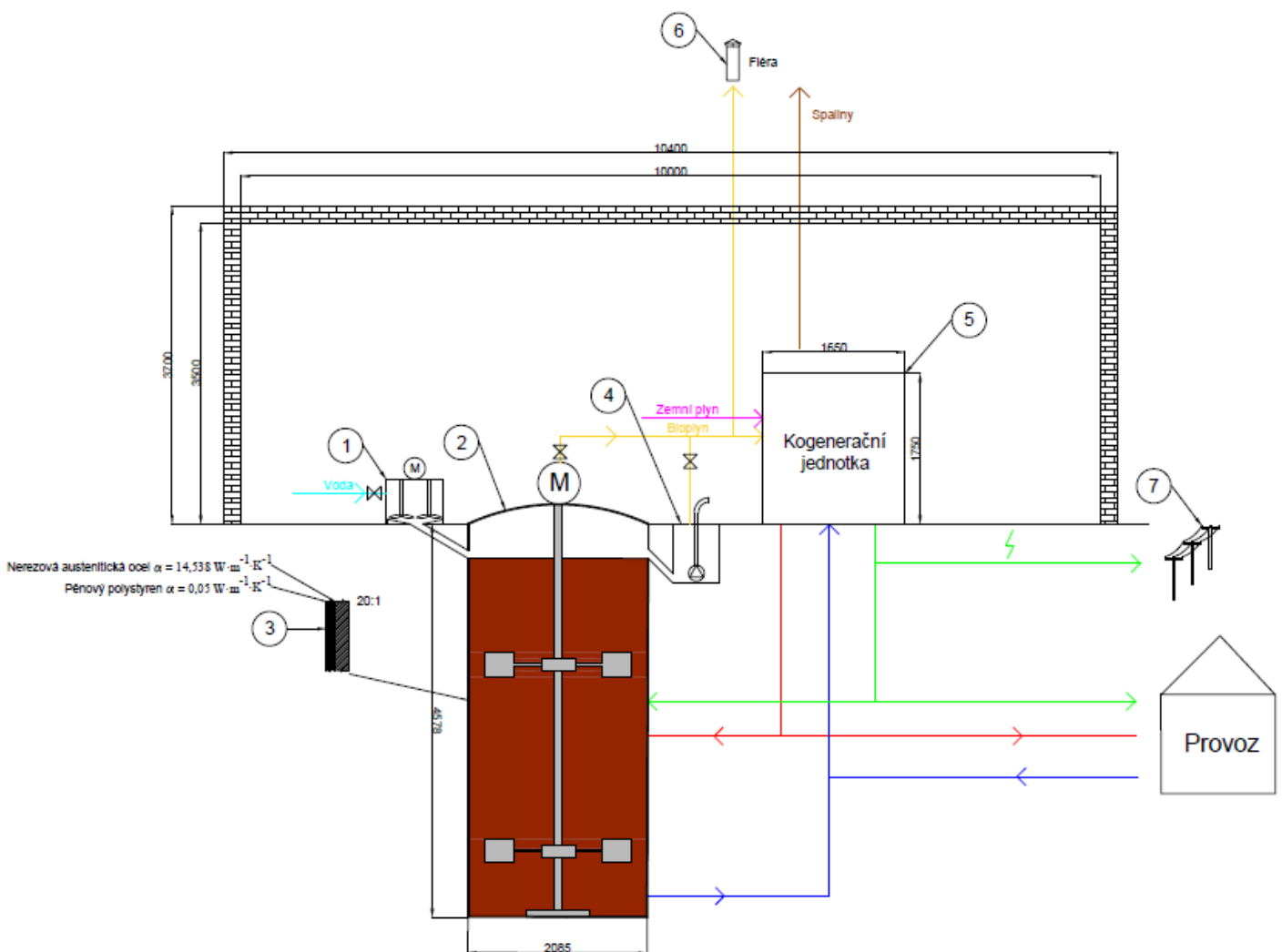
P_{BP} je příkon z bioplynu [kW];

H_{ZP} je výhřevnost zemního plynu [$\text{MJ}\cdot\text{m}^3$].

5.3 Technický popis činnosti zařízení

V následující kapitole bude popsána činnost hlavních komponentů technologie mini fermentoru. Pro jednoduché zobrazení technologické linky bude použito schéma fermentoru a kogenerační jednotky (obr. 24), na kterém bude znázorněn energetický a surovinový tok. Schéma bude mít pouze orientační funkci, nejedná se o přesný technický výkres. Ve schématu také nejsou zohledněny veškeré dílčí komponenty (armatury, otopné potrubí apod.), které by při případné realizaci technologie musely být použity.

Obrázek 24 Schéma technologie mini fermentoru



Celá technologická linka začíná vstupní nádrží (1), do které se jednou denně bude vkládat denní produkce BROKS, případně i malé množství oleje. K nádrži je přivedena voda, jejíž množství je řízeno regulačním ventilem spojeným s váhou pro vstupující substrát. Množství vody se tak řídí podle množství odpadního substrátu podle vztahu 17. V přípravné nádrži budou umístěny

i dvě tyčová míchadla s elektromotorem a převodovkou, která budou vsázkovou směs homogenizovat.

Následně samospádem substrát vteče do fermentoru (2), který bude vyhříván otopným hadem a k míchání substrátu bude použito pomaloběžné vertikální pádlové míchadlo s elektromotorem a převodovkou dopomala. Fermentor bude svařen z nerezového plechu válcovaného za tepla s izolací z pěnového polystyrenu (3). Fermentor bude usazen pod úrovní podlahy.

Digestát z fermentoru bude přepadat samospádem do podzemní nádrže na digestát, ze které bude následně čerpán ven ponorným kalovým čerpadlem a bude prodáván jako hnojivo (4).

Bioplyn bude jímán jak z fermentoru, tak z nádrže na digestát, kde bude také docházet k tvorbě zbytkového bioplynu. Bioplyn bude veden přímo do kogenerační jednotky (5), kde bude spoluspalován se zemním plynem. V případě nízkého odběru energií nebo poruše na kogenerační jednotce bude z bezpečnostních důvodů instalována fléra (6), která bude případný přebytečný bioplyn spalovat.

Bioplyn bude společně se zemním plynem vstupovat do KGJ, kde bude spalován ve spalovacím pístovém motoru, který bude pohánět generátor a vytvářet elektrickou energii. Zároveň bude využito odpadní teplo z chlazení motoru, oleje a spalin pro ohřátí vody do otopného systému. Ochlazená voda bude posléze opět přiváděna do KGJ, cirkulace vody bude zajištěna oběhovým čerpadlem.

Elektrická energie, která nebude využita pro chod fermentoru nebo pro chod restauračního provozu může být prodávána do distribuční sítě (7), to však zahrnuje splnění podmínek *vyhlášky č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě - znění od 01.01.2022*. Tepelná energie pro dálkové vytápění nebude vhodná, protože KGJ Micro 30 pracuje v teplotním režimu 70/90 °C, ale pro dálkové vytápění dle § 3 *vyhlášky č. 193/2007 Sb. vyhláška, kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu - znění od 01.09.2007* je vhodná horká voda o teplotě 115 °C a vyšší. [68]

5.4 Ekonomické posouzení návrhu

Ačkoliv varianta s dodatečným spalováním zemního plynu a distribucí elektrické energie bez možnosti distribuce tepelné energie není ideální variantou, je potřeba zhodnotit ekonomické podmínky tohoto provozu.

5.4.1 Investiční náklady

V investičních nákladech je započítána přibližná cena fermentoru se všemi hlavními komponenty, tato cena byla odhadnuta na základě volně dostupných cen za jednotlivé

komponenty a materiály. Dále se do investičních nákladů započítá cena kogenerační jednotky TEDOM Micro 30, která byla odhadnuta pracovníkem obchodního oddělení firmy TEDOM přibližně na 1 milion Kč. Z bezpečnostních důvodů je potřeba instalovat i fléru. Do investičních nákladů jsou započítány také stavební práce, včetně přípojky k distribuční síti elektřiny a vypracování projektové dokumentace k projektu mini fermentoru. Investiční náklady nezahrnují případné náklady na pronájem nebo odkup prostor pro umístění mini fermentoru a předpokládá se, že tento prostor bude k dispozici. Prozatím není počítáno s využitím žádného dotačního programu.

Tabulka 11 Přibližné investiční náklady

Investiční náklady	
Položka	Výše nákladu
Fermentoru s hlavními komponenty	1 000 000,00 Kč
Kogenerační jednotka TEDOM	1 000 000,00 Kč
Fléra	100 000,00 Kč
Stavební práce	1 500 000,00 Kč
Projektová dokumentace a administrativní zátěž	300 000,00 Kč
Celkem	3 900 000,00 Kč

5.4.2 Provozní náklady

Do provozních nákladů se započítají náklady na údržbu fermentoru a kogenerační jednotky, měsíční cena za rezervovanou kapacitu, která činí dle *cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2021 ze dne 30. listopadu 2021, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a ostatní regulované ceny* 82 138 Kč·MW⁻¹·měsíc⁻¹, tzn. v ročním součtu činí $12 \cdot 82138 \cdot 0,01574 = 15\,514$ Kč.

Dále se podle stejného dokumentu ERÚ stanovuje cena za systémové služby poskytované provozovatelem přenosové soustavy 113,53 Kč·MWh⁻¹, což v ročním provozu činí $113,53 \cdot 0,01574 \cdot 24 \cdot 365 = 15\,654$ Kč.

Údržba kogenerační jednotky byla stanovena výrobcem na 0,22 Kč·kWh_e⁻¹, což činí $0,22 \cdot 15,74 \cdot 24 \cdot 365 = 30\,334$ Kč.

V neposlední řadě je třeba zohlednit množství spalovaného zemního plynu, který bude doplňovat příkon bioplynu. Ze vztahu 47 bylo roční množství zemního plynu stanoveno na 30 100 m³. Průměrná cena zemního plynu se během března 2022 pohybovala kolem 30 Kč·m³, což v ročním horizontu činí $30100 \cdot 30 = 903\,000$ Kč.

Zvýšení mzdových nákladů původně nebylo předpokládáno, ale vzhledem k rozsahu a komplexnosti technologie je třeba do provozních nákladů zohlednit i mzdu technologa, který

by měl na starost vsádku a přípravu odpadů, odběr digestátu a kontrolu tvorby bioplynu a správného chodu celé technologie. Jako hrubou mzdu pro tohoto pracovníka budeme uvažovat 30 000 Kč.měsíc⁻¹, což dle mzdové kalkulačky přináší zaměstnavateli náklad 40 140 Kč [69]. V ročním součtu tento náklad představuje $12 \cdot 40140 = 481\,680$ Kč.

Tabulka 12 Minimální roční provozní náklady

Provozní náklady		
Položka	Jednice	Roční náklad
Měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu [Kč.MW ⁻¹ .měsíc ⁻¹]	82 138	15 514,23 Kč
Cena za systémové služby poskytované provozovatelem přenosové soustavy [Kč.MWh ⁻¹]	113,53	15 653,79 Kč
Údržba fermentoru		20 000,00 Kč
Údržba KGJ [Kč.kWh ⁻¹]	0,22	30 334,13 Kč
Zemní plyn na spoluspalování v KGJ [Kč.m ⁻³]	30	903 000,00 Kč
Mzdové náklady [Kč.měsíc ⁻¹]	40 140	481 680,00 Kč
Celkem		1 466 182,14 Kč

5.4.3 Úspory

V první řadě provoz restaurace ušetří náklady na elektrickou a tepelnou energii. Roční spotřeba plynu na vytápění plynovým kotlem byla 4 525 m³, což při současné ceně zemního plynu 30 Kč.m⁻³ představuje $4525 \cdot 30 = 135\,750$ Kč. Cena dodavatele elektřiny byla v březnu 2022 4,059 Kč.kWh⁻¹, což při roční spotřebě 35 000 kWh činí $35000 \cdot 4,059 = 142\,065$ Kč.

Do úspor je třeba započítat i úsporu za platbu společnosti, co odváží a dále nakládá s BROKS, což představuje měsíční náklad 4 500 Kč, což v ročních nákladech činí $12 \cdot 4500 = 54\,000$ Kč.

Tabulka 13 Potenciální roční úspory

Úspory		
Položka	Jednice	Roční úspory
Zemní plyn spalovaný v plynovém kotli [Kč.m ⁻³]	30	135 750 Kč
Spotřebovaná elektrická energie [Kč.kWh ⁻¹]	4,059	142 065 Kč
Náklady za svoz BROKS [Kč.měsíc ⁻¹]	4500	54 000 Kč
Celkem		331 815 Kč

5.4.4 Výnosy

Podle čl. 1 bodu 32. zákona č. 382/2021 Sb. zákon, kterým se mění zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony - znění od 01.01.2022, vzniká právo na podporu elektřiny z obnovitelného zdroje pouze na energetický podíl připadající na bioplyn. Výpočet této podpory je uveden v příloze č. 5 k vyhlášce č. 145/2016 Sb.

$$E_{BP} = E_C \cdot \frac{P_{palBP}^T}{P_{pal}^T} = 175,2 \cdot \frac{33,53}{67,7} = 86,77 \text{ MWh} \quad (48)$$

Kde:

E_{BP} je roční množství elektřiny vyrobené z bioplynu [MWh];

E_C je celkové roční množství vyrobené elektřiny [MWh];

P_{palBP}^T je příkon obsažený v bioplynu v KGJ [kW];

P_{pal}^T je celkový příkon KGJ [kW].

Výše zeleného bonusu je dle *cenové rozhodnutí ERÚ č. 6/2021* 2161 Kč.MWh⁻¹ a výše doplňku k zelenému bonusu činí 455 Kč.MWh⁻¹, tedy celková výše zeleného bonusu za elektřinu je 2616 Kč.MWh⁻¹. V celkové roční produkci tedy zelený bonus činí 2616*86,77 = 226 990,32 Kč .

Podobný výpočet jako vztah 48 je nutné použít i pro stanovení výše podpory za vyrobené teplo.

$$Q_{BP} = Q_C \cdot \frac{P_{palBP}^T}{P_{pal}^T} = \frac{41,8 \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 365}{10^3} \cdot \frac{33,53}{67,7} = 652,87 \text{ GJ} \quad (49)$$

Kde:

Q_{BP} je roční množství tepla vyrobené z bioplynu [GJ];

Q_c je celkové roční množství vyrobeného tepla [GJ];

$P_{pal_{BP}}^T$ je příkon obsažený v bioplynu v KGJ [kW];

P_{pal}^T je celkový příkon KGJ [kW].

Výše zeleného bonusu pro výrobu tepla z bioplynu činí dle *cenové rozhodnutí ERÚ č. 6/2021* 830 Kč.GJ⁻¹, což celkem činí 830*652,87 = 541 882,10 Kč .

Jako výnos je nutné kalkulovat i samotný výkup elektrické energie do distribuční sítě, tržní cena se momentálně na komoditních burzách pohybuje kolem 4 000 Kč. MWh⁻¹, což při roční výrobě činí 175,2*4000 = 700 800,00 Kč.

Při potenciálních výnosech lze kalkulovat i s výkupem digestátu, jehož cena by mohla být 72 Kč.t⁻¹ [70], což při přibližné roční produkci digestátu určené 365násobku denní dávky představuje 365*0,2286*72 = 6 007,61 Kč.

Tabulka 14 Potenciální roční výnosy

Výnosy		
Položka	Jednice	Roční výnosy
Výkup elektrické energie [Kč.MWh ⁻¹]	4000	700 800,00 Kč
Zelený bonus - elektřina + doplňková sazba [Kč.MWh ⁻¹]	2616	226 990,32 Kč
Zelený bonus - teplo [Kč.GJ ⁻¹]	830	541 882,10 Kč
Prodej digestátu [Kč.t ⁻¹]	72	6 007,61 Kč
Celkem		1 475 680,03 Kč

5.4.5 Návratnost

Pro první kalkulaci návratnosti nebude brán v potaz žádný podpůrný dotační program pro investici do technologie. Podle kalkulací jednotlivých přibližných nákladů, výnosů a úspor lze dosáhnout návratnosti investice do projektu mini fermentoru nejdříve za 12 let. I tato delší doba návratnosti může být lehce podhodnocena, jelikož skutečné projektové náklady se vzhledem k tomu, že technologie v tomto alokovaném měřítku nebyla dosud realizovaná, mohou do jisté míry lišit.

V druhé kalkulaci návratnosti zohledníme využití dotačního programu „Cirkulární řešení v podnicích“, který spadá pod „Národní program obnovy“ (NPO), který by měl být

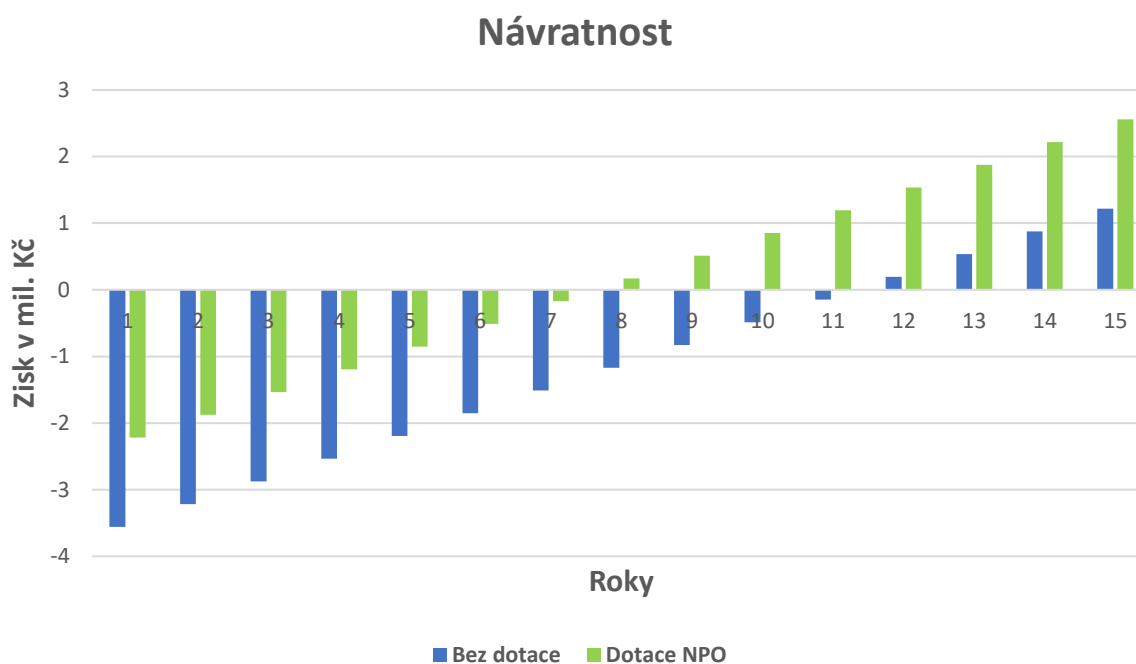
spuštěn letos. Program zajišťuje výši podpory 40 - 60 % na pořízení technologií, inženýrských sítí i stavebních prací spojených s opětovným využitím odpadů a druhotných surovin. Dotaci lze využít na výdaje na pořízení technologií (strojů a zařízení), stavební práce, technický dozor a dodávky a služby [71]. Žádost pro získání dotace by měla obsahovat patřičné účetní náležitosti, které zvýší administrativní zátěž o zhruba 100 000 Kč. Zároveň tuto administrativní zátěž a projektovou činnost nebudeme zohledňovat do podpory dotace. Bude uvažována nejnižší míra podpora, tj. 40 %. Investiční náklady s použitím dotačního programu NPO jsou shrnuty v tabulce 14.

Obě návratnosti investičních nákladů bez použití dotací a s využitím dotačního programu NPO jsou porovnány na obr. 25. Návratnost s využitím dotací se snížila o 4 roky na 8 let. O dotaci bude žádat velké množství podnikatelských subjektů a otázkou tak je, zda ojedinělost tohoto technologického řešení bude při získávání dotační podpory hrát výhodu nebo naopak od investiční pobídky odradí.

Tabulka 15 Investiční náklady s využitím dotačního programu NPO

Investiční náklady	
Položka	Výše nákladu
Fermentoru s hlavními komponenty	1 000 000,00 Kč
KGJ	1 000 000,00 Kč
Fléra	100 000,00 Kč
Stavební práce	1 500 000,00 Kč
Celkem nárok na dotaci	3 600 000,00 Kč
Výše podpory	1 440 000,00 Kč
Projektová dokumentace a administrativní zátěž	400 000,00 Kč
Celkem	2 560 000,00 Kč

Obrázek 25 Návrtnost investice bez využití dotací a s využitím dotací v horizontu 15 let



Návrtnost investic nicméně nepočítá s možnými pohyby cen energií, které se vyznačují v poslední době velkou fluktuací. Model návratnosti nepočítá ani s vlivem inflace, která v současné době není stabilní a neustále roste. Lze ale usoudit že trend posledních měsíců v růstu cen energií bude vzhledem k současné složité geo-politické situaci a situaci na globálních trzích určitou dobu trvat. Vysoká cena energií by tak mohla podpořit smysl investice do podobné technologie.

6 Závěr a diskuze

Tato diplomová práce si kladla za úkol zanalyzovat současnou situaci v oblasti nakládání a využívání kuchyňských odpadů v České republice a zároveň navrhnout technologické řešení, které by bylo alokováno přímo pro jednotlivé producenty těchto odpadů, což jsou v tomto případě restaurační provozy. Prvotní myšlenkou tak bylo učinit tyto provozy energeticky soběstačné, což by kromě jisté míry nezávislosti mohlo přinést i značné finanční úspory a přenesení myšlenky oběhového hospodářství a využívání odpadů jako druhotné suroviny k mnohem širší veřejnosti.

Jako technologie byla zvolena anaerobní digesce, která umožňuje energetické využití biologicky rozložitelných odpadů skrze energetickou hodnotu bioplynu, z kterého je energie nejčastěji získávána v kogeneračních jednotkách, umožňujících kombinované využití elektřiny a tepla. Je nutno zdůraznit, že tato technologie v tak malém měřítku nemá zatím komerční využití nikde ve světě.

Úkolem této práce tak bylo spíše než kompletní navržení technologie, která by umožňovala okamžitou aplikaci přímo v provozu, nastínění požadavků této technologie a návrh hlavních komponentů včetně ekonomického zhodnocení technologie v takto stanoveném rozsahu.

Díličí výsledky však přinesly vzhledem k ojedinelosti a absenci reálné aplikace navrhované technologické linky spíše více otázek než odpovědí, a to jak technické, legislativní, tak ekonomické povahy.

Z technických otázek je třeba podtrhnout skutečnost, že pro navrhované denní množství odpadu (30 kg) a z toho vyplývající příkon v bioplynu v současnosti na trhu neexistuje kogenerační jednotka vhodná pro spalování bioplynu s odpovídajícím příkonem v palivu. Po výpočtu 42 navrhovaný příkon vyšel poloviční než je potřebný příkon nejmenších dostupných kogeneračních jednotek. Pro doplnění příkonu by bylo nutné spolu s bioplynem spalovat i zemní plyn, což kromě velkých finančních nákladů přináší i ztrátu podstaty využívání čistě druhotných zdrojů.

Zvýšený příkon s sebou pak přináší zvýšený elektrický a tepelný výkon, který se nabízí pro výkup do distribuční sítě, což ovšem kromě dalších technických problémů přináší i legislativní problémy. Například mikrokogenerační jednotky pracují v jiném teplotní režimu, než v režimu vhodném pro dálkové vytápění (viz kapitola 5.3), distribuce tepla k bytové zástavbě by tedy nebyla možná a majitel provozu by tak přišel o potenciální výnos.

Dalšími legislativními nároky jsou různá ochranná pásma a bezpečnostní prvky, vzorkování a další náležitosti, které by toto zařízení (např. dle § 64 Zákona o odpadech) muselo splňovat, což by obnášelo ohromné nároky na prostor, technické nároky a nároky na administrativu a personál.

Pokud by tyto legislativní nároky byly za přísných podmínek přeci jen splněny a provoz by disponoval dostatečnou prostorovou kapacitou pro instalaci této technologie, zůstala by

otázka vstupních investičních nákladů. Varianty v kapitole 5.4.5 počítaly s nejjednodušší možnou technickou realizací, ve které nejsou zohledněné případné ostatní komponenty jako armatury, zásobník plynu nebo případné zařízení na úpravu bioplynu. V případě instalace dalších komponentů by vstupní náklady mohly vystoupat na částku, jejíž návratnost by byla i s eventuálním využitím některého s dotačních programů velmi dlouhá a mohla by přesáhnout i samotnou životnost tohoto zařízení.

V celkovém součtu tak není možné bezpečně na některé otázky provozu tohoto zařízení odpovědět. Po konzultacích s vyučujícími a zaměstnanci katedry Technologických zařízení staveb Technické fakulty ČZU v Praze a zástupci firem, které se věnují energetickému využití bioplynu v praxi, tak bylo dospěno k závěru tuto technologickou linku v tomto rozsahu zatím pro využití v restauračních provozech nepoužít. Výsledkem této diplomové práce tak není kompletní projektová dokumentace, na jejímž základě by mohlo být toto zařízení uvedeno přímo do provozu, ale je to spíše prvotní studie, na kterou by bylo potřeba navázat rozsáhlejší sérií měření a vývoje spolu s diskuzí napříč soukromým a veřejným sektorem.

Smysl energetického využití biomasy se však neztrácí, ba naopak. Vzhledem k ekonomickému tlaku, limitnímu množství fosilních paliv, ekologickým aspektům ale i geopolitické situaci se myšlenka energetického využití odpadní biomasy dostává opět do popředí a může hrát svoji roli v získání energetické soběstačnosti. Zatím však technické ani legislativní podmínky nejsou nakloněny řešení energetického využívání odpadů pomocí anaerobní digesce v takto lokálních podmínkách. Stále je nicméně možné biologicky rozložitelné odpady využívat ve větších bioplynových stanicích, kde jsou technické podmínky lépe uzpůsobeny této technologii. V některých evropských státech už takto na mnoha místech fungují městské bioplynové stanice, které zpracovávají jak kuchyňské odpady od živnostníků, tak biologicky rozložitelné složky komunálního odpadu.

7 Seznam použitých zdrojů

7.1 Seznam použité literatury

[1] PRODUKCE, VYUŽITÍ A ODSTRANĚNÍ ODPADŮ za období 2019. In: Český statistický úřad [online]. Praha: ČSÚ, 2021 [cit. 2021-7-23]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/123243248/28002020.pdf/2b10e665-7aac-4baf-9ff9-d097203573c1?version=1.5>

[2] Substrate and biogas. DEUBLEIN, Dieter a Angelika STEINHAUSER. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Německo: WILEY-VCH, 2008, s. 47-86. ISBN 978-3-527-31841-4.

[3] KRATOCHVÍLOVÁ, Zuzana, Jiří HABART, Václav SLADKÝ, František JELÍNEK, Tomáš ROSENBERG, Vladimír STUPAVSKÝ a Tomáš DVOŘÁČEK. *Průvodce výrobou a využitím bioplynu* [online]. CZ Biom – České sdružení pro biomasu, 2009 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/pruvodce_vyrobou_vyuzitim_bioplynu.pdf

[4] *Digestáty a jejich využití v zemědělství* [online]. Praha: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, 2016 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/458518/Digestaty_final2_WEB_optim.pdf

[5] ČESKO. Část 1 Hlava 3 zákona č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165#cast1-hlava3>

[6] ČESKO. Část 1 Hlava 1 zákona č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458#cast1-hlava1>

[7] ŠAFARÍK, Miroslav, HABART, Jan: Expertní systém pro bioplyn : Legislativa založení a provozu bioplynových stanic. *Biom.cz* [online]. 2008-06-10 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z WWW: <<http://expert.biom.cz/bioplyn.stm>>. ISSN: 1801-2655.

[8] ŠVEC, Jan a Barbora NELIBOVÁ. PŘÁVNÍ PŘEDPISY VZTAHUJÍCÍ SE K VÝSTAVBĚ A PROVOZU BPS. ŠVEC, Jan. *Využití obnovitelných zdrojů energie v zemědělství - zemědělské bioplynové stanice*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2010, s. 4-12. ISBN 978-80-86832-49-4.

[9] TRÁVNÍČEK, Trávníček. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 6/2021, ze dne 29. září 2021, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie. In: *Energetický regulační věstník* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2021, 29.9.2021 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z:

https://www.eru.cz/documents/10540/7274234/ERV08_2021.pdf/321b0dcb-3183-46c6-b75c-1ac16c536c26

[10] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008., s. 6-7. ISBN 978-80-213-1747-5.

[11] QIANQIAN, Yu a Li HUAN. Moderate separation of household kitchen waste towards global optimization of municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*. 2020, (277). ISSN 0959-6526.

[12] WALDRON, Keith. *Handbook of waste management and co-product recovery in food processing*. Abington: Woodhead Publishing Limited, 2007. ISBN 978-1-84569-025-0.

[13] ČESKO. § 15 zákona č. 541/2020 Sb., o odpadech. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 9. 10. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541#p15>

[14] (ES) č. 1774/2002 NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 1774/2002 ze dne 3. října 2002 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu, které nejsou určeny pro lidskou spotřebu. In: . *Evropská Unie, 2002*. Dostupné také z: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=32002R1774>

[15] ČESKO. § 58 vyhlášky č. 299/2003 Sb., o opatřeních pro předcházení a zdolávání nákaz a nemocí přenosných ze zvířat na člověka. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 9. 10. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2003-299#p58>

[16] *Směrnice Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkování odpadů*. In: . Evropská Unie, 1999. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:31999L0031>

[17] ČESKO. § 14 vyhlášky č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: <https://www.inisoft.cz/> [online]. © Tiskárna Ministerstva vnitra, p. o. [cit. 9. 10. 2021]. Dostupné z: <https://www.inisoft.cz/direct/programy/dokumenty/legislativa/273-2021.pdf>

[18] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008., s. 20-21. ISBN 978-80-213-1747-5.

[19] VÁŇA, Jaroslav. 2002b. Kompostování biodegradabilních odpadů v České republice [online]. Česká republika: Biom.cz, 2002-02-13, poslední aktualizace 2002-03-19 [cit. 2005-07-28]. Dostupný z WWW: < <http://www.biom.cz/index.shtml?x=63845> >. ISSN 1801-2655.

[20] EPSTEIN, Eliot. *INDUSTRIAL COMPOSTING Environmental Engineering and Facilities Management* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2011, s. 79-102 [cit. 2021-10-10]. ISBN 978-1-4398-4532-5. Dostupné z: <http://library.lol/main/410C1475CFB6F659A42D058566054867>

[21] HICKMAN JR., LANIER, H., 1999. *The Principles of Integrated Solid Waste Management*. American Academy of Environmental Engineers, Annapolis, MD.

[22] HONG, Melvin Gan Jet, RAHMAN, Mizanur, Yeoh Shir LEE a Fadzlita Mohd TAMIRI, ed. *Anaerobic Digestion of Food Waste*. HORAN, Nigel, Abu Zahrim YASER a Newati WID. *Anaerobic Digestion Processes: Applications and Effluent Treatment*. Singapur: Springer, 2018, s. 106-107. ISBN 978-981-10-8128-6.

[23] FUNKE, Axel; ZIEGLER, Felix. Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2010, 4.2: 160-177.

[24] GALLIFUOCO, Alberto, Luca TAGLIERI, Francesca SCIMIA, Alessandro Antonio PAPA a Gabriele DI GIACOMO. Hydrothermal carbonization of Biomass: New experimental procedures for improving the industrial Processes. *Bioresource Technology* [online]. 2017, 2017, **244**(1), 160-165 [cit. 2021-10-19]. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417312300>

[25] Produkce, využití a odstranění odpadů 2013 -2019. *Český statistický úřad* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2014>

[26] ČESKO. § 3 zákona č. 541/2020 Sb., o odpadech. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 28. 10. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541#p3>

[27] *BioCNG pro Prahu: Využití bioodpadů vyprodukovaných na území hlavního města Prahy k produkci biometanu, jakožto paliva pro vozidla společnosti Pražské služby a autobusy společnosti Dopravní podnik hlavního města Prahy*. Brno, 2019.

[28] PULLEN, Tim. A history of anaerobic digestion and biogas. *Anaerobic digestion--making biogas--making energy: the Earthscan expert guide*. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2015, s. 11-18. ISBN 978-0-415-71348-1.

[29] Historie fermentace ve světě a České republice. MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 76-77. ISBN 978-80-213-1747-5.

[30] KAJAN, Miroslav. Bioplynová stanice Třeboň. *Envi Web: zpravodajství životního prostředí již od roku 1999* [online]. Enviweb, 2004, 2.7.2004 [cit. 2021-10-30]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/48999>

[31] PULLEN, Tim. Introduction to anaerobic digestion and biogas. *Anaerobic digestion--making biogas--making energy: the Earthscan expert guide*. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2015, s. 1-10. ISBN 978-0-415-71348-1.

[32] PULLEN, Tim. Digester feedstock/substrate. *Anaerobic digestion--making biogas--making energy: the Earthscan expert guide*. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2015, s. 19-32. ISBN 978-0-415-71348-1.

[33] Renewable energy from crops and agrowastes. *Cropgen* [online]. 2008 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <http://www.cropgen.soton.ac.uk/deliverables.htm>

- [34] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Principy tvorby bioplynu. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 90-97. ISBN 978-80-213-1747-5.
- [35] STUDENÍK, Jiří a Michal SVITAVSKÝ. *Energie větru, vody, biomasy* [online]. Brno: Code Creator, s.r.o, 2016 [cit. 2021-11-04]. ISBN 978-80-88058-08-3. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/Cover.html>
- [36] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Chemické složení bioplynu. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 97-99. ISBN 978-80-213-1747-5.
- [37] PULLEN, Tim. AD plant types and processes. *Anaerobic digestion--making biogas--making energy: the Earthscan expert guide*. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2015, s. 33-54. ISBN 978-0-415-71348-1.
- [38] ZAUNER, E.: Biogasgewinnung aus Pflanzenstoffen. *Landbauforschung volkenrode*. 1985, 35, Heft 2, s. 67-74
- [39] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Technologie mokrého a suchého biozplynování. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 100-105. ISBN 978-80-213-1747-5.
- [40] THE BEKON PROCESS. *BEKON* [online]. 2016 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.bekon.eu/en/technology/>
- [41] PETERSSON, A., a , ed. Biogas cleaning. WELLINGER, Arthur, Jerry MURPHY a David BAXTER. *The biogas handbook: science, production and application*. Oxford: Woodhead Publishing, 2013, s. 329-341. ISBN 978-0-85709-498-8.
- [42] PETERSSON, A., a , ed. Biogas upgrading to biometane. WELLINGER, Arthur, Jerry MURPHY a David BAXTER. *The biogas handbook: science, production and application*. Oxford: Woodhead Publishing, 2013, s. 342-375. ISBN 978-0-85709-498-8.
- [43] SCHWISTER, K. (2001) *Taschenbuch der Verfahrenstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Mnichov, Vídeň.
- [44] GIROD, K., LOHMANN, H. a URBAN, W. (2009) *Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz*. Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008. Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen
- [45] BEIL, M., BEYRICH, W., HOLZHAMMER, U. a KRAUSE, T. (2012) *Biometan* [online]. Dostupné z: <http://www.nachwachsende-rohstoffe.de>
- [46] Water Scrubber. *Indiamart* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/water-scrubber-8932167755.html>
- [47] RASI S, VEIJANEN A a RINTALA J (2007) Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy*, 2007, s. 1375–1380.
- [48] KAPARAJU, P. a J. RINTALA. Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants

and fuel cells. WELLINGER, Arthur, Jerry MURPHY a David BAXTER, ed. *The biogas handbook: science, production and application*. Oxford: Woodhead Publishing, 2013, s. 404-442. ISBN 978-0-85709-498-8.

[49] CHAMBERS A. K. a POTTER I. *Gas utilization from sewage waste*. Alberta Research Council, Edmonton. 2002 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd08/gas.pdf>

[50] Residues and waste water. DEUBLEIN, Dieter a Angelika STEINHAUSER. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Německo: WILEY-VCH, 2008, s. 401-406. ISBN 978-3-527-31841-4.

[51] ČESKO. Příloha 5 vyhlášky č. 474/2000 Sb., Ministerstva zemědělství o stanovení požadavků na hnojiva. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 20. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-474#f2121089>

[52] TORRIJOS, M., P. SOUSBIE, L. BADEY, F. BOSQUE a J.P. STEYER. Effect of the addition of fatty by-products from the refining of vegetable oil on methane production in co-digestion. *Water Science and Technology* [online]. 2012, **66**(10), 2237-2242 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/66/10/2237/14619/Effect-of-the-addition-of-fatty-by-products-from?redirectedFrom=PDF>

[53] PULLEN, Tim. AD plant types and processes. *Anaerobic digestion--making biogas--making energy: the Earthscan expert guide*. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2015, s. 33-54. ISBN 978-0-415-71348-1.

[54] PRASAD, After. The biogas plant-some technical considerations: Diagram of Gobar-Gas Plant Used to Obtain Methane from Dung by Anaerobic Fermentation. *United Nations University* [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80434e/80434E1u.gif>

[55] Biogas generation: developments. Problems, and tasks - an overview: Cost-benefit analyses. *United Nations University* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80434e/80434E0k.htm>

[56] Chemické složení bioplynu a jeho vlastnosti. MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 97-99. ISBN 978-80-213-1747-5.

[57] Stanovení kapacity bioplynové stanice. MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 129-131. ISBN 978-80-213-1747-5.

[58] Technologie a technika využívaná při fermentaci. MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství, zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 100. ISBN 978-80-213-1747-5.

[59] IRENA (2016). *Measuring small-scale biogas capacity and production* [online]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2016 [cit. 2022-03-12]. ISBN 978-92-95111-12-7. Dostupné z: <https://www.irena.org/publications/2016/Dec/Measuring-small-scale-biogas-capacity-and-production>

[60] MÉSZÁROS, Gabriel. *Návrh bioplynové stanice*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

[61] GRODA, Bořivoj. *Termomechanika a hydromechanika: termodynamické tabulky*. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1991.

[62] Typical design calculation for an agricultural biogas plant. DEUBLEIN, Dieter a Angelika STEINHAUSER. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Weinheim: Wiley-VCH, s. 407-414. ISBN 978-3-527-31841-4.

[63] STRAKA, F. a kol.: *Bioplyn*. 2. vyd. GAS s.r.o., Praha 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.

[64] MEZ, a.s. [online]. Nedvědice [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.mez.cz/>

[65] *Flowservice: Průmyslové čerpání a dávkování kapalin* [online]. Krnov [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.flowservice.cz/produkty/>

[66] Přehled kogeneračních jednotek TEDOM. *TEDOM* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/kogeneracni-jednotky/bioplyn/>

[67] FÍK, Josef. Zemní plyn - spalné teplo a další vlastnosti: Spalné teplo, výhřevnost, energetická hustota, Wobbeho číslo, stechiometrický poměr a přebytek vzduchu. *TZB-info* [online]. Topinfo [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/1963-spalovaci-vlastnosti-zp-i>

[68] ČESKO. § 3 vyhlášky č. 193/2007 Sb., vyhláška, kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu - znění od 1. 9. 2007. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 20. 3. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-193#p3>

[69] Mzdová kalkulačka pro rok 2022. *Keloc* [online]. 2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.keloc-software.cz/mzdova-kalkulacka/>

[70] MORAVEC, Adam. Digestát na statku je požehnání aneb cirkulární zemědělství. *Biom* [online]. 2020, **2020**(1) [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/digestat-na-statku-je-pozehnani-aneb-cirkularni-zemedelstvi>

[71] Cirkulární řešení v podnicích (NPO): Až 60% dotace na pořízení technologií, inženýrských sítí i stavebních prací spojených s opětovným využitím odpadů a druhotných surovin ve výrobě. *Enovation* [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.enovation.cz/eu-dotace/operacni-program/narodni-plan-obnovy/cirkularni-reseni-v-podnicich-npo/>

7.2 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Příklad technologie volně ložené hromady s aktivním provzdušňováním [21]	9
Obrázek 2 Jednoduché schéma reaktoru [22].....	10
Obrázek 3 Celková produkce odpadů na území ČR mezi lety 2013 a 2019 v tunách [25].....	11
Obrázek 4 Produkce BROKS a Odpadu podobného KO v ČR v tunách v letech 2013 - 2019 v tunách [25].....	12
Obrázek 5 Schématické znázornění procesu metanizace organických látek [3].....	16
Obrázek 6 Příklad technologie suchého procesu od firmy Bekon [40].....	18
Obrázek 7 Jednoduché schéma technologie vodní vypírky [46].....	21
Obrázek 8 Schéma jednoduchého Gobar fermentoru [54].....	25
Obrázek 9 Příklad použití jednoduchého Gobar fermentoru v Indii [53]	26
Obrázek 10 Laboratorní zařízení pro měření produkce bioplynu, nahoře jsou fermentory a dole plynojemy.....	28
Obrázek 11 Plynojemy měřícího zařízení	28
Obrázek 12 Vzorek kuchyňských odpadů.....	29
Obrázek 13 Usušený a namletý vzorek kuchyňských odpadů	30
Obrázek 14 Porovnání denní produkce obou substrátů v mezofilních podmínkách.....	33
Obrázek 15 Porovnání denní produkce obou substrátů v termofilních podmínkách	33
Obrázek 16 Kumulativní produkce bioplynu substrátu s vzorkem odpadů v mezofilních a termofilních podmínkách	34
Obrázek 17 Složení bioplynu ve fermentorech s mezofilními podmínkami.....	35
Obrázek 18 Složení bioplynu ve fermentorech s termofilními podmínkami	36
Obrázek 19 Porovnání očištěné produkce bioplynu v mezofilních a termofilních podmínkách	37
Obrázek 20 Porovnání očištěné relativní produkce metanu ze vzorku odpadů	38
Obrázek 21 Porovnání měrné produkce metanu ze vzorku odpadů v mezofilních a termofilních podmínkách.....	39
Obrázek 22 Kumulativní produkce metanu ze vzorku odpadů v mezofilních a termofilních podmínkách.....	40
Obrázek 23 Kompaktní kogenerační jednotka Micro 30 od firmy TEDOM [66].....	52
Obrázek 24 Schéma technologie mini fermentoru	53
Obrázek 25 návratnost investice bez využití dotací a s využitím dotací v horizontu 15 let....	60

7.3 Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 Přibližná výtěžnost bioplynu u různých substrátů [33].....	15
Tabulka 2 Příloha 5 vyhlášky č. 474/200 - požadavky na digestát jako hnojivo [51]	22
Tabulka 3 Výsledky elementární látkové analýzy	29
Tabulka 4 Vybrané vlastnosti substrátů	32
Tabulka 5 Základní vlastnosti odpadu pro další výpočty.....	40
Tabulka 6 Hodnoty měrných tepelných kapacit vody a vybraných prvků [61].....	44
Tabulka 7 Spotřeba el. energie jednotlivých zařízení fermentoru [64 a 65]	48
Tabulka 8 Roční energetická potřeba provozu.....	50
Tabulka 9 Tabulka provozních parametrů pro výběr kogenerační jednotky.....	51
Tabulka 10 Parametry kogenerační jednotky TEDOM Micro 30 [66]	52
Tabulka 11 Přibližné investiční náklady	55
Tabulka 12 Minimální roční provozní náklady.....	56
Tabulka 13 Potenciální roční úspory.....	57
Tabulka 14 Potenciální roční výnosy	58
Tabulka 15 Investiční náklady s využitím dotačního programu NPO	59

8 Přílohy

8.1 Příloha – tabulka p.1

Příloha 1 Produkce bioplynu obou substrátů v mezofilních a termofilních podmínkách

Datum	Množství bioplynu v ml v jednotlivých fermentorech					
	1a	1b	2a		2b	
	100% fermentát	100% fermentát	70 % vzorek odpadů + 30 % fermentát		70 % vzorek odpadů + 30 % fermentát	
	mezofilní podmínky (42 °C)	termofilní podmínky (55 °C)	mezofilní podmínky (42 °C)	Kumulativní produkce	termofilní podmínky (55 °C)	Kumulativní produkce
27.12.2021	1400	4500	60	60	100	100
28.12.2021	4100	8500	2850	2910	6700	6800
29.12.2021	4800	5300	4200	7110	6600	13400
30.12.2021	4650	3500	2250	9360	1350	14750
31.12.2021	4700	3400	1800	11160	1200	15950
01.01.2022	4750	400	2000	13160	1650	17600
02.01.2022	4450	15800	2250	15410	5300	22900
03.01.2022	2800	15000	2350	17760	8800	31700
04.01.2022	2500	29500	2450	20210	18600	50300
05.01.2022	2250	30000	3200	23410	44000	94300
06.01.2022	2150	42500	4300	27710	65000	159300
07.01.2022	1250	14000	4150	31860	45100	204400
08.01.2022	1300	5000	4500	36360	17600	222000
09.01.2022	1450	2000	4600	40960	6000	228000
10.01.2022	1300	1200	4500	45460	4100	232100
11.01.2022	900	650	4700	50160	3500	235600
12.01.2022	450	400	4750	54910	2900	238500
13.01.2022	750	450	4600	59510	2400	240900
14.01.2022	600	400	4750	64260	2750	243650
15.01.2022	650	1200	4700	68960	6600	250250
16.01.2022	600	2000	4700	73660	8000	258250
17.01.2022	500	4500	4700	78360	7900	266150
18.01.2022	600	3500	4900	83260	7850	274000
19.01.2022	650	1200	5050	88310	8250	282250
20.01.2022	700	1000	5300	93610	7500	289750
21.01.2022	900	1100	5350	98960	6600	296350
22.01.2022	1200	2200	5300	104260	6850	303200
23.01.2022	500	600	5450	109710	5950	309150
24.01.2022	400	400	5600	115310	5800	314950
25.01.2022	500	450	5250	120560	4400	319350
26.01.2022	550	500	5700	126260	5500	324850
27.01.2022	600	700	5600	131860	6400	331250
28.01.2022	700	750	5550	137410	6200	337450
29.01.2022	800	900	5600	143010	6600	344050
30.01.2022	600	650	5700	148710	6300	350350
31.01.2022	450	600	5750	154460	8000	358350
01.02.2022	550	500	5650	160110	5500	363850
02.02.2022	450	900	5700	165810	11550	375400
03.02.2022	400	800	5500	171310	11300	386700
04.02.2022	350	650	5500	176810	10450	397150
05.02.2022	450	850	5600	182410	11000	408150
06.02.2022	300	500	5550	187960	9150	417300
07.02.2022	400	550	5700	193660	8100	425400
08.02.2022	200	350	5700	199360	8000	435200
09.02.2022	250	800	5600	204960	8500	454400
10.02.2022	250	450	5500	210460	8250	464500
11.02.2022	250	450	5300	215760	8000	474100
12.02.2022	300	450	5400	221160	7900	481500

8.2 Příloha – tabulka p.2

Příloha 2 Měrné složení bioplynu v mezofilních a termofilních podmínkách

Datum	1a		1b		2a		2b	
	100% fermentát (44 °C)		100% fermentát (55 °C)		70 % vzorek odpadů + 30 % fermentát (44 °C)		70 % vzorek odpadů + 30 % fermentát (55 °C)	
	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
27.12.2021	25,2	37,1	28,9	22,2	23,8	3,8	27,3	0,0
28.12.2021	24,3	39,0	22,2	25,6	46,7	20,2	42,6	0,0
29.12.2021	19,0	40,8	15,5	30,9	40,2	23,1	32,8	17,5
30.12.2021	17,4	43,6	14,5	39,2	42,7	20,2	35,7	18,2
31.12.2021	22,1	44,2	19,6	46,4	42,9	20,0	38,2	21,0
01.01.2022	17,2	44,6	16,3	40,3	42,6	20,2	40,5	18,3
02.01.2022	17,0	44,1	16,7	41,9	40,3	22,9	39,7	21,8
03.01.2022	19,5	42,3	16,2	60,5	37,6	29,4	31,2	42,0
04.01.2022	19,6	41,8	10,7	64,5	34,9	32,5	19,0	57,9
05.01.2022	18,5	42,0	8,7	63,6	35,0	36,5	16,4	64,0
06.01.2022	17,3	43,5	8,6	61,2	25,0	50,0	12,5	67,4
07.01.2022	17,0	42,7	7,3	55,1	21,0	52,6	13,6	62,4
08.01.2022	16,3	44,1	9,0	50,8	16,9	53,4	14,3	61,5
09.01.2022	16,1	43,7	12,5	46,0	16,6	54,3	15,8	57,2
10.01.2022	16,0	41,8	17,9	40,4	16,5	54,4	18,4	52,6
11.01.2022	15,5	44,4	16,1	43,6	16,9	55,6	17,5	54,6
12.01.2022	16,2	43,7	16,2	42,1	17,0	55,6	17,0	53,7
13.01.2022	16,4	43,5	16,0	43,2	17,1	56,0	16,7	55,6
14.01.2022	14,6	43,1	14,0	43,1	16,9	55,8	16,2	55,8
15.01.2022	16,7	44,2	15,8	44,5	17,0	56,0	16,0	56,4
16.01.2022	13,2	41,4	11,4	42,6	16,9	55,6	14,5	57,2
17.01.2022	16,7	44,6	13,8	46,3	15,4	55,2	12,7	57,2
18.01.2022	13,0	39,7	10,7	41,5	15,3	55,3	12,5	57,8
19.01.2022	16,9	41,4	13,7	42,9	15,7	54,9	12,7	57,0
20.01.2022	15,8	42,5	12,9	43,8	15,9	54,4	12,9	56,1
21.01.2022	15,9	42,4	13,0	43,7	15,4	55,2	12,6	56,9
22.01.2022	13,4	39,4	12,0	40,6	17,0	55,6	15,2	57,3
23.01.2022	12,4	39,7	12,5	39,6	17,2	56,1	17,4	56,0
24.01.2022	12,5	39,4	13,0	38,9	15,9	56,7	16,5	56,0
25.01.2022	11,5	41,9	12,9	41,4	15,5	57,2	17,3	56,5
26.01.2022	12,5	39,8	13,0	39,1	15,7	57,0	16,2	56,0
27.01.2022	12,0	39,5	13,1	38,9	15,8	56,8	17,2	55,9
28.01.2022	12,5	40,2	14,1	39,8	16,0	56,6	18,0	56,0
29.01.2022	13,2	38,4	15,3	38,1	16,0	56,5	18,5	56,0
30.01.2022	11,6	42,1	12,9	41,7	15,8	56,8	17,6	56,3
31.01.2022	12,2	46,4	12,8	45,8	15,6	57,1	16,3	56,4
01.02.2022	13,0	45,6	13,9	45,7	15,8	57,3	16,9	57,4
02.02.2022	12,8	45,7	13,3	46,0	15,7	57,4	16,3	57,8
03.02.2022	12,4	46,6	11,5	47,2	15,6	57,2	14,4	57,9
04.02.2022	12,2	48,2	11,5	49,0	15,7	57,3	14,7	58,3
05.02.2022	15,2	46,2	15,8	46,7	15,8	57,2	16,4	57,8
06.02.2022	14,8	46,0	13,8	47,0	15,8	57,3	14,7	58,5
07.02.2022	15,2	46,3	14,1	47,1	15,7	57,4	14,6	58,4
08.02.2022	15,3	46,5	14,0	48,4	15,8	57,3	14,4	59,6
09.02.2022	12,8	48,2	12,2	49,6	16,0	57,1	15,2	58,8
10.02.2022	11,5	49,2	10,5	51,2	15,9	57,3	14,5	59,6
11.02.2022	9,5	49,5	8,7	50,9	15,4	57,8	14,0	59,4
12.02.2022	9,2	49,8	8,4	51,2	15,2	57,5	13,9	59,1

8.3 Příloha – tabulka p.3

Příloha 3 Očištěná produkce bioplynu kuchyňských odpadů v ml

Datum	mezofilní podmínky (42 °C)	Kumulativní produkce	termofilní podmínky (55 °C)	Kumulativní produkce
27.12.2021	0	0	0	0
28.12.2021	2314	2314	5929	5929
29.12.2021	3943	6257	7157	13086
30.12.2021	1221	7479	429	13514
31.12.2021	557	8036	257	13771
01.01.2022	821	8857	2186	15957
02.01.2022	1307	10164	800	16757
03.01.2022	2157	12321	6143	22900
04.01.2022	2429	14750	13929	36829
05.01.2022	3607	18357	50000	86829
06.01.2022	5221	23579	74643	161471
07.01.2022	5393	28971	58429	219900
08.01.2022	5871	34843	23000	242900
09.01.2022	5950	40793	7714	250614
10.01.2022	5871	46664	5343	255957
11.01.2022	6329	52993	4721	260679
12.01.2022	6593	59586	3971	264650
13.01.2022	6250	65836	3236	267886
14.01.2022	6529	72364	3757	271643
15.01.2022	6436	78800	8914	280557
16.01.2022	6457	85257	10571	291129
17.01.2022	6500	91757	9357	300486
18.01.2022	6743	98500	9714	310200
19.01.2022	6936	105436	11271	321471
20.01.2022	7271	112707	10286	331757
21.01.2022	7257	119964	8957	340714
22.01.2022	7057	127021	8843	349557
23.01.2022	7571	134593	8243	357800
24.01.2022	7829	142421	8114	365914
25.01.2022	7286	149707	6093	372007
26.01.2022	7907	157614	7643	379650
27.01.2022	7743	165357	8843	388493
28.01.2022	7629	172986	8536	397029
29.01.2022	7657	180643	9043	406071
30.01.2022	7886	188529	8721	414793
31.01.2022	8021	196550	11171	425964
01.02.2022	7836	204386	7643	433607
02.02.2022	7950	212336	16114	449721
03.02.2022	7686	220021	15800	465521
04.02.2022	7707	227729	14650	480171
05.02.2022	7807	235536	15350	495521
06.02.2022	7800	243336	12857	508379
07.02.2022	7971	251307	11336	519714
08.02.2022	8057	259364	11279	530993
09.02.2022	7893	267257	11800	542793
10.02.2022	7750	275007	11593	554386
11.02.2022	7464	282471	11236	565621
12.02.2022	7586	290057	11093	576714

8.4 Příloha – tabulka p.4

Příloha 4 Očištěná relativní produkce metanu ze vzorku odpadů

Datum	CH ₄ - Mezofilní podmínky (44 °C)	CH ₄ - Termofilní podmínky (55 °C)
27.12.2021	0,0	0,0
28.12.2021	12,2	0,0
29.12.2021	15,5	11,8
30.12.2021	10,2	9,2
31.12.2021	9,6	10,1
01.01.2022	9,8	8,9
02.01.2022	13,8	13,1
03.01.2022	23,8	34,1
04.01.2022	28,5	55,0
05.01.2022	34,1	64,2
06.01.2022	52,8	70,1
07.01.2022	56,8	65,5
08.01.2022	57,3	66,1
09.01.2022	58,9	62,0
10.01.2022	59,9	57,8
11.01.2022	60,5	59,3
12.01.2022	60,8	58,6
13.01.2022	61,4	61,0
14.01.2022	61,2	61,2
15.01.2022	61,1	61,4
16.01.2022	61,7	63,5
17.01.2022	59,7	61,9
18.01.2022	62,0	64,8
19.01.2022	60,7	63,0
20.01.2022	59,6	61,4
21.01.2022	60,6	62,5
22.01.2022	62,6	64,4
23.01.2022	63,2	63,0
24.01.2022	64,1	63,4
25.01.2022	63,8	63,0
26.01.2022	64,3	63,3
27.01.2022	64,3	63,2
28.01.2022	63,6	63,0
29.01.2022	64,2	63,7
30.01.2022	63,2	62,5
31.01.2022	61,7	60,9
01.02.2022	62,3	62,5
02.02.2022	62,5	62,9
03.02.2022	61,7	62,5
04.02.2022	61,2	62,3
05.02.2022	61,9	62,6
06.02.2022	62,2	63,5
07.02.2022	62,2	63,3
08.02.2022	62,0	64,4
09.02.2022	60,9	62,7
10.02.2022	60,8	63,2
11.02.2022	61,4	63,0
12.02.2022	60,8	62,5

8.5 Příloha – tabulka p.5

Příloha 5 Hodnoty měrné produkce metanu v ml ze vzorku odpadů

Datum	Měrná produkce CH ₄ - Mezofilní podmínky (42 °C)	Kumulace - Mezofilní podmínky (42 °C)	Měrná produkce CH ₄ - Termofilní podmínky (55 °C)	Kumulace - Termofilní podmínky (55 °C)
27.12.2021	0	0	0	0
28.12.2021	282	282	0	0
29.12.2021	613	895	843	843
30.12.2021	125	1020	39	883
31.12.2021	54	1074	26	909
01.01.2022	81	1154	193	1102
02.01.2022	180	1334	105	1207
03.01.2022	514	1848	2092	3299
04.01.2022	692	2540	7667	10966
05.01.2022	1232	3772	32102	43067
06.01.2022	2756	6528	52293	95360
07.01.2022	3065	9593	38275	133635
08.01.2022	3366	12959	15197	148832
09.01.2022	3503	16462	4779	153612
10.01.2022	3514	19976	3090	156702
11.01.2022	3826	23803	2800	159502
12.01.2022	4006	27808	2327	161828
13.01.2022	3835	31643	1973	163801
14.01.2022	3995	35638	2299	166100
15.01.2022	3929	39567	5477	171578
16.01.2022	3987	43554	6710	178287
17.01.2022	3880	47433	5792	184079
18.01.2022	4178	51611	6297	190376
19.01.2022	4211	55822	7098	197474
20.01.2022	4331	60153	6312	203786
21.01.2022	4400	64553	5602	209388
22.01.2022	4418	68970	5698	215087
23.01.2022	4782	73752	5195	220282
24.01.2022	5021	78774	5141	225423
25.01.2022	4645	83419	3837	229259
26.01.2022	5085	88504	4835	234094
27.01.2022	4976	93481	5590	239685
28.01.2022	4854	98335	5375	245060
29.01.2022	4918	103253	5760	250820
30.01.2022	4980	108233	5452	256272
31.01.2022	4946	113179	6803	263075
01.02.2022	4885	118064	4775	267850
02.02.2022	4966	123030	10130	277980
03.02.2022	4745	127776	9878	287858
04.02.2022	4719	132495	9122	296980
05.02.2022	4834	137329	9605	306585
06.02.2022	4849	142178	8163	314748
07.02.2022	4959	147137	7171	321920
08.02.2022	4992	152129	7269	329188
09.02.2022	4806	156935	7397	336585
10.02.2022	4712	161647	7332	343917
11.02.2022	4580	166227	7083	351000
12.02.2022	4612	170839	6929	357929