



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VÝROBA BIOPLYNU

BIOGAS PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Rybecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Sitek

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Adam Rybecký**
Studijní program: Energetika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Sítek**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba bioplynu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bioplyn vzniká biologickým rozkladem organických materiálů a po přepracování z něj lze získat biometan, který je složením identický se zemním plynem a jeví se tak jako ideální ekologická náhrada tohoto fosilního paliva. V Dánsku se takto již dnes vyrábí asi pětina spotřeby plynu a nezávislost na dovozu tak není zcela nereálná. Práce bude zaměřena na současný i předpokládaný budoucí stav bioplynové infrastruktury v ČR.

Cíle bakalářské práce:

- popsat problematiku bioplynové infrastruktury,
- shrnout význam bioplynu v české energetice a nastínit předpokládaný vývoj,
- experimentálně vyhodnotit vliv vybraných parametrů na kvalitu a kvantitu bioplynu.

Seznam doporučené literatury:

STRAKA, František a CIAHOTNÝ, Karel. Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]. 3., zkrác. vyd. Praha: GAS, 2010. ISBN 978-80-7328-235-6.

HORBAJ, Peter; MARASOVÁ, Daniela a ANDREJČÁK, Imrich. Bioplyn a jeho využitie. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2021. ISBN 978-80-248-4558-6.

BHATNAGAR, Navodita (ed.). Biogas: from waste to fuel. Oakville, Canada: Arcler Press, 2020. ISBN 978-1-77407-362-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bioplyn představuje stabilní a regulovatelný obnovitelný zdroj energie, který pomáhá snižovat závislost na fosilních palivech a díky tomu snižuje emise skleníkových plynů. Produkce bioplynu využívá biologicky rozložitelný odpad, jako například zemědělský nebo potravinářský, čímž přispívá k snižování odpadu, který by končil na skládkách. Tato bakalářská práce se zabývá problematikou technologie výroby bioplynu anaerobní fermentací. Proces výroby bioplynu je velmi citlivý na mnoho faktorů, přičemž mezi hlavní patří pH ve fermentoru, poměr C/N, teplota a hydraulická doba zdržení. Existují různé technologie výroby bioplynu, které jsou od sebe odlišeny faktory jako jsou například obsah sušiny ve vstupním substrátu nebo podle teplotního režimu vně fermentoru. Nejběžnější technologií k výrobě bioplynu v praxi je metoda mokré fermentace. Role bioplynu v energetickém mixu ČR, ale i v EU bude do budoucna růst, a to v jeho upgradované formě na biometan, jelikož je zcela záměnný se zemním plynem a může být využit v jakémkoliv odvětví a v jakékoliv formě. Experimentální část této bakalářské práce se zabývá a popisuje vlastní postup výroby bioplynu pomocí technologie mokré anaerobní fermentace a následně vyhodnocuje vlivy vybraných faktorů jako je teplota, dusíkatá atmosféra, doba zdržení a ředění obsahu fermentoru na kvalitu a kvantitu bioplynu.

Klíčová slova

Bioplyn, bioplynová stanice, obnovitelný zdroj energie, anaerobní fermentace, biometan

ABSTRACT

Biogas is a stable and controllable renewable energy source that helps to reduce dependence on fossil fuels and thus reduces greenhouse gas emissions. Biogas production uses biodegradable waste, such as agricultural or food waste, thus contributing to the reduction of waste going to landfill. This bachelor thesis deals with the technology of biogas production by anaerobic digestion. The biogas production process is very sensitive to many factors where the main ones are pH in the fermenter, C/N ratio, temperature and hydraulic residence time. There are different biogas production technologies that are distinguished from each other by factors such as the dry matter content of the feedstock or by the temperature regime outside the fermenter. The most common technology for biogas production in practice is the wet fermentation method. The role of biogas in the energy mix of the Czech Republic, but also in the EU, will grow in the future, in its upgraded form to biomethane, as it is completely interchangeable with natural gas and can be used in any sector and in any form. The experimental part of this bachelor thesis deals with and describes the actual process of biogas production using wet anaerobic digestion technology and then evaluates the effects of selected factors such as temperature, nitrogen atmosphere, residence time and dilution of fermenter contents on the quality and quantity of biogas.

Key words

Biogas, biogas plant, renewable energy source, anaerobic fermentation, biomethane

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RYBECKÝ, Adam. *Výroba bioplynu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157650>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Tomáš Sitek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Výroba bioplynu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Tomáši Sitkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Janě Slavíkové za poskytnutí kukuřičné siláže, obsahu fermentoru a nahlédnutí do BPS Nížkovice. Také bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu během psaní bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Bioplyn	10
1.1 Složení a vlastnosti bioplynu	10
2 Anaerobní digesce a její průběh.....	12
2.1 Fáze anaerobní digesce.....	13
2.2 Faktory ovlivňující anaerobní fermentaci.....	13
2.2.1 Teplota	13
2.2.2 Hydraulická doba zdržení	14
2.2.3 Poměr C/N.....	14
2.2.4 pH	14
2.2.5 Další faktory ovlivňující anaerobní digesti	15
2.3 Substráty vhodné pro fermentaci	15
3 Technologie výroby bioplynu.....	17
3.1 Obsah sušiny	17
3.2 Způsoby dávkování substrátu do fermentoru.....	17
3.3 Počet stupňů fermentace.....	18
3.4 Teplotní režimy.....	18
3.5 Druhy bioplynových stanic.....	18
3.6 Technologie bioplynové stanice na mokrou fermentaci.....	19
3.6.1 Příjmový systém	20
3.6.2 Doprava a dávkování substrátů	20
3.6.3 Fermentor a jeho vybavení.....	20
3.6.4 Čištění a následné využití bioplynu	21
3.6.5 Koncový sklad fermentačního zbytku a jeho využití	22
4 Energetický mix ČR a role bioplynu.....	23
4.1 Současný stav bioplynu v EU	24
4.2 Předpokládaný potenciál rozvoje bioplynu v ČR	26
5 Experimentální výroba bioplynu.....	28
5.1 Příprava před provedením pokusů	28
5.2 Pokus č. 1 – PET láhve.....	28
5.3 Pokus č. 2 – Vzorkovnice	33
5.4 Pokus č. 3 – Snížení množství vstupního substrátu	35
5.5 Pokus č. 4 – Skleněný fermentor	36
ZÁVĚR.....	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	46
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	47
SEZNAM TABULEK.....	48

ÚVOD

V dnešní době se mnoho zemí na světě potýká s problémy s nadměrnou produkcí biologicky rozložitelných odpadů z různých odvětví průmyslu, zemědělství a domácností. Anaerobní fermentace neboli způsob výroby bioplynu řeší otázku využití a zpracování biologicky rozložitelného odpadu a představuje možnost energetického využití ve formě bioplynu. Bioplyn je považován za obnovitelný zdroj energie, jelikož vzniká z biologicky rozložitelných odpadů nebo biomasy, která CO_2 v průběhu života spotřebovává.

Bioplyn má potenciál významně přispět k dekarbonizaci a omezení závislosti na fosilních palivech (uhlí, zemní plyn, ropa). Využití bioplynu není omezeno pouze na energetické odvětví, ale také na sektor dopravy, zemědělství či sektor odpadového hospodářství. Bioplyn je momentálně nejčastěji spálen v kogenerační jednotce a využit na výrobu elektrické energie a tepla. Jako lepší varianta využití se jeví upgrading bioplynu na biometan, kvůli vyšší energetické hodnotě a většímu spektru využití (doprava, energetika, výroba tepla a chladu). Právě proto je budoucnost směřovaná k biometanu, jelikož je to výborná náhrada zemního plynu, a díky skvěle rozšířené plynárenské síti je jeho distribuce, skladování i následné využití velmi jednoduché a nepotřebuje žádnou velkou modernizaci.

Velkou výhodou výroby bioplynu v bioplynových stanicích je, že jako jeden z mála obnovitelných zdrojů energie může být provozován skoro nepřetržitě po celý rok a je snadno regulovatelný. Z toho vyplývá, že výroba bioplynu není ovlivňována žádnými klimatickými podmínkami a dalšími faktory, které jsou pro jiné obnovitelné zdroje energie problematické, což umožňuje stálost dodávky elektrické energie do distribuční sítě nebo biometanu do sítě plynárenské.

1 Bioplyn

Bioplyn patří mezi plyny, které vznikají rozkladem organické hmoty mikroorganismy bez přístupu kyslíku neboli anaerobní fermentací. Rozklad probíhá díky metanogenním bakteriím, které se taky například nacházejí v trávicím traktu přežvýkavců [1]. První cíleně vyrobený bioplyn byl vyroben na konci 19. století v Anglii, a to v čistírně odpadních vod. Následně byl plyn jímán a využíván k vytápění a osvětlení čistírny odpadních vod. Proto se dříve označoval jako kalový plyn. Dnes je v technické praxi označení bioplyn spojováno se vznikem plynu v technologických zařízeních jako jsou například bioplynové stanice, čistírny odpadních vod a uzavřené skládky komunálního odpadu [2].

1.1 Složení a vlastnosti bioplynu

Bioplyn je směs plynů, tvořená především metanem a oxidem uhličitým. Objevují se zde i další plyny jako dusík, vodík, sulfan a malé množství vodních par [3]. Složení bioplynu závisí na typu vstupního organického substrátu a způsobu výroby [4]. Hlavní podíl metanu v bioplynu produkují vstupní substráty, které obsahují polysacharidy, často ve formě celulóзовých typů, jako je například škrob. Další složky obsažené ve vstupních substrátech, které se podílí na složení bioplynu jsou tuky a proteiny. Proteiny obsahují ale také síru a dusík, což jsou nežádoucí prvky. Ze síry vzniká sirovodík, který poté během spalování bioplynu způsobuje korozi a dusík, který tvoří amonné soli, což může celý proces ukončit nebo zpomalit [2]. Složení bioplynu je uvedeno v tab. 1. Bioplyn je bezbarvý hořlavý plyn [5]. Základní vlastnosti bioplynu jsou uvedeny v tab. 2.

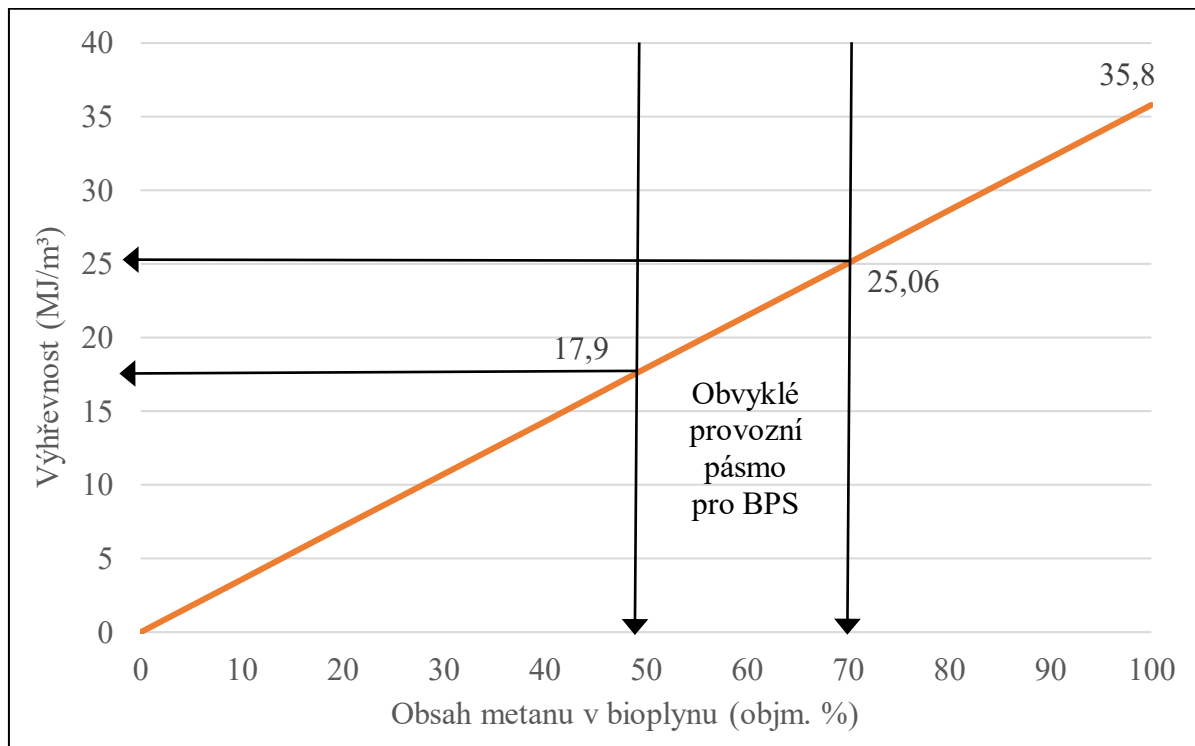
Tab. 1 Běžné složení bioplynu [6]

Složka	Procentuální obsah
Metan – CH ₄	45–75 %
Oxid uhličitý – CO ₂	25–48 %
Vodík – H ₂	0–3 %
Dusík – N ₂	1–3 %
Sirovodík – H ₂ S	0,1–1 %
Čpavek – NH ₃	stopy

Tab. 2 Vlastnosti bioplynu s obsahem 60 % CH₄ [6]

Základní vlastnost	Bioplyn (60 % CH ₄)
Výhřevnost (MJ/m ³)	21,5
Meze výbušnosti (objm. %)	6–12
Teplota vznícení (°C)	650–750
Měrná hmotnost (kg/m ³)	1,2

Výhřevnost je závislá hlavně na podílu metanu v bioplynu a pohybuje se v rozmezí 18–25 MJ/m³. Podíl metanu obsažený v bioplynu závisí na typu vstupního substrátu a na technologickém zařízení, které bioplyn produkuje [6]. Na *grafu 1* je možné vidět, jak se mění výhřevnost bioplynu s procentuálním obsahem.

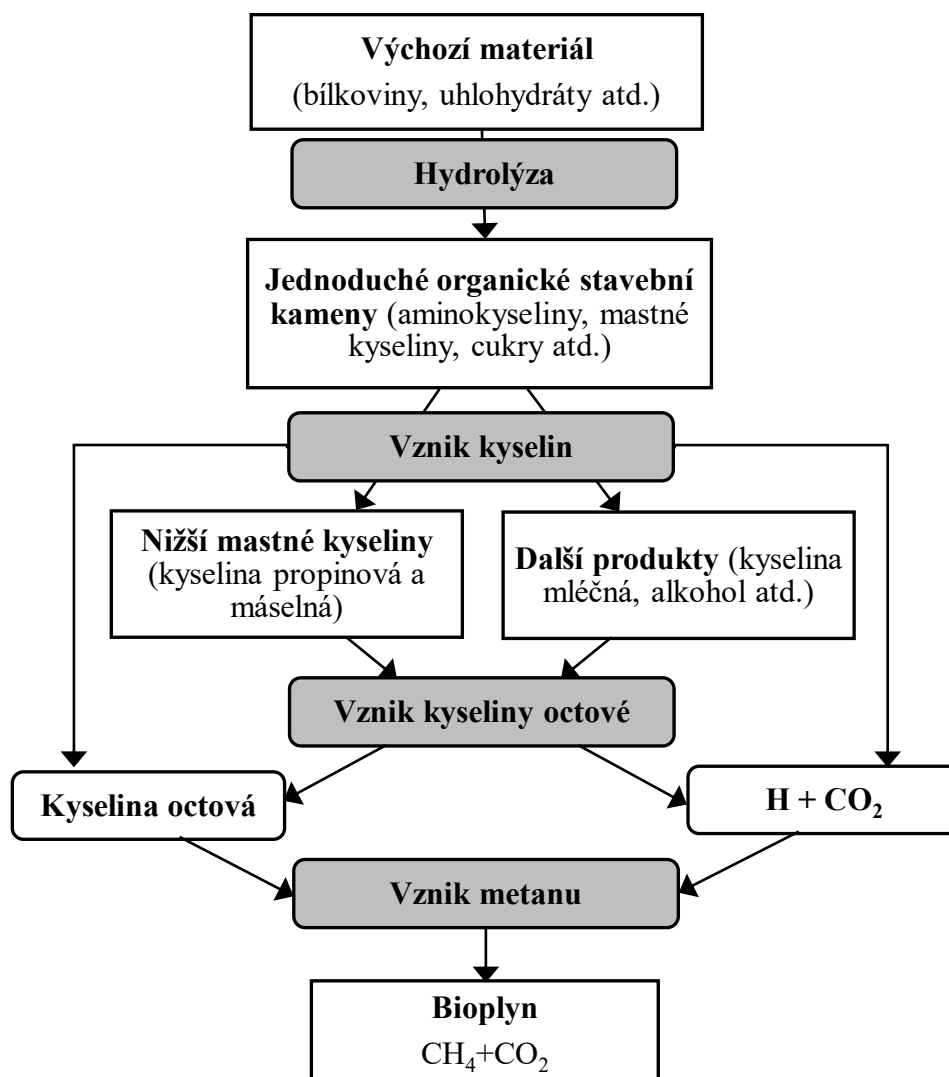


Graf 1 Výhřevnost bioplynu v závislosti na obsahu metanu. Upraveno dle [3]

2 Anaerobní digesce a její průběh

Anaerobní digesce bývá někdy také označována jako anaerobní fermentace, anaerobní vyhnívání nebo biometanizace [6]. Je to proces, který se skládá z řady biochemických reakcí, při kterém bakterie rozkládají organické látky na bioplyn za nepřítomnosti vzduchu [7]. Anaerobní digesce umožňuje efektivní využití biologicky rozložitelných odpadů z různých odvětví jako například z potravinářského průmyslu, zemědělství nebo kalů z čistíren odpadních vod. V poslední době probíhá i fermentace cíleně pěstované biomasy. 30–60 % sušiny vstupního organického substrátu je v průběhu anaerobní digesce rozloženo mikroorganismy na bioplyn [6].

Průběh anaerobní digesce je složen z biochemických reakcí, které lze rozdělit do čtyř různých fází, jež na sebe postupně navazují. Jsou to hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze, jak je znázorněno na *obr. 1*. Určité skupiny bakterií jsou v různých fázích aktivnější než jiné a produkty jedné fáze jsou využity jako vstupní surovina pro fáze pozdější [7]. Pokud by jakákoli fáze nenastala, tak to bude mít za důsledek narušení celého systému produkce bioplynu [6]. V zařízeních na výrobu bioplynu se tyto čtyři fáze uskutečňují simultánně. Cílem v těchto zařízeních je dosažení tzv. stabilizované metanogeneze, což je dlouhodobé udržování rovnováhy mezi navazujícími fázemi, a to hlavně mezi fázemi acidogenními a metanogenními, aby docházelo k produkci bioplynu [2].



Obr. 1 Průběh fází anaerobní digesce s meziprodukty. Upraveno dle [8]

2.1 Fáze anaerobní digesce

Hydrolyza je první fází anaerobní fermentace. Jedná se o rozklad makromolekulárních látek fakultativně anaerobními bakteriemi, což znamená, že tato fáze může začínat za přítomnosti i bez přítomnosti kyslíku [2]. V procesu hydrolytické bakterie produkují enzymy, které jsou schopné rozkládat proteiny, sacharidy a lipidy na cukry, mastné kyseliny s dlouhými řetězci, aminokyseliny a další jednoduché organické sloučeniny. Tento proces slouží k rozkladu složitých makromolekul na jednoduché sloučeniny, které mohou být následně využity acidogenními bakteriemi. Rychlost rozkladu v hydrolytické fázi závisí na vstupním substrátu, protože látky jako lignin, celulóza a hemicelulóza se obtížně rozkládají anebo se vůbec nerozloží kvůli své složité struktuře [9].

Následuje fáze acidogeneze, kde dochází k přeměně produktů z hydrolytické fáze pomocí acidogenních anaerobních bakterií na mastné organické kyseliny s krátkým řetězcem. Jsou to např. kyselina octová, mravenčí, propionová a máselná. Dále také ke tvorbě alkoholů jako etanolu a metanolu. V poslední řadě dochází ke tvorbě oxidu uhličitého, vodíku a dalších vedlejších produktů [10]. Některé produkty jako oxid uhličitý a vodík jsou v poslední fázi metanogeny snadno využitelné, jinak ostatní produkty musí být dále zpracovány pro fázi produkce metanu. Acidogeneze je velmi rychlý proces [7].

Acetogeneze je hlavní proces, při kterém dochází k tvorbě kyseliny octové působením acetogenních bakterií, jako vedlejší produkt této reakce vzniká vodík a oxid uhličitý [11]. Průběh reakcí není v této fázi termodynamicky samovolný, pokud parciální tlak vodíku překročí určitou hranici, dojde k ukončení acetogení fáze. Naštěstí zde existuje syntrofický vztah mezi bakteriemi acetogenními a metanogenními, a právě poslední zmíněné vyprodukovaný nadměrný vodík v této fázi spotřebují [7]. Proto se také někdy uvádí, že acetogenní fáze ukazuje účinnost produkce bioplynu, protože přibližně 70 % metanu vzniká při redukci acetátů [10].

Metanogeneze je závěrečná fáze, kdy metan vzniká z předešlých meziproductů fází díky metanogenním bakteriím. Tato fáze je striktně anaerobní, protože metanogenní bakterie se nemohou vyvíjet (růst a přežívat) v přítomnosti kyslíku. Metanogenní bakterie se v této fázi dělí na dvě skupiny. Na acetofilní, které rozkládají kyselinu octovou na metan a oxid uhličitý. Druhou skupinu představují metanogenní bakterie hydrogenofilní, které produkují metan z vodíku a oxidu uhličitého [7]. Acetofilní bakterie vyprodukují zhruba dvě třetiny metanu a zbývající jednu třetinu bakterie hydrogenofilní [9]. Dochází zde také ke změně pH. V acidogenní fázi se pH pohybuje mezi 4 až 5,8, kdežto v metanogenní fázi pH prudce roste díky acetofilním bakteriím a jeho rozmezí se pohybuje mezi pH 6 až 8 [2].

2.2 Faktory ovlivňující anaerobní fermentaci

Bakterie, které se účastní procesu anaerobní digesce, jsou citlivé na několik faktorů vyskytujících se během procesu. Na základě vlastností vstupního substrátu a okolního prostředí se optimalizací těchto parametrů řídí účinnost a rychlost procesu fermentace [7]. Tyto faktory mohou zpomalit nebo úplně zastavit celý proces anaerobní fermentace, pokud nejsou dodrženy určité podmínky [5]. Některé z těchto faktorů jsou uvedeny následně:

2.2.1 Teplota

Proces anaerobní fermentace je přímo závislý na teplotě. S rostoucí teplotou se zrychluje proces rozkládání organické hmoty a zvyšuje se produkce plynu, naopak klesá doba zdržení, což má za následek nižší obsah metanu v bioplynu. Pracovní rozptyl metanogenních bakterií je od 0 do 70 °C, existují zde i druhy, které dokáží žít i při 90 °C. Při vyšších teplotách hynou, a při teplotách nižších než 0 °C bakterie nepracují, ale pouze přežívají. Jako dolní hranice, při které

bakterie mohou pracovat, se udává teplota mezi 3 až 4 °C [12]. Při anaerobní fermentaci existují tři různé teplotní oblasti. První oblast je psychofilní a teploty se zde pohybují od 3 do 20 °C. Druhou oblastí je oblast mezofilní, teploty jsou zde v rozptylu od 20 do 40 °C a poslední teplotní oblastí je oblast termofilní, kde se teploty pohybují od 40 do 70 °C [13]. Metanogenní bakterie jsou citlivé na změny teplot. V mezofilní oblasti jsou schopny vydržet změnu teploty o 2 až 3 °C, zatímco v termofilní oblasti by výkyv teploty neměl být větší než 1 °C [12].

2.2.2 Hydraulická doba zdržení

Hydraulická doba zdržení (někdy označována jako HRT) udává průměrnou dobu, po kterou se substrát nachází ve fermentoru [7]. Účinnější rozklad je dosažen při delších dobách zdržení substrátů ve fermentorech, na druhou stranu klesá množství vznikajícího bioplynu. Hydraulická doba zdržení je ovlivněna hlavně teplotou a organickou sušinou substrátu. Teplota snižuje dobu kontaktu, sušina ji naopak zvyšuje [12]. Hydraulická doba zdržení se vypočítá podle rovnice (1). Z toho plyne že delší HRT vyžaduje větší objem fermentoru, což zvyšuje investiční náklady [7].

$$HRT = \frac{V_d}{V_s} \text{ (dny)} \quad (1)$$

V_d – objem fermentoru (m^3); V_s – množství substrátu dodaného během jednoho dne (m^3/den)

2.2.3 Poměr C/N

Poměr C/N udává podíl celkového uhlíku a dusíku obsaženého v substrátu, pro správný průběh anaerobní digesce je optimum, aby se C/N pohyboval v rozmezí 20 až 30 : 1. Nízký poměr C/N představuje vyšší koncentraci dusíku, který vede k vysokému obsahu amoniaku a ten se poté stává toxickým pro metanogenní bakterie a inhibuje proces, což má za následek nízkou produkci metanu [14]. Naopak vysoký poměr C/N vede k nedostatku dusíku pro mikroorganismy, a tím pádem nedojde k přeměně zbylého uhlíku, což má za následek nevyužitý možný potenciál produkce bioplynu [8]. Z tohoto pohledu se jeví jako optimální způsob kofermentace více různých substrátů. To znamená, že substráty, které jsou chudé na dusík nebo uhlík, jsou smíchány s jinými substráty, aby bylo dosaženo požadovaného poměru [9].

2.2.4 pH

Hodnota pH je jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících proces anaerobní digesce, jelikož metanogenní bakterie jsou citlivé na kyselé prostředí, které by mohlo negativně ovlivnit produkci bioplynu. V procesu se pH mění díky čtyřem různým fázím [5]. Acidogenní bakterie nejlépe fungují okolo hodnoty pH 5, metanogenní bakterie zase prosperují až při pH vyšších než 6,2. Obecně se dá říci, že metanogenním bakteriím se daří v běžném rozmezí pH 6,5 až 8, kdy optimum je 6,8 až 7,2 pH. Jakákoli odchylka od běžného rozmezí může mít za následek to, že se fermentor stává kyselým nebo zásaditým, což může ovlivnit produkci bioplynu [14]. Pokud dojde k přetížení fermentoru, produkce kyselin v předmetanizační fázi je rychlejší než jejich spotřeba, a dojde k snížení pH ve fermentoru [15]. Z tohoto důvodu je udržování konstantní hodnoty pH důležité, a pro jeho udržení se používají alkalizační činidla, jako je například vápno [5].

2.2.5 Další faktory ovlivňující anaerobní digesti

Zatížení fermentoru organickými látkami popisuje maximální možné vstupní množství organické sušiny substrátu na metr krychlový za den. Toto množství nám zaručí, že nedojde k přesycení bakterií a zastavení procesu. Vyšší, než optimální zatížení fermentoru organickými látkami může způsobit toxicitu fermentoru a snížit metanogenní aktivitu, na druhé straně nižší zatížení snižuje produkci bioplynu [7].

Inhibitory jsou látky, které proces anaerobní fermentace mohou zastavit. Je potřeba zde rozlišit nežádoucí látky na ty, které se sem dostaly v substrátu a ty, které jsou mezi produkty jedné z fází anaerobní fermentace. Mezi inhibující látky patří hlavně čpavek, mastné kyseliny, sulfidy, ionty alkalických kovů (Na, K) a kovů alkalických zemin (Mg, Ca), těžké kovy. V neposlední řadě je potřeba taky zmínit antibiotika, herbicidy a různé dezinfekční prostředky, které se mohou do procesu dostat skrz vstupní substrát [8].

Míchání slouží pro rovnoměrné rozložení organické náplně neboli substrátu ve fermentoru. Tento proces umožňuje procházení plynu pěnou a její rozrušování, teplotní homogenitu ve fermentoru, zabraňuje sedimentaci substrátu, a tím umožňuje bakteriím homogenní kontakt s organickými materiály, což vede k urychlení probíhajících reakcí. Výsledkem míchání je, že se produkce plynu zvýší o 10 až 15 % [13]. Míchání také napomáhá k zředění toxických látek ve fermentoru, a také k odstraňování přebytečného CO₂, které má inhibiční účinky při parciálních tlacích vyšších než 0,2 barů [5].

Kyslík je pro metanogenní bakterie toxický, jelikož jsou striktně anaerobní a jeho zvýšená přítomnost ve fermentoru inhibuje celý proces anaerobní digestce. Je však možné, že fakultativní anaerobní bakterie tento kyslík spotřebují v první fázi dříve, než se stihnou projevit jeho toxické účinky [5].

Světlo bakterie neusmrcuje, pouze proces anaerobní digestce zpomaluje. Proto je potřeba zamezit přístupu světla [12].

Vlhkost je pro metanogenní bakterie důležitá, jelikož jsou zvyklé fungovat pouze ve vlhkých prostředích, kde vlhkost prostředí dosahuje alespoň 50 % [16].

Velikost částic vstupního substrátu je potřeba rozemlít na menší částice, aby bylo docíleno velké kontaktní plochy [12]. Tento faktor ovlivní rozklad a v konečném důsledku se zvýší produkce bioplynu [17].

2.3 Substráty vhodné pro fermentaci

K výrobě bioplynu lze použít širokou škálu vstupních substrátů, tvořenou převážně z biomasy (jak z živočišných odpadů, tak z rostlinných zbytků) [4]. Vstupní substráty z biomasy se skládají z tuků, bílkovin, sacharidů, celulózy a hemicelulózy, které jsou nezbytnými složkami pro bakterie k produkci bioplynu [14]. Substráty obsahující lignin jsou z hlediska anaerobní fermentace balastním materiálem a bez předchozí fyzikálně-chemické úpravy se procesu tvorby metanu neúčastní. Nejčastěji se jedná o dřevní biomasu [7].

Biomasa pro účely fermentace v bioplynových stanicích lze rozdělit do dvou skupin, a to na cíleně pěstovanou biomasu a na biomasu odpadní. Do cíleně pěstované biomasy patří energetické plodiny jako čirok, dále také olejniny, cukrová řepa a obilí. Do biomasy odpadní spadají například rostlinné zbytky ze zemědělské výroby, odpady z živočišné výroby jako exkrementy hospodářských zvířat, biologicky rozložitelné odpady a organické odpady z průmyslu [16]. Biomasa odpadní se vyhýbá problémům s využíváním půdy, které jsou spojeny s energetickými plodinami a využitím odpadní biomasy můžeme zachytit metan, který by mohl být jinak uvolněn do atmosféry při rozkladu. Tyto faktory je potřeba zohlednit při posuzování emisí při výrobě bioplynu [4]. Nejvíce používaných substrátů vhodných pro fermentaci je produkováno v zemědělství. Například to mohou být odpady z živočišné

produkce, kejda nebo cíleně pěstované energetické plodiny. V neposlední řadě se také používají odpady z potravinářského průmyslu, biologicky rozložitelné odpady a různé kaly (z čistíren odpadních vod). Velká variabilita vlastností vstupní biomasy představuje výzvu pro použití správné technologie [7]. V tab. 3 jsou ukázány požadované vlastnosti vstupního substrátu z biomasy.

Tab. 3 Základní vlastnosti materiálů vhodných pro fermentaci [15]

Organické látky (% sušiny)	Sušina (%)	Poměr C/N	pH
nad 50	5–35	20–40 : 1	6,5–7,5

V tab. 4 jsou zobrazeny vybrané příklady vstupních substrátů bioplynových stanic. Důležité je, aby obsahovaly nízký obsah popeloviny a měly vysoký podíl organicky rozložitelných látek [18].

Tab. 4 Vybrané příklady vstupních substrátů a jejich vlastnosti. Upraveno dle [18]

Vstupní substrát	Sušina (hm. % sušiny)	Organická sušina (hm. % sušiny)	Výnos bioplynu (m ³ /t sušiny)	Obsah metanu v bioplynu (objm. %)
Prasečí kejda	cca 7	75–86	300–700	60–70
Kukuřičná siláž	20–35	85–95	450–700	50–55
Pivovarské mláto	20–25	70–80	580–750	59–60
Obsah bachorů	11–19	80–90	200–400	58–62
Separovaný bioodpad	40–75	50–70	150–600	58–65
Údržba zeleně v městě	cca 12	83–92	550–680	55–65

V praxi dochází ke kofermentaci neboli smíchání více vstupních substrátů dohromady, což utvoří homogenizovanou směs, obvykle je to biomasa smíchaná s kejdou [6]. Tímto způsobem lze optimalizovat vlastnosti vstupních materiálů, jako pH, poměr C/N a také sušinu [16].

3 Technologie výroby bioplynu

Zařízení určené k výrobě bioplynu se nazývají bioplynové stanice. Existuje mnoho různých typů bioplynových stanic, které můžeme v praxi vymezit dle různých technologických procesů [16]. Tyto procesy se mohou odlišovat podle povahy reagujícího materiálu [2]. Dále také podle počtů fermentace, dávkování substrátu do fermentoru a v neposlední řadě dle obsahu sušiny [12].

3.1 Obsah sušiny

Jedním z faktorů, podle kterých rozlišujeme druhy bioplynových stanic, je jejich konzistence substrátu [8]. Dle obsahu sušiny ve vstupním substrátu rozdělujeme technologii bioplynových stanic na mokrou a suchou fermentaci.

Mokrá fermentace pracuje s materiálem ve fermentoru do obsahu sušiny 12 % hmotnostní koncentrace. Vstupní materiály s vyšší sušinou, jako je například kukuřičná siláž, jsou před vstupem do fermentoru směřovány s kejdou nebo s procesní vodou, aby byla sušina naředěna na požadovanou hodnotu. Procesní voda je oddělená voda z digestátu. Vyšší obsah sušiny než 12 % hmotnostní koncentrace by ve fermentorech na mokrou fermentaci způsoboval ucpávání čerpadel, poruchy s míchadly, tvorby nánosů a mnoho dalšího. Jedná se o nejpoužívanější technologii v bioplynových stanicích [19].

Suchá fermentace je vhodná pro vstupní suroviny s obsahem sušiny vyšším než 15 % hmotnostní koncentrace [7]. Horní hranice sušiny vhodné k fermentaci se pohybuje okolo 60 % hmotnostní koncentrace, tento proces je nazýván vysoko sušinným a spadají do něho substráty, které mají sušinu vyšší než 40 % hmotnostní koncentrace [19]. Se suchou fermentací je spojován pojem fermentor garážového typu, jelikož je materiál navenzen do boxu, kde je následně uzavřen, a po spotřebování kyslíku začne probíhat anaerobní digesce, materiál je v průběhu sprchován procesní vodou [20]. Suchou fermentací je možné téměř zpracovat jakýkoliv organický materiál. Patří sem biologicky rozložitelné odpady jako například posekaná tráva, zbytky potravin a živočišný odpad [21]. Používáme ji hlavně pro zpracování organických materiálů s vysokým obsahem sušiny, z důvodu nečerpatelnosti a jejich ředění a zpracování by bylo energeticky nevýhodné [8]. Suchá fermentace představuje oproti mokré fermentaci, vyšší investiční náklady, nestálost produkce bioplynu, vyžaduje technologii na nakládání a vykládání substrátu z fermentoru, nedochází k celkovému promíchání substrátu, tím pádem ani k úplnému rozkladu což má za následek menší výtěžnost bioplynu. Na druhou stranu je zde nízká spotřeba vody, energie a tepla spojené s vyhříváním fermentoru, provozem míchadel a čerpadel. Další výhodou je tolerance vůči nečistotám obsažených ve vstupním substrátu jako jsou například písek, vláknité struktury, velké nehomogenní částice atd. Díky těmto vlastnostem je vhodná pro zpracovávání biologicky rozložitelných odpadů s vysokým obsahem sušiny (travní porosty a zeleň, kuchyňský odpad atd.), které není možné využít v mokré fermentaci [22]. Proto je volba typu fermentace velmi závislá na druhu vstupního substrátu, jeho vlastnostech a zda ho je dostatek.

3.2 Způsoby dávkování substrátu do fermentoru

Podle způsobu dávkování substrátu do fermentoru rozlišujeme technologie na diskontinuální, kontinuální a semikontinuální.

Diskontinuální plnění fermentoru probíhá najednou. Dávka substrátu poté ve fermentoru vyhnívá bez přidávání dalšího substrátu v průběhu [8]. Doba zdržení substrátu se zde pohybuje v rozmezí 30 až 50 dnů, produkce plynu u tohoto typu plnění není kontinuální, ale je přerušovaná z důvodů plnění a vyprazdňování [23]. Tento způsob je hlavně využíván

u suché fermentace [8]. K dosažení rovnoměrné produkce bioplynu touto metodou se používá metoda střídání nádrží, kdy jedna nádrž je naplněna a produkuje bioplyn, přičemž druhá nádrž je plněna substrátem z jímky. Jakmile je druhá nádrž zaplněna substrátem, tak dochází k vyprazdňování nádrže první [12].

Při kontinuálním plnění je vstupní materiál do fermentoru dávkován nepřetržitě se současným vyprazdňováním digestátu z fermentoru do skladovací nádrže. Výhoda tohoto způsobu plnění je kontinuální produkce bioplynu [23]. Tato metoda se používá při mokré fermentaci [18]. V praxi se většina fermentorů provozuje v semikontinuálním režimu [7].

Semikontinuální plnění znamená, že je do fermentoru přiváděno v průběhu dne mnohem menší množství vstupního substrátu, které se posléze rovná denní vsázce substrátu do fermentoru. Tyto procesy jsou automatizované. Vstupní substrát je uložen v zásobníku s větší kapacitou, než je jedna denní vsázka [8]. Substrát se dávkuje $1\times$ až $4\times$ nebo i vícekrát za den. Jeho vliv na změnu teploty, homogenity a dalších parametrů je zanedbatelný. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších způsobů plnění fermentorů na mokrou fermentaci [18]. Množství nového substrátu, kterým je fermentor naplněn, se rovná stejnému množství vyhnílého substrátu, který odchází do skladovací nádrže. Skladovací nádrž je zakryta folií nebo pevným krytem, což umožňuje jímat bioplyn vznikající ve skladovací nádrži a vede ke zvýšení celkového výnosu bioplynu o 20 až 40 % [12].

3.3 Počet stupňů fermentace

Podle počtu stupňů fermentace substrátu může tvorba bioplynu probíhat buď jako jednostupňový nebo vícestupňový proces. U jednostupňového procesu probíhá hydrolýza, acetogeneze, acidogeneze a metanogeneze dohromady, tj. v jednom fermentoru zároveň. Vícestupňový proces znamená, že fáze anaerobní fermentace neprobíhají zároveň, ale odděleně [12]. V zemědělských bioplynových stanicích se můžeme setkat hlavně s jednostupňovým procesem, někdy i s dvoustupňovým procesem. Dvoustupňový proces u zemědělských bioplynových stanic probíhá tak, že fáze hydrolýza a acetogeneze jsou odděleny v externím fermentoru od fází acidogeneze a metanogeneze [8].

3.4 Teplotní režimy

Bioplynové stanice jsou nejčastěji provozovány ve dvou teplotních režimech. V mezofilním režimu se teplota pohybuje mezi 32 až 38 °C. Druhý používaný režim je termofilní, kde se teplota pohybuje mezi 42 až 55 °C [8]. Většina provozovaných bioplynových stanic se v praxi provozuje v mezofilním režimu, což sice způsobí menší produkci bioplynu než termofilní fermentace, ale poskytuje stabilnější provoz procesu (odolnější vůči změnám teploty, pH a umožňují zpracovat širší spektrum vstupních substrátů) s nižšími provozními náklady [7].

3.5 Druhy bioplynových stanic

Přesné složení bioplynu závisí na typu vstupní suroviny a způsobu výroby, viz *tab. 5* [4]. Podle vstupní zpracovávané suroviny rozlišujeme bioplynové stanice na zemědělské a odpadní [24]. Bioplynové stanice zemědělské slouží především ke zpracování záměrně pěstovaných plodin, které se smíchávají s kejdou. Tyto stanice jsou v České republice nejrozšířenější. Bioplynové stanice odpadní slouží ke zpracovávání odpadů z průmyslu, například potravinářského, dále také k přetvoření biologicky rozložitelných odpadů anebo kalů z čistíren odpadních vod. Jelikož se jedná o odpadní bioplynové stanice, tak materiál musí projít určitou úpravou před tím, než je použit ve fermentoru [24]. Skládkové bioplynové stanice využívají rozkladu tuhého komunálního odpadu za anaerobních podmínek, při kterých vzniká bioplyn, který je jímán

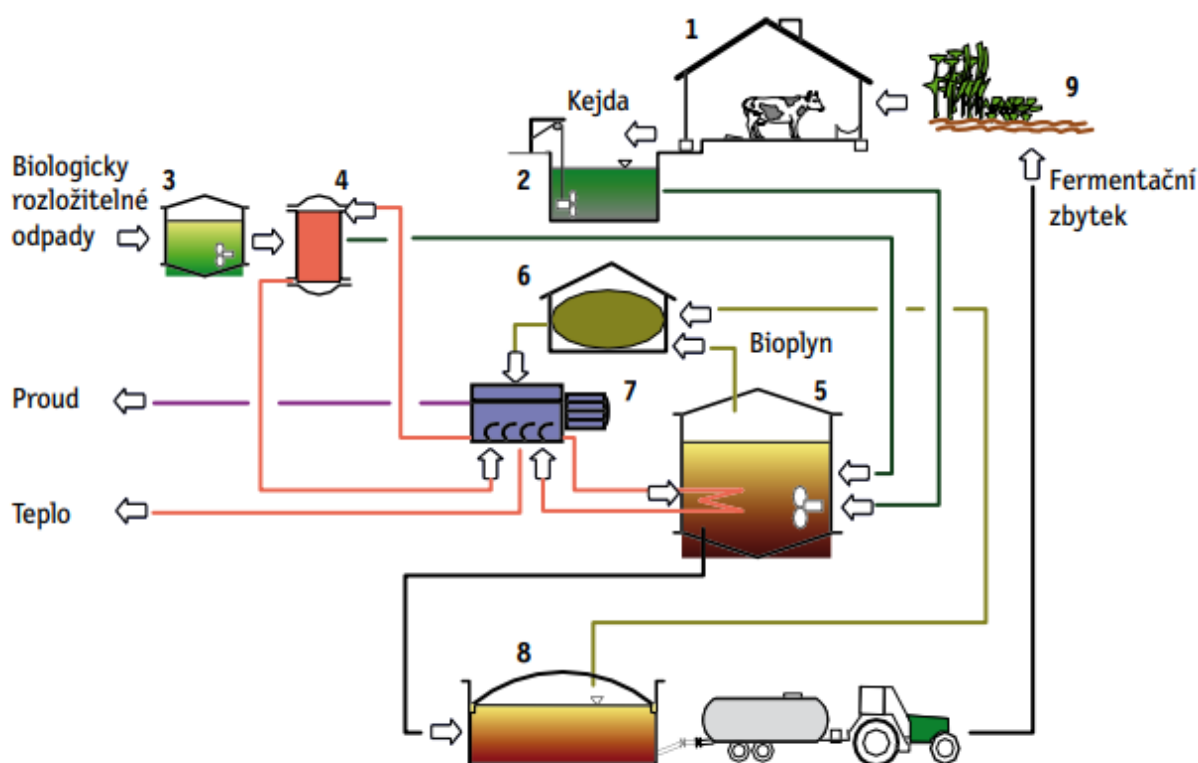
pomocí odběrných vrtů. Kompresory vyvolávají v potrubí proudění a bioplyn směřuje do místa spotřeby. Bioplynové stanice v čistírnách odpadních vod upravují a zpracovávají čistírenský kal tak, aby se dal použít jako vstupní surovina pro výrobu bioplynu v anaerobním fermentoru [4].

Tab. 5 Rozdílné složení bioplynu dle složení vstupního materiálu a místa vzniku za normálních podmínek, tj. 15 °C a 101 325 Pa [25]

Parametr	Skládkový bioplyn	Bioplyn z ČOV	Bioplyn z prasečí kejdy
CH ₄ (objm. %)	49	38	31
CO ₂ (objm. %)	46	61	69
CO (objm. %)	1	–	–
O ₂ (objm. %)	3	–	–
H ₂ S (mg/m ³)	350	1000	2300
NH ₃ (mg/m ³)	–	–	40
Výhřevnost (MJ/m ³)	16,9	21,1	24

3.6 Technologie bioplynové stanice na mokrou fermentaci

Technologie mokré fermentace je jedna z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších technologií k výrobě bioplynu [25]. Na obr. 2 lze vidět schéma zemědělské bioplynové stanice využívající mokrou fermentaci. Níže budou rozebrány jednotlivé části bioplynové stanice na mokrou fermentaci.



Obr. 2 Schéma zemědělské bioplynové stanice na mokrou fermentaci [8]

1 - stáje na dobytek, 2 – jímka na kejdu, 3 – sběrná nádrž, 4 – hygienizační jednotka, 5 – fermentor, 6 – plynojem, 7 – kogenerační jednotka, 8 – skladovací nádrž na digestát, 9 – využití digestátu jako hnojiva

3.6.1 Příjmový systém

Příjmový systém vstupního substrátu může být řešen mnoha způsoby, rozhodujícími jsou jeho vlastnosti pro skladování. Před uložením biomasy do zásobníků se provádí evidence biomasy a její analýza [18]. Příjmový systém se skládá ze zásobníku, který je určený pro skladování tuhé biomasy o obsahu sušiny vyšší než 20 % hmotnostních procent a z jímky, která slouží pro skladování kapalné biomasy se sušinou menší než 12 % hmotnostních procent [25]. Jímku na kapalnou část biomasy, většinou kejdu, lze využít i k přimíchávání kofermentů a bývá označována jako přípravná nádrž. Tento způsob není již dnes využíván a kosubstráty se přidávají do fermentoru zvlášť [12]. Jímky na kapalnou biomasu by měly být dostatečně velké, aby umožnily uložení aspoň dvoudenního potřebného substrátu. V jímce dochází k homogenizaci a některé jímky jsou vyhřívané z toho důvodu, aby se předešlo teplotnímu šoku ve fermentoru při dávkování. Hlavní funkcí příjmového systému je úprava vstupního substrátu a řízení optimálního dávkování do fermentoru [25]. Úprava se skládá ze separace hrubých příměsí, pokud jsou zpracovávány odpady, u kterých je nutná ze zákona hygienizace, je bioplynová stanice vybavena hygienizační jednotkou. Další důležitou součástí úpravy je drcení. Dojde ke zvětšení plochy, tím se zvýší rychlost rozkladu, ale ne vždy výtěžek bioplynu. Pokud je potřeba zajistit čerpatelnost substrátu, provádí se jeho ředění většinou v přípravné nádrži. Ředí se buď kejdou podle dostupnosti nebo procesní kapalinou, což je zfermentovaná tekutá složka kejdy a ve výjimečných případech vodou [8]. Dále mohou být úpravou zahušťovány příliš řídké substráty [18].

3.6.2 Doprava a dávkování substrátů

Doprava substrátu a jejich následné plnění do fermentorů je rozdělena podle čerpatelnosti substrátů na substráty čerpatelné a hrudkovité. Celková přeprava substrátu uvnitř bioplynové stanice bývá zajišťována pouze jedním, maximálně dvěma čerpadly. Čerpadla pro celkový transport substrátu v bioplynových stanicích jsou hydrostatická, a to konkrétně excentrická vřetenová čerpadla, která jsou vhodná pro čerpání hustých substrátů. Pro čerpání čerpatelných substrátů z jímek (kejda nebo procesní voda) do fermentoru se nejčastěji používají čerpadla radiální odstředivá, někdy vybavená řezacím ustrojem k rozmělnění vstupního substrátu, pokud v bioplynové stanici probíhá míšení sypkých substrátů s tekutými v předjímce. K plnění sypkých substrátů do fermentoru (kukuřičná siláž) je využito přímého plnění do fermentoru z důvodu lepšího řízení procesu. Sypký substrát je před vstupem do fermentoru nadrcen, aby se stal čerpatelným, což vede ke zvýšení produkce bioplynu. Celý systém je propojen potrubím a armaturami, které jsou nadimenzované dle provozních požadavků bioplynové stanice, aby byl zaručen správný chod bioplynové stanice [8].

3.6.3 Fermentor a jeho vybavení

Fermentor je místo, kde dochází k řízené anaerobní fermentaci a následnému tvoření bioplynu v bioplynové stanici. Existuje mnoho typů fermentorů, které jsou specificky navrženy v závislostech na substrátu a zvoleném fermentačním postupu. Fermentory musí splňovat různé bezpečnostní požadavky, hlavně musí být plynotěsné [8]. Řízená anaerobní fermentace znamená, že je fermentor vybaven míchacím, dávkovacím a homogenizačním systémem, a také je v něm zajištěn ohřev. Nejčastěji jsou fermentory válcové buď z železobetonu nebo z ocelové konstrukce. Podle osy jsou rozděleny na horizontální a vertikální [18]. Fermentory mohou být usazeny buď do země nebo nad zem. Do země jsou vbudovány pouze v případě, že v místě výstavby není podzemní voda anebo je požadavek na úpravu krajiny, popřípadě záleží na dalších okolnostech [25]. Fermentor je vybaven plynojemem, který zajišťuje akumulaci

vyrobeného plynu, a také vyrovnává spotřebu a produkci bioplynu [26]. Podle uspořádání fermentoru a plynojemu dělíme systém na fermentory s integrovaným a s volně stojícím plynojemem [25]. Míchání ve fermentorech bývá provedeno buď mechanicky (míchadly), pneumaticky (bioplyn se nechá procházet skrz fermentor, tzv. probubláváním) nebo hydraulicky (ostřikem). Míchání zajišťuje promísení nového substrátu s již vyhnílym, teplotní homogenitu a zabraňuje vzniku pěny a usazenin [12]. Ohřev fermentorů je zajištěn pomocí kogenerační jednotky, která dodává teplo do fermentoru [8]. Probíhá buď přímo (ohřívá voda pomocí spalín z kogenerační jednotky jde přímo do výměníku ve fermentoru) nebo externě (kdy obsah fermentoru je ohříván ve výměníku mimo fermentor). Výměníky jsou nejčastěji trubka v trubce, deskové anebo spirálové [18]. Způsoby vytápění jsou podlahové topení, topení ve stěně, volně ležící nebo topení umístěné v míchadlech [8]. V neposlední řadě pro zajištění hladkého průběhu fermentace je ve fermentoru umístěno několik kontrolních, měřicích a ovládacích zařízení. Mezi měřené hodnoty patří množství substrátu za den, obsah sušiny, teplota ve fermentoru a otopném systému, množství plynu a jeho složení, spotřeba elektrické energie na provoz a výroba elektrické energie. Ovládací zařízení automatizuje procesy jako je plnění fermentorů z přípravných nádrží, regulaci teploty a zapínání a vypínání míchadel [12]. Každá bioplynová stanice je vybavena bezpečnostními prvky, aby byl zajištěn bezpečný provoz. Jeden z hlavních bezpečnostních prvků je havarijní hořák neboli flára, kdy při poruše kogenerační jednotky nebo jejím odstavení dojde k spalování bioplynu na fláře [8]. V praxi se nejčastěji setkáme s železobetonovými válcovými fermentory s vertikální osou [25].

3.6.4 Čištění a následné využití bioplynu

Ve fermentoru vzniká bioplyn, tento produkt je nutné z fermentoru odvádět a následně zpracovat. Odvod bioplynu je zajištěn odběrným potrubím, které je nainstalováno vně fermentoru, toto potrubí je opatřeno ochrannými prvky a ústí buď do plynojemu nebo do zařízení na využití bioplynu. Před využitím bioplynu v zařízení je většinou nutné jeho vyčištění [18].

Bioplyn obsahuje mechanické nečistoty a různé příměsi. Jednou z hlavních nežádoucích příměsí je vodní pára a sulfan, které je nutné odstranit, aby se předešlo korozi a následnému poškození zařízení [18]. K odstranění vody z bioplynu je nejčastěji využit způsob ochlazení vody pod její rosný bod, tento způsob probíhá již na začátku plynové trasy, která bývá při pokládání plynovodu konstruována tak, aby byl kondenzát odváděn samovolným spádem do nádrže na kondenzát, která je umístěna v nejnižším bodě plynové trasy. Sušení bioplynu neboli jeho ochlazení je řešeno u některých bioplynových stanic pomocí plynových chladičů, kde dochází ke zbavení relativní vlhkosti bioplynu a následnému ohřátí, aby nedocházelo ke kondenzaci bioplynu v další části plynové trasy [8]. Odsiřování neboli zbavování se H_2S v bioplynu je v bioplynových stanicích řešeno nejčastěji vháněním malého množství vzduchu do fermentoru pomocí kompresoru [12]. Vzduch nebo kyslík je veden buď do plynojemu nad fermentorem anebo do recyklu digestátu. Zde jsou sulfid oxidující bakterie, které rozloží H_2S na elementární síru a vodu, síra se hromadí ve formě prášku uvnitř fermentoru a je následně jednou za čas odstraněna [26]. Přívod vzduchu do fermentoru je okolo 3 až 5 % na množství generovaného plynu. Další způsoby odsiření jsou provedeny chemicky a mimo fermentor, kdy je nejčastěji bioplyn prohnán přes hydroxidy železa, které se dají následně regenerovat [8].

Bioplyn je využíván především energeticky. Nejčastějším způsobem využití bioplynu je buď jeho spalení v kogeneračních jednotkách, kde dochází k výrobě elektřiny a tepla zároveň, nebo přímým spalováním a výrobou tepla v horkovodních kotlích nebo vařicích. Bioplyn může být také využit v trigeneračních jednotkách, kde dochází navíc k výrobě chladu anebo jeho využití v palivových člancích [27]. Dále může být bioplyn čištěn (upgradován) na vyšší kvalitu. Čištění se provádí různými způsoby separace CO_2 . Obsah metanu v bioplynu roste, a tím i jeho

energetická hodnota, která se přibližně rovná zemnímu plynu, tento způsob je označován jako biometanizace (upgrading) a produkt jako biometan. Díky takto vyčištěnému bioplynu může být biometan vtláčován do plynárenské sítě nebo stlačován a následně plněn do motorových vozidel [18]. V bioplynových stanicích je nejčastěji využit bioplyn v kogeneračních jednotkách za kombinované výroby elektrické energie a tepla (KVET) [12]. Kogenerační jednotka se skládá z plynového pístového motoru, generátoru elektrické energie, výměníků tepla a olejového hospodářství. Většinou se jedná o motory fungující na principu Ottova cyklu nebo upravené Dieselové motory. Případně lze použít i spalovací turbínu, ale ta se v praxi tolik nevyužívá [8].

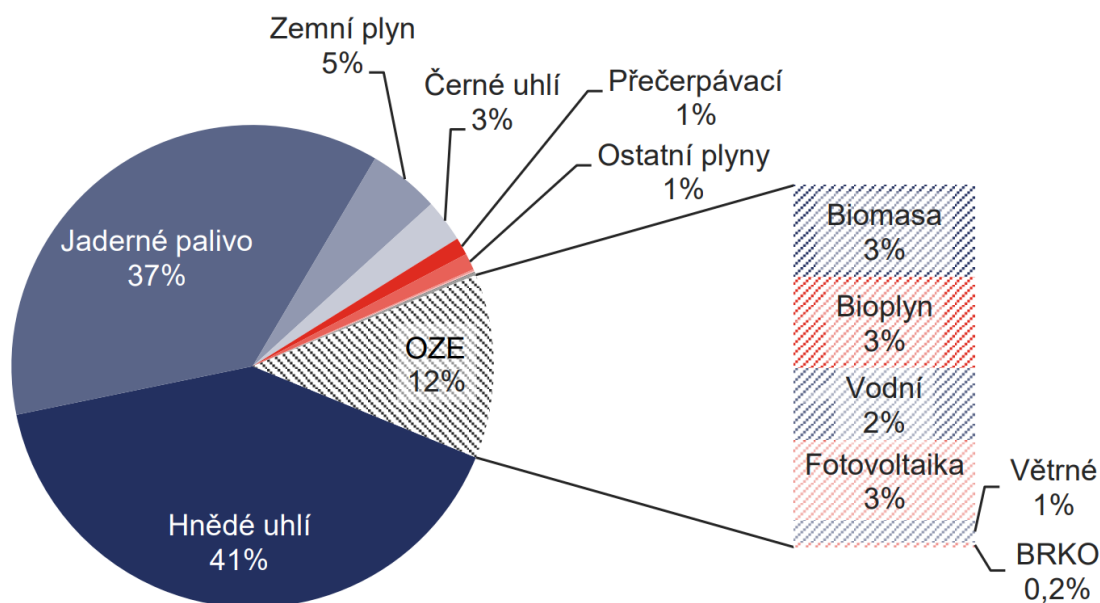
3.6.5 Koncový sklad fermentačního zbytku a jeho využití

Digestát neboli fermentační zbytek je u mokré fermentace v tekutém stavu. Sušina v něm obsažená se pohybuje okolo 6 až 10 % hmotnostních procent [28]. Podle typu fermentoru je řešen jeho odvod do skladovací nádrže [8]. U zemědělských bioplynových stanic je digestát odveden pomocí čerpadel a potrubí do koncového skladu fermentačního zbytku [18]. Velikost skladovací nádrže digestátu musí být dostatečně velká na to, aby byla schopna pojmout digestát vyprodukovaný během vegetačního období u rostlin. Jedná se o dobu 6 až 7 měsíců. Tyto skladovací nádrže u nových bioplynových stanic jsou zakryty plynotěsnou fólií, jelikož by docházelo ke ztrátám na dusíku, a také umožňují zachycovat vzniklý bioplyn [12]. Digestát může být separován na pevnou a tekutou složku, přičemž musí mít bioplynová stanice skladovací prostor pro obě frakce [25]. Separální zařízení použitá na rozdělení tuhé a tekuté složky jsou například šnekové separátory nebo centrifugy [8].

Tekutou část ze separovaného digestátu, označovanou jako procesní kapalina nebo fugát, lze využít k ředění neboli očkování vstupního substrátu do bioplynové stanice. Zde je potřeba si dát pozor na obsah amoniaku v procesní kapalině, jelikož zvýšené množství by mohlo ohrozit proces anaerobní fermentace [8]. Hlavním využitím digestátu je jeho použití jako hnojiva, kdy může být použit v neseparované formě, tak i v oddělené formě na fugát a tuhou složku. Digestát má výborné hnojivé účinky díky minerálním látkám a dusíku v něm obsaženém, také zvyšuje potenciál zadržování vody na polích. Jedním z dalších využití digestátu je jeho vysušení, napeletování a následné využití jako palivo [28].

4 Energetický mix ČR a role bioplynu

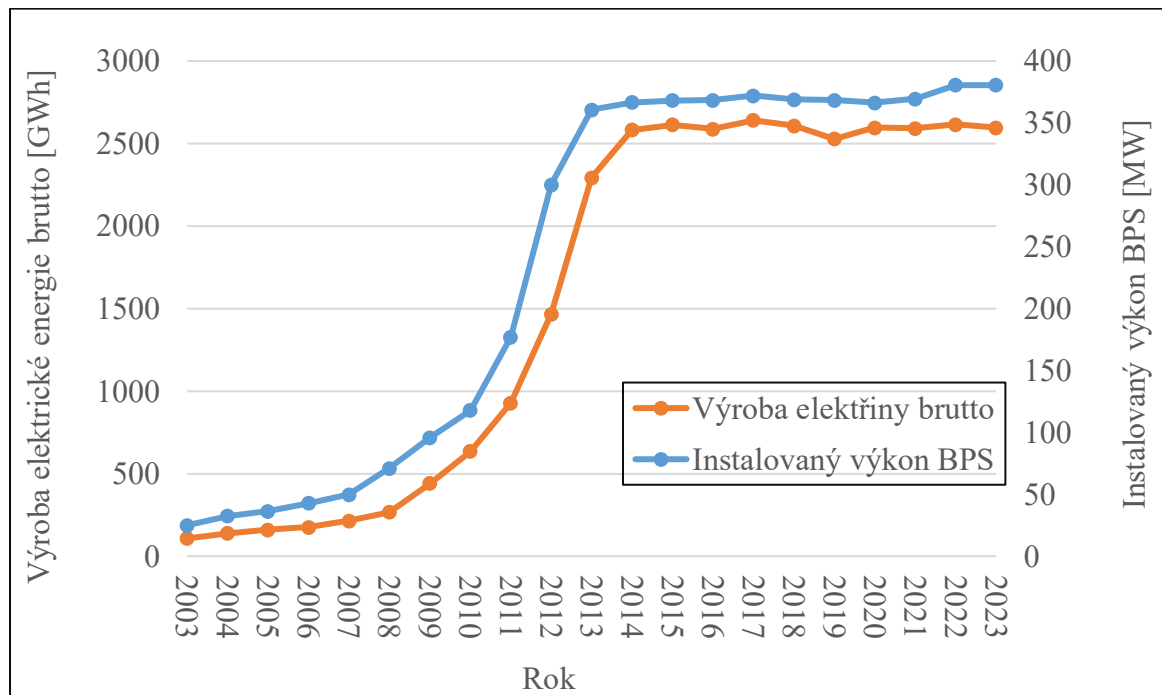
V roce 2022 činila celková výroba elektřiny brutto v České republice 84,5 TWh, z toho celková tuzemská spotřeba elektrické energie byla 70,8 TWh. Paroplynové elektrárny zaznamenaly pokles výroby elektrické energie brutto o 2,7 TWh (– 51,6 %), a také provozu využívající zemní plyn k výrobě elektrické energie brutto zaznamenaly pokles o 3 TWh (– 42,5 %) oproti roku 2021. Naopak výroba elektřiny z hnědého uhlí stoupla o 2,9 TWh (9,2 %) [29]. Tento pokles výroby elektrické energie brutto ze zemního plynu a nárůst výroby z hnědého uhlí má na svědomí energetická krize mezi Ruskou federací a Evropskou unií, jelikož došlo k navýšení ceny za zemní plyn, a to až k 350 eur za MWh v roce 2022 [30]. Na obr. 3 je možné vidět graf jednotlivého podílu paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v roce 2022. Největší podíl na výrobě elektrické energie v ČR mají stále elektrárny spalující hnědé a černé uhlí, které vyprodukovaly 36 731,5 GWh za rok 2022. Druhý nejpoužívanější zdroj k výrobě elektrické energie v ČR jsou jaderné elektrárny s celkovou výrobou 31 021,8 GWh za rok 2022. Na těchto dvou hlavních zdrojích stojí momentálně česká energetika. V neposlední řadě se nesmí opomenout výroba elektrické energie brutto z obnovitelných zdrojů energie (dále jen OZE), která činila 10 437,4 GWh za rok 2022, z toho bioplyn se podílel na celkové výrobě elektrické energie brutto z OZE s 2 615,1 GWh, což představuje zhruba 25 % [29].



Obr. 3 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v 2022 [29]

V současné době (31. 12. 2023) je v ČR v provozu 540 bioplynových stanic s celkovým instalovaným výkonem 380,5 MW. Podíl na výrobě elektrické energie brutto činil 2 596 GWh, což je oproti roku 2022 mírný pokles a na výrobě elektrické energie brutto z obnovitelných zdrojů energie (dále jen OZE) se bioplyn podílel 22,2 % [31]. V ČR převažují bioplynové stanice (dále jen BPS) zemědělské, podle dat z roku 2022 jich zde bylo 80 % ze všech druhů bioplynových stanic. BPS je možno provozovat skoro nepřetržitě po celý rok, kdy se jejich roční provozní doba pohybuje okolo 7 200 hodin [30]. Nyní většina BPS funguje v režimu kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET) a pouze pět BPS v ČR produkuje biometan (Rapotín, Litomyšl, Horní Suchá, Mladá Boleslav a ÚČOV Praha) [32]. V roce 2023 vyprodukovaly biometanové stanice 13,32 GWh [31]. V roce 2024 v březnu byla připojena nová biometanová stanice k plynárenské soustavě, a to v Rakvicích na jihu Moravy [33].

V grafu 2 je možné vidět vývoj výroby elektrické energie brutto a instalovaný výkon ze všech typů bioplynových stanic v ČR.



Graf 2 Vývoj výroby celkové elektřiny z bioplynu. Upraveno dle [29; 31; 34]

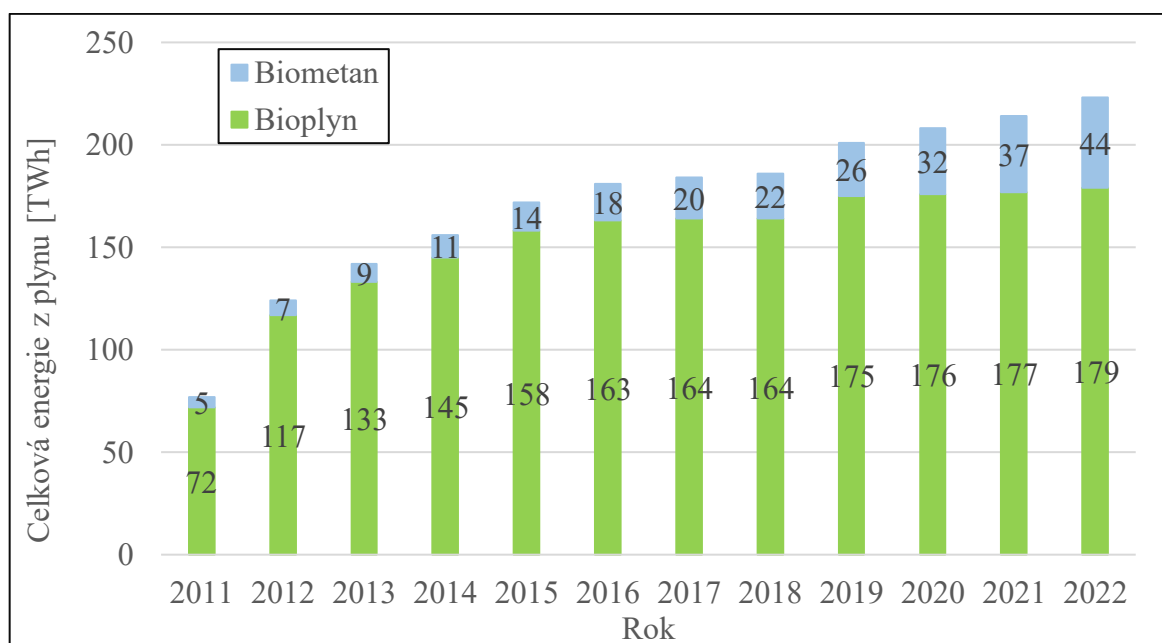
Z grafu 2 si lze povšimnout největšího růstu instalovaného výkonu BPS v období mezi lety 2008 až 2014, kdy se výroba elektrické energie brutto skoro zdesetinásobila. Bylo to díky zákonu o podpoře výroby energie z obnovitelných zdrojů (POZE), který platil mezi lety 2006 až 2013. Tyto vybudované BPS byly hlavně zemědělské, určené především ke zpracování kejdy a energeticky pěstovaných plodin (například kukuřičná siláž) [30]. Dále je z grafu 2 patrné, že od roku 2014 se produkce elektrické energie ani instalovaný výkon v BPS nijak výrazně nezměnily. Z toho vyplývá, že za posledních deset let nedošlo k výstavbě mnoho nových BPS. Podle dat z webu CZBA (Česká bioplynová asociace) byla poslední bioplynové stanici udělena licence k provozu v roce 2016 [31].

4.1 Současný stav bioplynu v EU

Jedním z hlavních cílů Evropské unie (dále jen EU) je postupné snížení emisí skleníkových plynů k dosažení klimatické neutrality. Tento cíl je založen na několika dohodách. Výchozí dohodou je Pařížská dohoda, kterou ratifikovaly všechny členské státy EU. Aby byly závazky Pařížské dohody splněny, EU v roce 2019 vydala Zelenou dohodu, jejíž cílem je dosáhnout do roku 2050 klimatické neutrality. Balíček Fit For 55 má za cíl převést ambice Zelené dohody do právní formy. Jeho závazkem je snížení emisí skleníkových plynů o 55 % od roku 1990 do roku 2030. K dosažení těchto cílů je nutná spolupráce všech odvětví v EU a to průmyslu, energetiky, životního prostředí, dopravy a mnoho dalších [35]. Jedno z hlavních odvětví je energetika, ve které se směřuje, aby veškerá energie byla vyráběna z OZE. Do roku 2030 je cíl vyrábět alespoň 42,5 % energie z OZE v EU. Podíl elektrické energie z OZE dosáhl v roce 2022 23 % konečné spotřeby elektřiny brutto v EU. Oproti minulému roku došlo k nárůstu o 1,1 % [36]. V roce 2022 vydala EU plán s názvem REPowerEU v návaznosti na konflikt na Ukrajině, kdy jeho cílem je snížení energetické závislosti na Rusku a diverzifikování energetických zdrojů energie.

Velkou roli v něm hraje bioplyn a jeho následný upgrading na biometan, kdy do roku 2030 by měla produkce biometanu v EU dosáhnout 35 bcm (miliard metrů kubických) [37].

V EU je současně zhruba 20 000 BPS různých velikostí a z toho jich je necelá polovina v Německu. Česká republika je ve výrobě primární energie z bioplynu mezi zeměmi EU na celkovém pátém místě [37]. V *grafu 3* je zobrazen vývoj energie získané z bioplynu a biometanu v EU. Z něho je patrné, že energie získaná z bioplynu se od roku 2019 výrazně nezměnila, oproti tomu je zde skoro dvojnásobný nárůst energie získané z biometanu od roku 2019. Evropská produkce bioplynu a biometanu dosáhla na konci roku 2022 celkové produkce 21 bcm, z toho bylo vyprodukováno 4,2 bcm biometanu. Mezi lety 2021 a 2022 došlo skoro k 20% nárůstu vyrobené energie z biometanu. Dalším pozitivem spojeným s výrobou bioplynu a biometanu je digestát, kdy v roce 2022 bylo vyprodukováno 31 miliónů tun digestátu, které by mohly pokrýt až 15 % poptávku EU po dusíkatých hnojivech, a tím ušetřit 10 megatun ekvivalentu CO₂, a také 2 bcm zemního plynu [38]. Nejvíce biometanu vyprodukovalo Dánsko, které mělo v roce 2023 37,9 % biometanu v plynovodních sítích [39].



Graf 3 Vývoj celkové produkce energie z bioplynu a biometanu v EU. Upraveno dle [40]

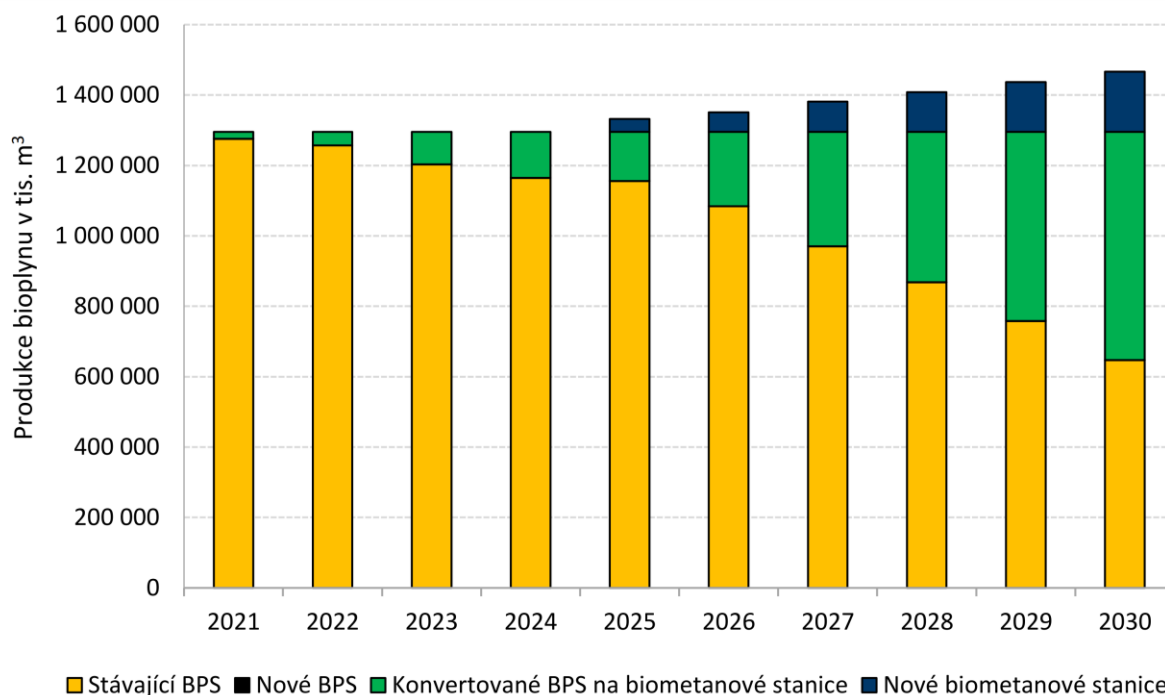
Na konci roku 2022 bylo v EU celkem 1 222 biometanizačních jednotek a na konci dubna 2023 jich bylo už o sto víc, tj. 1 322 [37]. Upgrading bioplynu na biometan je možné provést různými způsoby, nejčastějším způsobem v EU je membránová separace zastoupená 47 %. Biometan je možno využívat buď vtlačení do plynárenské sítě nebo jako palivo pro využití v dopravě. Podle databáze EBA (European Biogas Association) v roce 2021 je 58 % biometanizačních jednotek připojeno do distribuční sítě, 19 % připojeno k tranzitní soustavě, 9 % není připojeno ani k jedné soustavě a o zbylých 14 % biometanizačních jednotkách neexistují žádné informace. Biometan v dopravě se využívá buď jako BioLNG nebo BioCNG. Bylo prokázáno nedávnými studiemi, že jejich užívání v dopravě může významně přispět k dekarbonizaci dopravy. BioLNG je zkapalněný biometan a počet stanic v EU byl v roce 2022 patnáct, s tím že je očekávána výstavba 83 plnicích stanic, které mají být nainstalované do konce roku 2024. BioCNG je stlačený biometan, tento druh paliva je v EU sektoru dopravy více rozšířený, jelikož počet stanic v roce 2022 byl 133 a jejich počet se nadále zvyšuje [41]. Proto lze předpokládat, že produkce biometanu bude růst v příštích letech a produkce bioplynu na výrobu elektrické energie klesat. Dalším důvodem toho tvrzení je, že byl přijat plán

REPowerEU, kde se evropské odvětví bioplynu a biometanu zavázalo, že do roku 2030 dodá 35 bcm biometanu do plynovodní soustavy, čímž podpoří EU v dosahování cílů v oblasti klimatu i energetické bezpečnosti. Proto bude nutná modernizace stávajících zařízení a výstavba nových zařízení na výrobu bioplynu za účelem zvýšení produkce biometanu [42]. Na výrobu biometanu je podle EBA již vyčleněno 18 miliard eur a v letech 2023 až 2025 by mělo být investováno 4,1 miliardy eur, dalších 12,4 miliardy eur bude uvolněno v letech 2026 až 2030 a další miliarda eur přijde v dosud neupřesněném termínu. Podle Anderse Mathiassona předsedy EBA, je ale potřeba mnohem vyšší částky a to konkrétně 83 miliard eur k splnění cíle 35 bcm. Podle dostupné studie EBA by mohlo být k dispozici 41 bcm biometanu v roce 2023 a v roce 2050 151 bcm biometanu. Konkrétně by bylo možné získat 38 bcm v roce 2030 (91 bcm v roce 2050) anaerobní digescí a 3 bcm termickým zplyňováním (nárůst na 60 bcm v roce 2050). Tato čísla je nutno porovnat s celkovou spotřebou zemního plynu v EU, která byla v roce 2020 400 bcm. Biometan vyrobený metanizací, doplněný o další odvětví výroby plynu z OZE, má potenciál zbavit EU závislosti na fosilním plynu a umožnit splnění cílů nové přepracované směrnice o obnovitelných zdrojích energie (RED 3) [37]. Na druhou stranu existují i názory, že dosažení cíle 35 bcm je nereálné, jako důvod uvádějí, že by došlo k nárůstu záměrně pěstovaných surovin, což by způsobilo konkurenci mezi potravinami, krmivy a palivy. Dalším zmíněným důvodem jsou vyšší úniky bioplynu/biometanu, což by způsobilo vyšší emise biometanu na jednotku plynu, než je tomu v případě fosilního plynu [43]. Jelikož ale byly již schválené a vyhrazené finance na tento cíl, tak zde není důvod, proč by se nakonec nezrealizoval. Jedinou otázkou zůstává, zda se ho povede splnit do roku 2030, to ukáže ale až čas. Pokud se vyvine všechno úsilí, usnadní se legislativa, povolování, plus ekonomická stránka bude nakloněná tomuto odvětví tak by se cíl 35 bcm měl povést splnit do roku 2030.

4.2 Předpokládaný potenciál rozvoje bioplynu v ČR

Role bioplynu a biometanu v ČR je zásadní, jelikož by mohla pomoci dekarbonizovat českou energetiku, čímž by došlo k naplnění evropských dekarbonizačních cílů. Úpravou bioplynu na biometan získáme energeticky hodnotnější palivo, než kdybychom bioplyn využili na spalení na kogenerační jednotce. Biometan je momentálně považován za jedno z nejvíce neutrálních paliv vzhledem k emisím CO₂, které by měl do budoucna nahradit zemní plyn a pomohl by snížit emise v různých odvětvích, kam nízkouhlíková elektřina nedosáhne. V ČR by měl mít biometan potenciál substituovat celkově až pětinu dováženého zemního plynu do roku 2030 [44].

Z následujícího *obr. 4* je patrné, že produkce bioplynu ke kombinované výrobě tepla a elektřiny bude klesat a zvyšovat se budou BPS, které bioplyn budou upravovat na biometan. Očekává se, že budou vystavěny i nové BPS, bohužel jejich produkce bioplynu oproti stávajícím BPS bude velmi nízká [32]. Jedním z faktorů, proč se předpokládá pokles produkce bioplynu pro KVET je, že se v plánu REPowerEU ČR zavázala k produkci 700 miliónů m³ biometanu do konce roku 2030. Tento krok bude vyžadovat předělání a modernizaci stávajících BPS na výrobu biometanu, a také finanční podporu. Ta byla 31.10.2023 schválena Evropskou komisí ve výši 2,4 miliardy eur k podpoře výstavby nových nebo konvertovaných zařízení k výrobě udržitelného biometanu [45]. V současné době je v ČR připojených šest biometanových stanic, které buď vtlačují biometan do plynárenské sítě anebo ho skladují a stlačují do aut. V letošním roce, tj. 2024 je naplánováno připojování dalších biometanových jednotek, kdy aktuálně je podepsaných 14 smluv o připojení biometanových jednotek a eviduje se další 40 zájemců o realizaci projektu a připojení do plynárenské sítě, uvedl tiskový mluvčí společnosti GasNet Aleš Gregorovič [33].



Obr. 4 Očekávaná produkce bioplynu v následujících letech [32]

Tato státní podpora v rámci programu dále obsahuje zelený bonus po dobu 20 let, kdy za každou vyrobenou MWh biometanu bude výrobce odměněn ve výši, kterou stanoví Energetický regulační úřad [45]. Tato dotace i zelený bonus by mohly vést právě k přeměňování bioplynových stanic na biometanové. Navíc většina BPS v ČR vznikla do konce roku 2013, a těží tak ze zelených bonusů výrobou KVET, které jsou pouze platné po dobu 20 let od začátku provozu BPS. Po vypršení tohoto zeleného bonusu by pro ně mohla být náhrada transformace na biometanovou stanici [44]. Tato přestavba stávajících BPS by se měla uskutečnit u BPS, kde není využito užitečné teplo, poté u BPS, které jsou nedaleko vysokotlakých plynovodů. Je úsilí, aby byl plyn vtlačěn i do nízkotlaké plynovodní sítě, čímž by došlo ke snížení nákladů a energií spojených s kompresí. Musela by být, ale upravena legislativa, aby to bylo realizovatelné [32]. Kromě vtlačení biometanu do plynárenské sítě je zde využití v dopravě, a to buď jako BioCNG nebo BioLNG. Momentálně ČR disponuje 171 plnicími stanicemi na CNG [46].

Biometan je možné rozlišovat podle vstupní suroviny pro anaerobní fermentaci na pokročilý a nepokročilý. Pokročilý biometan vzniká z odpadních surovin, zatímco nepokročilý z cíleně pěstovaných energetických plodin. Plán ČR je využít pokročilý biometan v sektoru dopravy a nepokročilý biometan vtlačet do plynárenské sítě, aby byl následně použit k výrobě tepla a chladu [32]. Podle EFG (Energy financial group) je v ČR prostor pro výstavbu 66 BPS, které by byly schopné vyrábět pokročilý bioplyn z biologicky rozložitelných odpadů a jejich celková roční produkce by dosáhla 100 milionů m³ [40].

5 Experimentální výroba bioplynu

V této kapitole bude popsáno, jakým způsobem bylo docíleno úspěšné výroby bioplynu v laboratorním měřítku. Celkem byly provedeny čtyři pokusy, než se docílilo úspěšné výroby bioplynu. Postup byl v průběhu pokusů o výrobu bioplynu upravován dle poznatků nabytých z předešlých pokusů.

5.1 Příprava před provedením pokusů

Před začátkem pokusů byla nutná příprava pro jejich provedení. Proto bylo sestaveno jímací zařízení na vzniklý bioplyn, které je tvořeno válci přidělanými na stojanech. Válce byly zaplněny vodou a ponořeny v nádobě, která byla také zaplněna vodou. Na válcích bylo vytvořeno měřítko odvážením po 20 ml vody na váze. Celkový měřitelný objem byl 330 ml. Do válců ústily hadičky, které byly uchyceny ve válcích a následně připevněny na fermentor. Při výrobě bioplynu voda z měřících válců vytékala do nádoby a dle měřítka byla odečtena produkce bioplynu. Odběry byly prováděny tak, že se hadička odpojila od fermentoru, poté byla napojena na odběrný válec plný vody, ze kterého vytékala voda, jež vytvořila podtlak a plyn z plynojemu byl nasáván. K výrobě bioplynu byly použity různé vstupní substráty a jako očkovací kal (někdy označován jako inokulum) byl použit obsah fermentoru ze zemědělské BPS Nížkovice, jejímž provozovatelem je společnost Roštěnice a. s.. Substráty byly před každým plněním do fermentoru rozmlety pomocí analytického mlýnku IKA A 11 basic, aby docházelo k lepšímu rozkladu, jak je zmíněno v kapitole 2.2.5. Dále u každého substrátu byla pomocí halogenových vah určena sušina potřebná k výpočtu vstupního množství substrátu. Pojmenování fermentorů je dle druhu vstupního substrátu a v závorce je uveden typ ředící kapaliny. Fermentory byly v průběhu pokusů upravovány i s jejich vstupními substráty, proto budou podrobněji rozvedeny u jednotlivých pokusů. Následné pokusy a jejich postupy přípravy budou shrnuty v následující části.

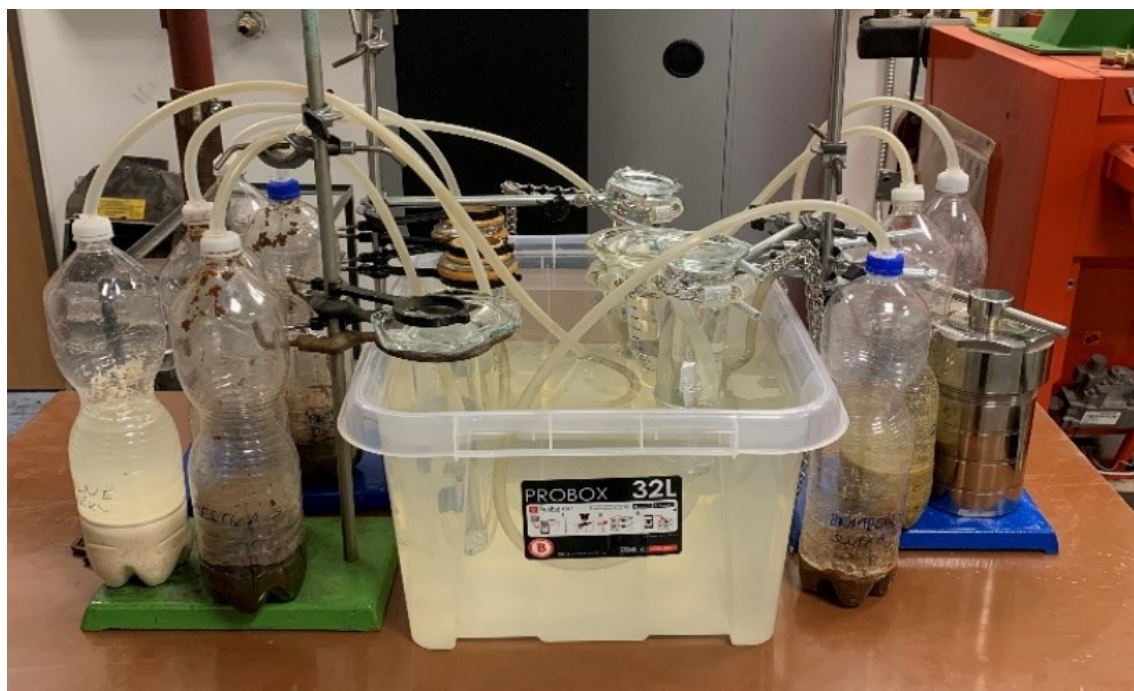
5.2 Pokus č. 1 – PET láhve

U prvního pokusu byla zvolena mokrá fermentace s celkovým hmotnostním obsahem sušiny 10 % při okolní teplotě okolo 20 °C. Celkem bylo použito 8 fermentorů, které byly tvořeny z PET láhve o objemu 1,5 litru. Do fermentorů skrz jejich odšroubovatelná víčka byly zavedeny silikonové hadičky. Hadičky byly k víčku přilepeny silikonem a sloužily k propojení mezi fermentorem a plynojemem. Čtyři fermentory byly plněny pouze vstupním substrátem a vodou. Zbýlé čtyři fermentory byly naplněny vstupním substrátem, vodou a očkovacím kalem. Jako vstupní substrát zde byla použita kukuřičná siláž (dále jen siláž), švestky, bramborové slupky (dále jen slupky) a ovesné vločky (dále jen vločky).

Postup přípravy obsahu do fermentoru byl následný. Na halogenových sušicích váhách KERN MLS byla změřena sušina vstupního substrátu a z ní vypočítáno potřebné množství vody, které přidáním k vstupnímu substrátu a jeho naředěním splnilo podmínku mokré fermentace o celkovém hmotnostním obsahu sušiny 10. Bylo zde uvažováno, že sušina očkovacího kalu je stejná jako sušina vody, tj. 0 %. Fermentory se plnily 100 g vstupního substrátu, kromě švestek, kterých se použilo na plnění 65 g, jelikož jich nebylo dostatečné množství. Poté byly jednotlivé fermentory dány na váhu, aby bylo dosaženo přesného celkového množství a dle hodnot z *tab. 6* naplněny. Čtyři fermentory byly plněny určitým množstvím ředící vody a zbylé 4 fermentory byly naplněny ředící kapalinou o složení voda plus 50 g očkovacího kalu. Následně se fermentory připojily pomocí víčka k silikonové hadičce, která vedla do plynojemu. Aparaturu použitou k výrobě bioplynu během pokusu č. 1 je možné vidět na *obr. 5*.

Tab. 6 Hodnoty vstupního substrátu u pokusu č. 1

Vstupní substrát	Množství (g)	Sušina substrátu (hm. %)	Obsah vody v substrátu (hm. %)	Voda + kal (g)	Ředící kapalina (ml)	Celkové množství (g)
Siláž	100	37,2	62,8	222 + 50	272	372
Švestky	65	24,7	40,3	132 + 50	182	247
Slupky	100	19,0	81,0	40 + 50	90	190
Vločky	100	88,0	11,9	730 + 50	780	880

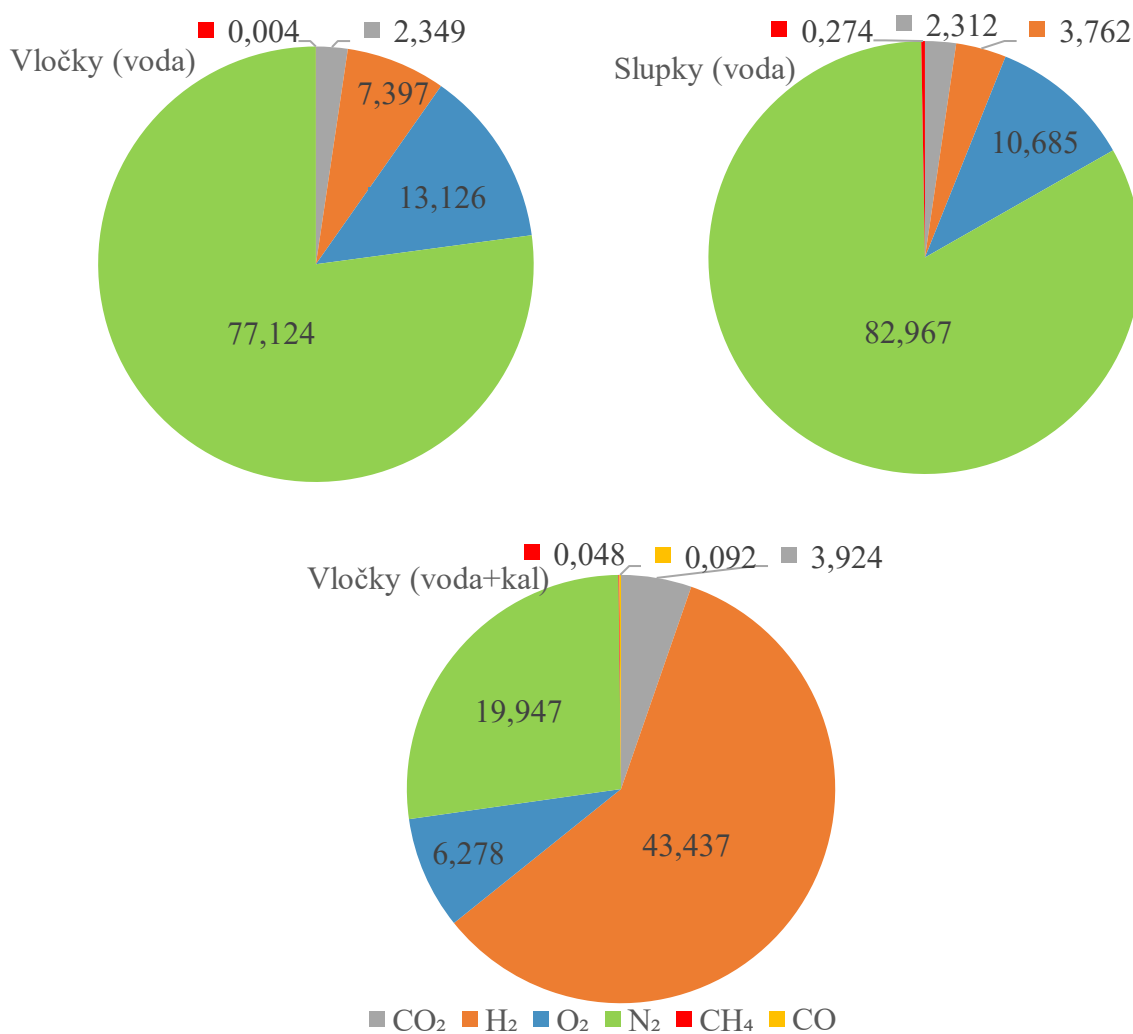


Obr. 5 Aparatura na výrobu a jímání bioplynu

V průběhu pokusu č. 1 byla sledována produkce bioplynu a kvalita. Druhý den od začátku pokusu byl proveden první odběr vyprodukovaného plynu, který proběhl u fermentorů, jež doposud vyprodukovaly nejvíce plynu. Konkrétně to byly plyny se substrátem vločky (voda), vločky (voda+kal), a potom slupky (voda). Odběr probíhal tak, že víčko fermentoru bylo odšroubováno, hadička zalomena, aby nedošlo k úniku plynu, a na ni byl napojen odběrný válec. Odběrné válce s plynem byly poté poslány na analýzu na plynový chromatograf Agilent 8860. Jejich výsledky je možné vidět v *grafu 4*. Odběr vyprodukovaného plynu a otevření fermentorů narušil anaerobní atmosféru, kdy po tomto odběru a otevření došlo v následujících dnech u všech fermentorů k smršťování láhví, jenž je zobrazeno na *obr. 6*.

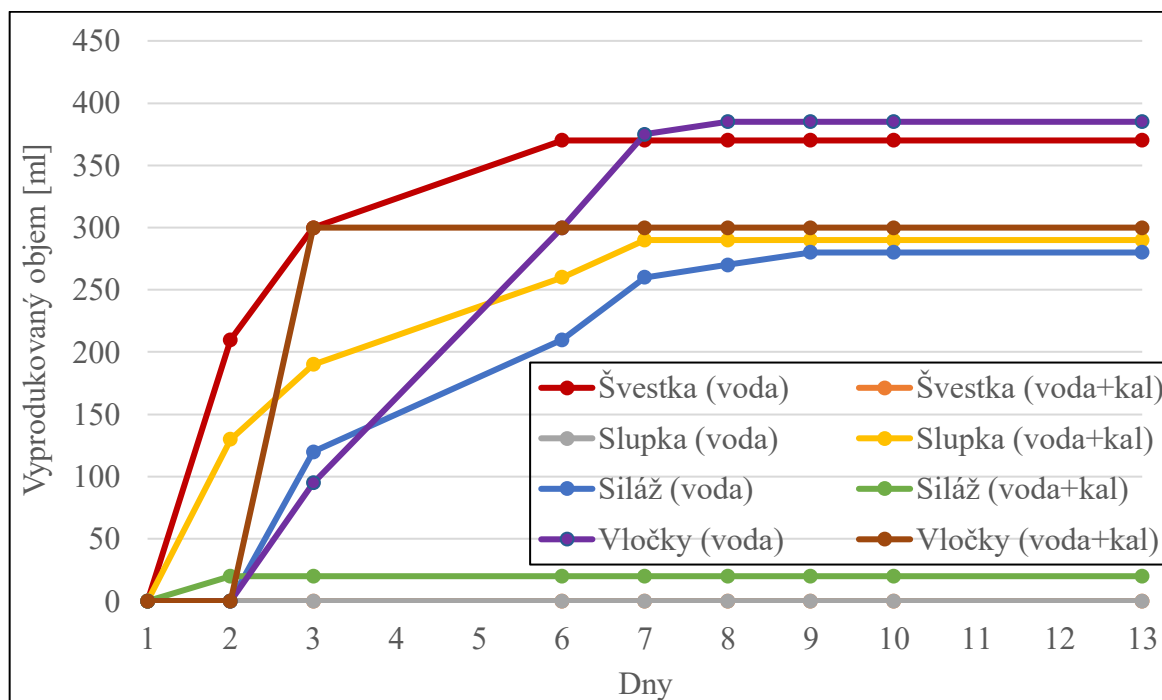


Obr. 6 Smrštěné a zevnitř plesnivé fermentory

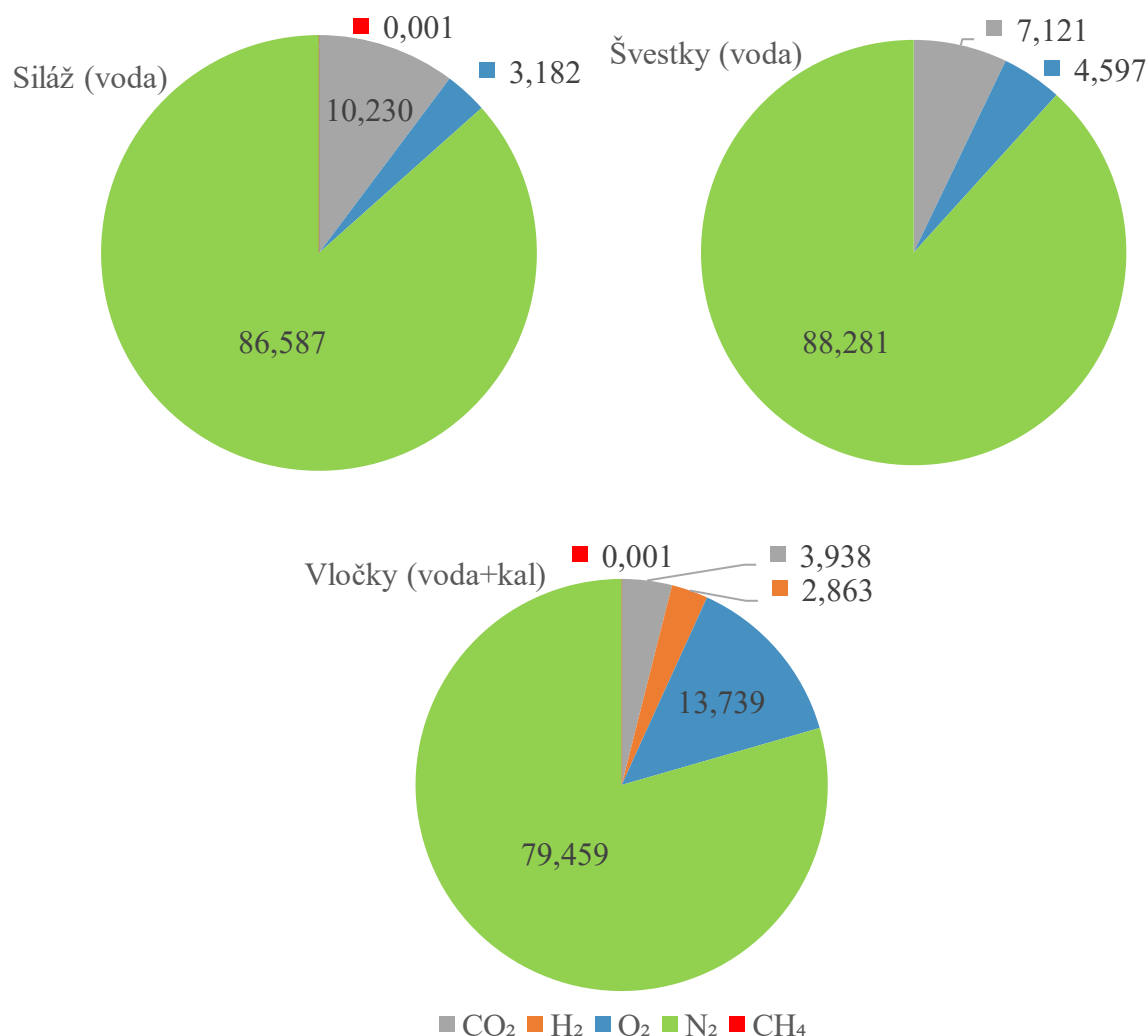


Graf 4 Jednotlivé složení plynů v objm. % z prvního odběru

Jelikož se od 8. dne neměnila produkce, byl pokus ukončen 12. den od jeho začátku. Produkce je zobrazena na *grafu 5*, kde je patrné, že substrát slupky (voda) dosáhl nulové produkce plynu, stejně jako švestka (voda+kal). Do produkce nebyly započítány objemy hadiček, a zbylé objemy PET láhví, jelikož se produkce měřila pouze odečítáním z plynojemu. Maximální objem plynojemu 330 ml je v grafu překročen, jelikož byl vznikající plyn v průběhu odebírán. Na konci pokusu byl odebrán plyn u švestky (voda), siláž (voda) a vločky (voda+kal). Odběr zde byl realizován zmáčknutím PET lahve, jelikož nebylo vyprodukováno dost plynu do plynojemu. Následně byl poslán na analýzu plynu na plynový chromatograf Agilent 8860, výsledek je zobrazen v *grafu 6*.



Graf 5 Produkce plynu z různých vstupních substrátů



Graf 6 Jednotlivé složení plynů v objm. % z druhého odběru

Závěrem tohoto pokusu bylo zjištěno, že nedošlo k žádné výrobě bioplynu, jelikož složení neodpovídá složení bioplynu podle kapitoly 1.1. Složení vzniklého plynu je zobrazeno v grafu 4 a grafu 6. V grafu 4 lze vidět, že u plynu vločky (voda+kal), je velké množství vodíku, které se tvoří ve fázi acidogeneze, jak je zmíněno v kapitole 2.1. Bohužel, odběrem došlo k narušení anaerobního prostředí i když malé množství plynu bylo poté ještě produkováno. Z výsledků druhého měření složení vzniklého plynu na plynovém chromatografu na konci pokusu, který je zobrazen na grafu 6 je patrné, že skoro žádný metan nebyl vytvořen. Po prvním odběru se fermentory začaly smršťovat, jak je ukázáno na obr. 6, a dokonce lze spatřit i vytvoření plísňe, která inhibuje celý proces. PET láhve okolo víčka nebyly nijak utěsněny a vzduch mohl proudit i tudy, což poté nesplňuje podmínky anaerobní fermentace. Nejspíše došlo ke kvašení a plesnivění, které spotřebovávají kyslík, což zapříčinilo vytvoření podtlaku, jenž vedl k smrštění fermentorů.

5.3 Pokus č. 2 – Vzorkovnice

Díky nabytým poznatkům z minulého pokusu a znalosti fermentační normy VDI 4630 [47], byl upraven vstupní substrát, tak i typ fermentoru. Fermentor se změnil z PET lahvi na malé uzavíratelné kelímky (vzorkovnice) o objemu 130 ml. Systém propojení fermentoru a plynoměru byl vyřešen tak, že do víčka byla udělána dírká pomocí důlčíku a na 3D tisku byl vytisknut náustek na připojení hadičky, který se po zbroušení povrchu víčka nalepil vteřinovým lepidlem. Těsnost zde byla řešena tak, že se kolem hrdla kelímku nalepila tenká vrstva elektrikařské (izolační) pásky, víčko přes ni bylo dotáhnuto, kolem víčka byl nanesen silikon, a ještě poté jedna vrstva izolepy. Tento kelímek byl natlakován a ponořen do vody, aby bylo vidět, zda neuniká vzduch. Poté byla těsnost ještě ověřena i na kapalinovém manometru. Při měření produkce plynu byl zanedbán objem hadičky a zbytkový objem fermentoru, jelikož fermentory byly naplněny až skoro po svůj okraj a objem hadičky byl velmi malý.

Jako vstupní substráty byly použity ovesné vločky, kukuřičná siláž, hroznové víno (dále jen hrozno) a bramborové slupky. Na halogenových sušicích váhách KERN MLS byla určena sušina substrátů a očkovacího kalu. Zde již nedošlo k zanedbání sušiny očkovacího kalu, protože bychom se dopustili chyby. Podle normy VDI 4630 [47], byla použita rovnice (2), aby bylo určeno správné množství použitého substrátu a předešlo se inhibici celého procesu přesycením bakterií. Zkratka oTS znamená podíl organické sušiny ve vstupním substrátu. Předpoklad, který zde byl použit je, že sušina je stejná jako organická sušina. Bylo celkem použito osm fermentorů, z toho u 4 fermentorů probíhala mokrá fermentace při okolní pokojové teplotě 20 °C a další 4 byly umístěny do pece o teplotě 40 °C. Fermentory byly naplněny a promíchány podle určených a vypočtených hodnot v tab. 7. Očkovací kal nebyl fermentován samostatně, proto je v tab. 7 oddělen tlustou čarou, jelikož jeho hodnoty byly potřebné pro výpočet, proto je zde uveden. Plnění probíhalo na váze, aby bylo dosaženo přesného množství. Všechny substráty byly smíchány s očkovacím kalem podle poměru v rovnici (2).

$$\frac{oTS_{\text{substrát}}}{oTS_{\text{očkovací kal}}} \leq 0,5 \quad (2)$$

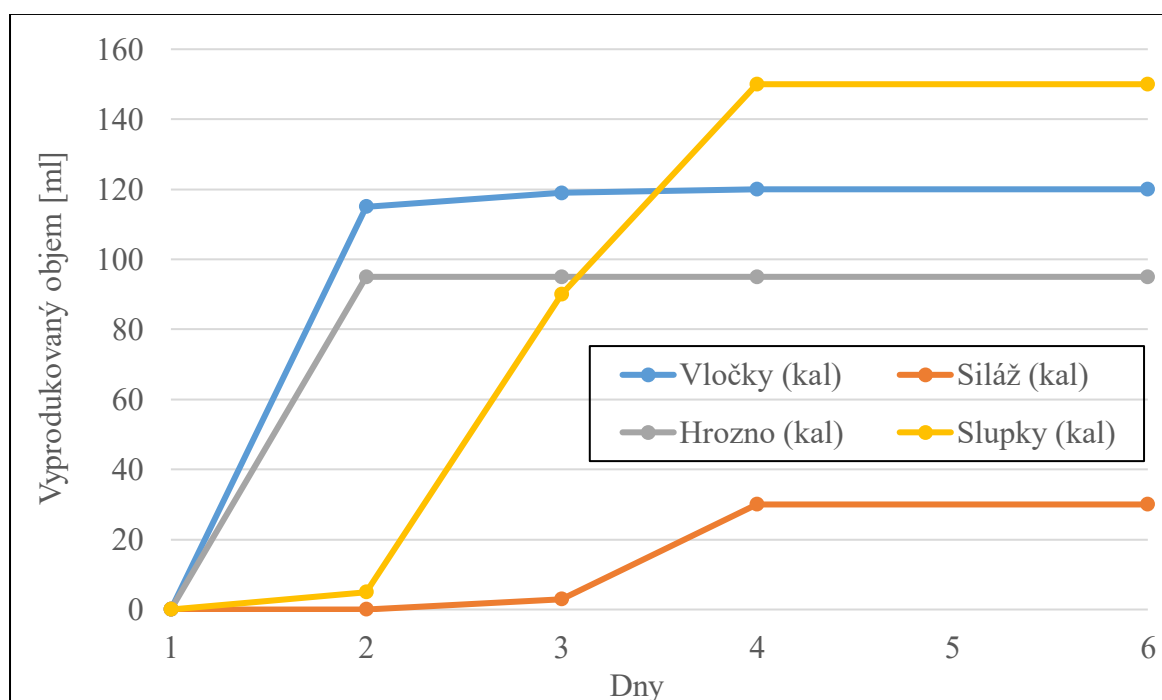
Tab. 7 Hodnoty vstupního substrátu u pokusu č. 2

Vstupní substrát	Sušina substrátu (hm. %)	Množství substrátu (g)	oTS (g) na množství	Podmínka rovnice (2)	Celkové množství (g)
Siláž	37,4	10	3,7	0,44	110
Slupky	19,6	10	2,0	0,23	110
Vločky	85,4	5	4,3	0,50	105
Hrozno	18,1	10	1,8	0,21	110
Očkovací kal	8,5	100	8,5	-	-

Během pokusu byla sledována produkce a kvalita bioplynu. Bohužel, hned druhý den došlo k prasknutí fermentorů při venkovní teplotě zespodu, a proto nebylo možné sledovat ani jeden z faktorů. Na obr. 7 je možné vidět celou venkovní aparaturu, kde před prasknutím došlo k vytlačení části obsahu fermentoru do hadičky, a poté k následnému prasknutí zespodu fermentoru. V peci byl druhý den prasklý pouze jeden fermentor, a to bramborové slupky, které se vyměnily, a produkce pokračovala dále. Bohužel, po 6 dnech došlo k prasknutí fermentorů v peci, čímž byla narušena anaerobní atmosféra a pokus byl ukončen. Produkci fermentorů v peci je možné vidět v grafu 7. Vyprodukované množství bylo malé pro analýzu na plynovém chromatografu.



Obr. 7 Aparatura na výrobu bioplynu při pokojové teplotě



Graf 7 Produkce plynu z různých substrátů při teplotě 40 °C

Pokus číslo 2 nedopadl úspěšně, jelikož hned druhý den došlo k prasknutí fermentorů při pokojové teplotě. Po necelém týdnu došlo k prasknutí fermentorů i v peci, proto byl pokus ukončen a vyhodnocen jako neúspěšný. K prasknutí došlo z důvodu plnění fermentorů až po okraj, jelikož zde nebyl prostor pro vznik pěny. S faktorem pěny nebylo počítáno, protože u prvního pokusu k jejímu vytvoření nedošlo. Pěnění vzniklo díky aktivnímu kalu, a jelikož se fermentory nepromíchávaly mechanicky, tak tomuto efektu nemohlo být nijak zabráněno. Proto došlo k vytlačení do hadičky a následně ucpání otvoru pro produkovaný plyn, což vyústilo v prasknutí fermentoru zespodu.

5.4 Pokus č. 3 – Snížení množství vstupního substrátu

U pokusu č. 3 byl ponechán typ fermentoru a jeho těsnění z pokusu č. 2, jelikož se ověřilo jako dobré. Změnu tvořilo především množství substrátu, které bylo sníženo na celkové množství 70 g z důvodů tvoření pěny. Pokud by se pěna vytvořila, aby měla dostatek prostoru, a nedošlo k porušení fermentoru. Jedním z dalších kroků, jak předejít vzniku pěny bylo, že fermentor bude jednou denně protřepán, čímž se nahradí funkce mechanického míchání. Byl zvětšen otvor na odvod plynu, a tím i nástavec na hadičky s větším vnitřním průměrem. Technika lepení nástavce na hadičku byla provedena zbroušením povrchu a následným lepením tavnou pistolí. Vstupní substrát tvořila v tomto pokusu pouze siláž, jelikož bylo potřeba dosáhnout nějaké produkce bioplynu a ověření postupu. Do čtyř fermentorů byl foukán dusík, aby došlo k vytlačení kyslíku a vytvoření bezkyslíkaté atmosféry. Při měření produkce plynu byl zanedbán objem hadičky a zbytkový objem fermentoru, jelikož produkce byla odčítána z válců ponořených ve vodě.

Vstupní substrát prošel stejnou úpravou jako u předchozího pokusu č. 2, a jeho množství bylo vypočítáno podle rovnice (2). Vypočtené hodnoty vstupní kukuřičné siláže jsou uvedeny v *tab. 8*. Zkratka oTS znamená podíl organické sušiny ve vstupním substrátu, bereme tady předpoklad, že sušina je velmi podobná organické sušině. V *tab. 8* je siláž oddělena tlustou čarou od ředících kapalin, jelikož docházelo pouze k fermentaci siláže s ředící kapalinou, a ne fermentování samostatných ředících kapalin. Podmínka rovnice (2) nelze splnit pro vodu, jelikož neobsahuje žádnou sušinu a sloužila pouze k ředění. Celkem bylo 8 fermentorů. Skupina čtyř byla v peci při teplotě 50 °C, jelikož tato teplota je používána v BPS Nížkovice. Ostatní čtyři fermentory zůstaly při pokojové teplotě 20 °C. Systém na výrobu a jímání bioplynu v peci je ukázán na *obr. 8*, kde na pravé straně je možné vidět vyvedení hadiček z pece do plynojemů umístěných pod pecí. Aparatura při pokojové teplotě je vizuálně stejná jako u pokusu č. 2, proto je zobrazena na *obr. 7*. Fermentory byly rozděleny na dvě skupiny po čtyřech fermentorech. První skupina byla tvořena dvěma fermentory se substrátem a očkovacím kalem, a dalšími dvěma se substrátem a vodou. Z toho v této skupině byly vždy dva fermentory s odlišným složením obsahu fermentoru naplněny dusíkem, aby došlo k vytvoření anaerobního prostředí rychleji. Dusík byl foukán z tlakové dusíkové lahve přes vstupní hadičku.

Tab. 8 Hodnoty vstupního substrátu a ředících kapalin u pokusu č. 3

Vstupní substrát	Sušina substrátu (hm. %)	Množství substrátu (g)	oTS (g) na množství	Podmínka rovnice (2) siláž/kal
Siláž	37,2	5	1,9	0,3
Očkovací kal	8,5	65	5,5	-
Voda	0	65	-	-



Obr. 8 Fermentory v peci (vlevo) s jímacím systémem (vpravo) při teplotě 50 °C

V průběhu pokusu došlo druhý den k odlepení tří nástavců na hadičky u fermentorů v peci, což narušilo anaerobní atmosféru. Odlepení bylo pravděpodobně způsobeno tím, že lepidlo z tavící pistole mohlo povolít v peci při 50 °C. Další příčinou mohla být manipulace s fermentory (protřepávání, aby nedošlo ke vzniku pěny). A také plyn, produkováný bakteriemi, mohl napomoci odlepení. Nástavce byly znovu nalepeny. V peci vyprodukoval plyn pouze fermentor s očkovacím kalem a dusíkem o objemu vyprodukovaného plynu 140 ml. Venku při pokojové teplotě byla produkce plynu po dvou dnech od startu pokusu 20 ml, a to shodně u všech fermentorů. Po pěti dnech se produkce plynu nezměnila a proces byl ukončen. Bohužel nebylo provedeno žádné měření plynu na plynovém chromatografu, a ani produkce nebyla zaznamenána, a to z důvodu, že nebyla téměř žádná. Pokus byl vyhodnocen jako neúspěšný, jelikož nebylo dosaženo žádného z cílů.

5.5 Pokus č. 4 – Skleněný fermentor

U pokusu č. 4 byly provedeny velké změny v typu fermentoru a hadiček. Fermentory byly nahrazeny za skleněné válce se zábrusem o objemu 170 ml, do kterých ústily dvě trubice. Jedna byla z části zaslepená silikonem. Po naplnění fermentoru dusíkem byla kompletně utěsněna špuntem. Druhá sloužila k odvodu vzniklého plynu. Nové fermentory lze vidět na *obr. 9*. Silikonové hadičky nahradily hadičky plastové, jelikož bylo zjištěno, že silikon propouští lehce kyslík, což je nežádoucí účinek. Jímání plynu zůstalo stejné. Při přípravě vstupního substrátu se postupovalo jako u předchozích pokusů, tj. podle rovnice (2). Zde již sušina nebyla uvažována jako organická sušina, ale podle normy VDI 4630 byla určena organická sušina žiháním a výpočet organické sušiny (dále jen oTS) byl proveden podle rovnice (3) převzaté z [47]. Nejdříve byl substrát zbaven vody a následně vyžihán dle normy VDI 4630, proto je v rovnici člen M_{ad} (obsah vody), který je nutno započítat. Jako substrát zde byla použita siláž, které byla smíchána neboli naředěna s očkovacím kalem nebo s vodou.



Obr. 9 Nový typ fermentorů umístěný v peci při 50 °C

Celkem bylo použito osm fermentorů. Čtyři byly ve složení siláž a očkovací kal a další čtyři ve složení siláž a voda. Obsah fermentorů byl naplněn podle hodnot z tab. 9. Fermentory nebyly zcela zaplněny, ale bylo ponecháno místo pro vznikající pěnu, díky aktivnímu kalu, čímž se mělo předejít ucpání, a poté prasknutí fermentoru. Fermentory s očkovacím kalem byly naplněny celkovým množstvím 70 g a fermentory s vodou 100 g. Poté byly rozděleny jako u pokusu č. 3 na dvě skupiny po čtyřech fermentorech. Jedna skupina byla umístěna do pece o teplotě 50 °C a druhá byla ponechána v místnosti s pokojovou teplotou 20 °C. Vždy dva fermentory z této skupiny s odlišnou ředící kapalinou byly naplněny dusíkem. Fermentory v peci můžeme vidět na obr. 9, jímací systém byl použit z předešlého pokusu č. 3, který je zobrazen na obr. 8 vpravo. Při uzavírání zábrusu fermentoru, byl zábrus namazán vazelínou (z důvodů lepších těsnících vlastností) a byl zaklapnut svorkou, aby se nerozpojil (vznikem tlaku produkovaného plynu).

$$oTS = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} (\%) \quad (3)$$

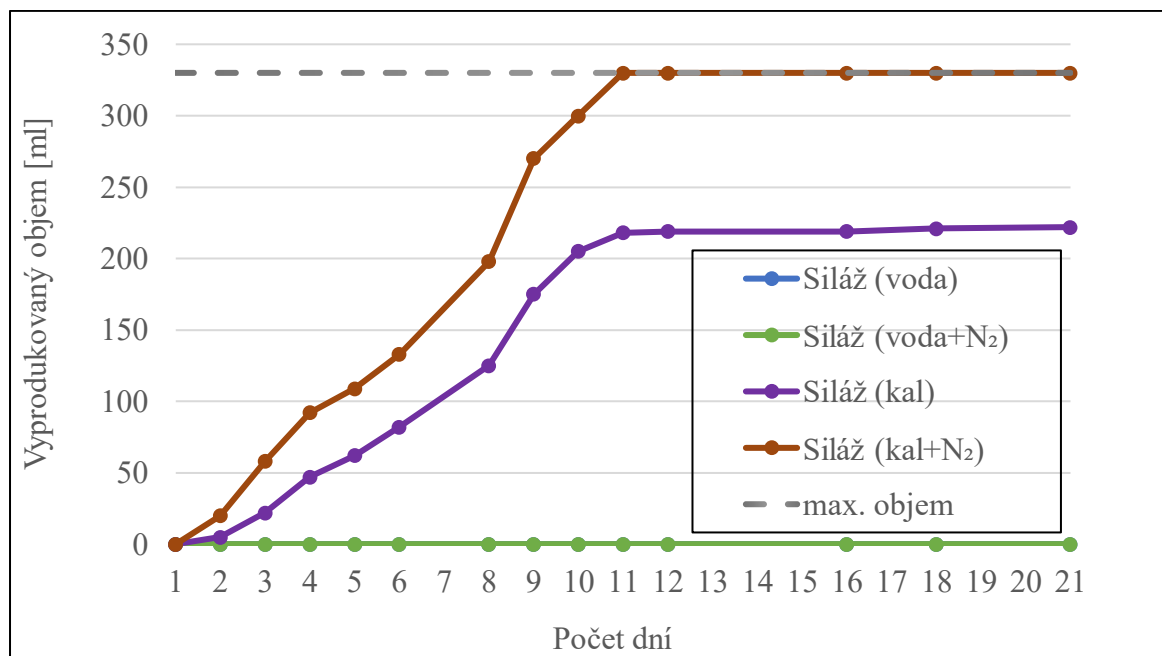
m_1 – hmotnost prázdného kelímku (g); m_2 – hmotnost kelímku se zkušebním podílem (g); m_3 – hmotnost kelímku s popelem (g); M_{ad} – obsah vody (%)

V tab. 9 je vstupní substrát siláž oddělena tlustou čarou, jelikož nedocházelo k fermentování samostatných ředících kapalin (očkovací kal a voda), podmínka rovnice (2) nemá smysl pro vodu, proto je v tabulce vynechána, jelikož neobsahuje žádnou sušinu a sloužila pouze k naředění.

Tab. 9 Hodnoty vstupního substrátu a ředících kapalin u pokusu č. 4

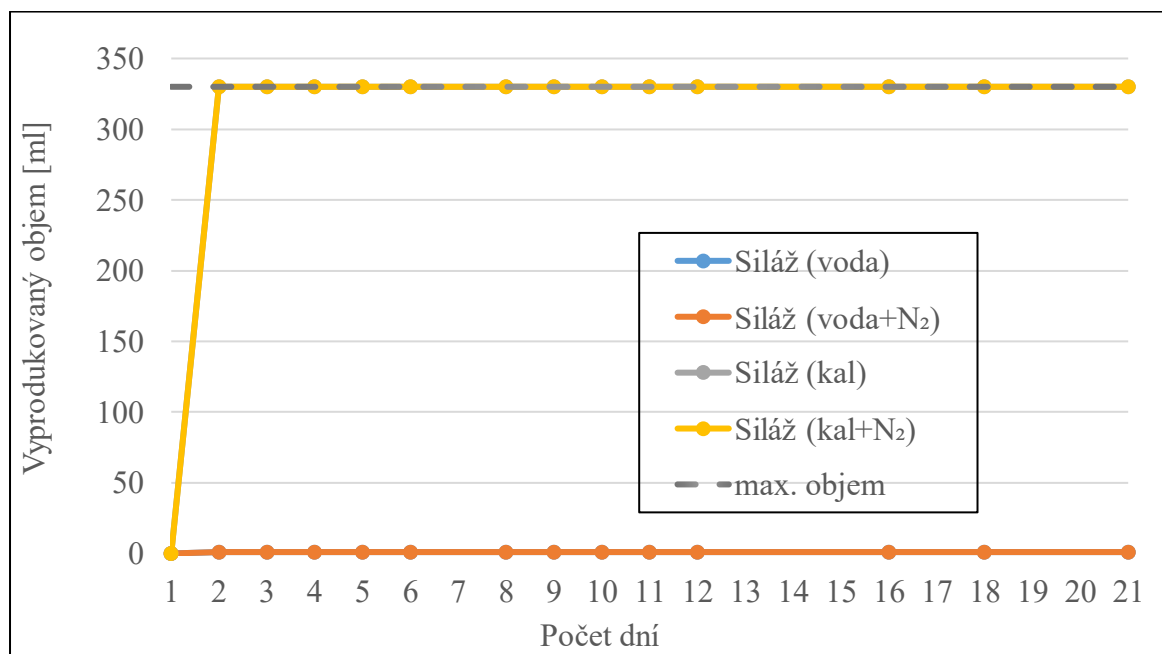
Vstupní substrát	oTS (hm. %)	Množství substrátu (g)	oTS (g) na množství	Podmínka rovnice (2) siláž/kal
Siláž	34,2	5	1,71	0,32
Očkovací kal	8,2	65	5,33	-
Voda	0,0	95	-	-

V průběhu pokusu byla měřena produkce plynu odečítáním z válců ponořených ve vodě. Jelikož pokus probíhal při různých teplotách, je produkce zobrazena na *grafu 8* a *grafu 9*. V *grafu 8* je možné vidět nulovou produkci fermentoru s obsahem siláže (voda). Stejnou nulovou produkci má i fermentor siláž (voda+N₂), tu bohužel na grafu nelze vidět, ale průběh je stejný jako u siláže (voda). Jedenáctý den dosáhl substrát siláž (kal+N₂) maximálního měřitelného objemu 330 ml v plynojemu a nebylo možné dále sledovat jeho produkci.



Graf 8 Průběh produkce plynu při pokojové teplotě 20 °C

V *grafu 9* splývá produkce plynů z fermentoru siláž (voda) a siláž (voda+N₂). Oba shodně vyprodukovaly za 21 dní 0 ml plynu. Stejný případ je u fermentorů siláž (kal) a siláž (kal+N₂), kdy oba fermentory druhý den naplnily celý plynojem o objemu 330 ml a nebylo dále možné měřit jejich produkci.

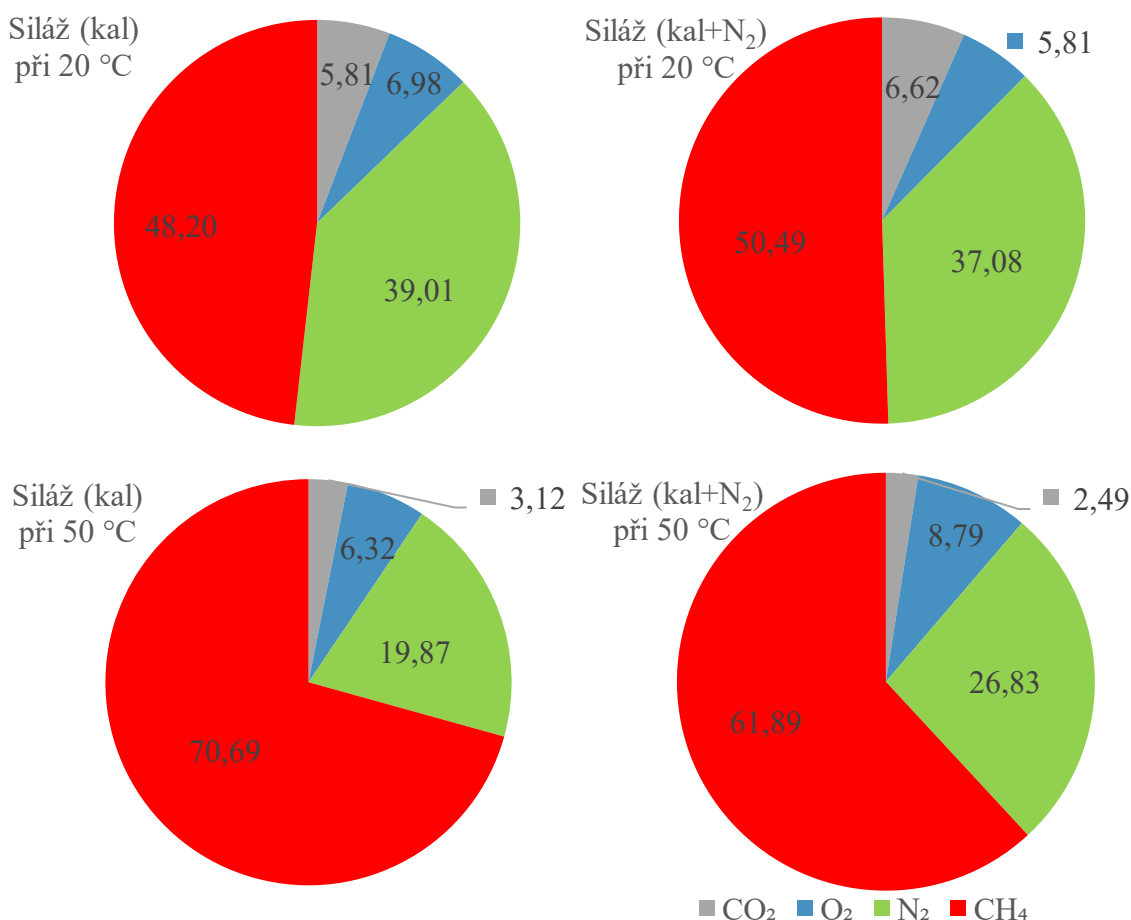


Graf 9 Průběh produkce plynu při teplotě 50 °C v peci

Na konci pokusu č. 4 bylo změřeno pH ve všech osmi fermentorech, pH je zobrazeno v tab. 10, která je rozdělena na dvě části, jelikož probíhal pokus s odlišnými teplotami. Při měření pH byla změřena teplota ve fermentorech, a to konkrétně pro fermentory při okolní teplotě 50 °C to bylo 24,1 °C a pro fermentory v pokojové teplotě 20 °C to bylo 20 °C.

Tab. 10 pH v jednotlivých fermentorech na konci fermentačního testu

Ředění fermentoru	50 °C				20 °C			
	Siláž (kal+N ₂)	Siláž (kal)	Siláž (voda+N ₂)	Siláž (voda)	Siláž (kal+N ₂)	Siláž (kal)	Siláž (voda+N ₂)	Siláž (voda)
pH	8,93	8,93	4,26	4,4	7,54	7,63	4,59	4,62



Graf 10 Složení jednotlivých vyprodukovaných plynů v objm. %

Výhřevnost vyrobeného bioplynu byla vypočítána tak, že se obsah metanu v objemových procentech z jednotlivých vzorků plynů vynásobil výhřevností metanu, která je 35,8 MJ/m³. Tato hodnota byla převzata z [48]. Jednotlivé výhřevnosti je možné vidět v tab. 11, dále je v tabulce uveden absolutní výtěžek energie vztažený na množství vyprodukovaného plynu. U tří vzorků, kromě siláže (kal) při 20 °C, je hodnota nepřesná, jelikož plynem dosáhly maximálního objemu a není možné přesně určit jejich výtěžek.

Tab. 11 Jednotlivé výhřevnosti vyprodukovaných bioplynů

Typ plynu	Výhřevnost		Absolutní výtěžek energie (J/ml)
	(MJ/m ³)	(kWh/m ³)	
Siláž (kal) při 20 °C	17,3	4,8	3840,6
Siláž (kal+N ₂) při 20 °C	18,1	5,0	5973,0
Siláž (kal) při 50 °C	25,3	7,0	8349,0
Siláž (kal+N ₂) při 50 °C	22,2	6,2	7326,0

Pokus č. 4 byl ukončen dle normy VDI 4630 po uplynutí 21 dnů od začátku produkce. Pokud by se produkce lišila 1 %, bylo by potřeba pokus prodloužit o 7 dnů [47]. Po ukončení pokusu byl odebrán vyprodukovaný plyn a poslán na analýzu na plynový chromatograf Agilent 8860. Pokus č. 4 byl vyhodnocen jako úspěšný, jelikož došlo k výrobě bioplynu, což je patrné ze složení vzniklého plynu, který je zobrazen na *grafu 10*. Na tomto grafu si můžeme povšimnout balastu jako je dusík a kyslík, a je zde obsaženo malé množství oxidu uhličitého. To je nejspíše způsobeno špatným odběrem plynu, kdy při odběru došlo k nasátí kyslíku a dusíku, které vytlačily oxid uhličitý. Popřípadě to může být zapříčiněno i skladováním plynu, kdy plynojemy byly zcela plné, proto mohl vyrobený plyn utíkat do vody, což mohlo zapříčinit, že se do jímacího systému dostal dusík a kyslík. Jiné vysvětlení, proč se kyslík s dusíkem objevil na plynovém chromatografu není, poněvadž kdyby plyn obsahoval kyslík v takovéto míře u malého měřítka, tak by anaerobní fermentace nemohla probíhat. Obsah metanu se liší u jednotlivých složení, což je patrné z *grafu 10*. Je to zapříčiněno faktory uvedené v kapitole 2.2, konkrétně teplotou a hydraulickou dobou zdržení. Jelikož hydraulická doba zdržení je stejná u všech fermentorů (21 dní), tak zde zůstává faktor teploty, kdy při teplotě 50 °C došlo k většímu rozkladu substrátu a tím i vyšší kvalitě bioplynu. V praxi to bývá naopak, jelikož je doba zdržení u termofilních BPS kratší než u mezofilních BPS. S teplotou souvisí i pH, které je zobrazeno v *tab. 10*, kde je u termofilní fermentace pH zásadité (z důvodu rozkladu většiny uhlíku) zbyl pouze dusík, který bakterie přeměnily na NH₃, což vytvořilo zásadité prostředí a došlo k inhibici celé produkce bioplynu. Bohužel se nedá určit přesně kdy, jelikož plynojemy byly hned druhý den plné, jak je patrné z *grafu 9*. U ředění substrátů vodou si lze povšimnout kyselých prostředí, což má za příčinu nejspíš přetížení fermentoru, jak je uvedeno v kapitole 2.2.4. Proto u těchto substrátů nedošlo k žádné produkci bioplynu. Při venkovní teplotě si lze všimnout, že hodnoty pH jsou v optimu pro proces anaerobní fermentace, které jsou zmíněny v kapitole 2.2.4. Produkce plynu zobrazená na *grafu 8* a *grafu 9* ukazuje vliv teploty na rychlost produkce plynu neboli rozkladu substrátu. Jak je již patrné z obou grafů siláže, které byly ředěny pouze vodou, nevyprodukovaly žádný plyn. Bohužel na *grafu 9* není možné vidět rostoucí produkci ani vliv dusíkaté atmosféry, jelikož rozklad probíhal velmi rychle. Na druhou stranu na *grafu 8* lze s přibývajícými dny vidět pomalu rostoucí produkci bioplynu, a také vliv dusíkaté atmosféry. Fermentor, kde byl aplikován dusík, produkoval více bioplynu, a současně jej produkoval rychleji než fermentor, kde zůstal vzduch. Dusík nemá vliv na obsah metanu v bioplynu, pouze jeho přítomnost urychluje produkci, jelikož zde není kyslík a hydrolýzní bakterie ho nemusí nejdříve spotřebovat, jelikož jsou fakultativně anaerobní, jak je zmíněno v kapitole 2.1. Přesto lze vidět rozdílné obsahy metanu u siláž (kal+N₂) a siláž (kal) v peci při 50 °C, což je zapříčiněné nejspíše odběrem plynu a také tím, že vstupní siláž mohla mít jiné složení (popřípadě mohl mít i očkovací kal jiné složení), což mohlo zapříčinit rozdílné obsahy metanu ve vyprodukovaném bioplynu.

ZÁVĚR

Výroba bioplynu přináší dobrou alternativu k dnešním fosilním palivům a jejich úplnému nahrazení, jelikož se bioplyn dá dále čistit na ušlechtlejší formu biometanu. Bioplyn je možné vyrábět z různých vstupních substrátů a různými technologiemi. Nejčastěji využívaným způsobem k výrobě bioplynu je anaerobní fermentace. Kromě tohoto způsobu je také možné vyrábět bioplyn termickým zplyňováním, tento způsob se ale momentálně moc nevyužívá. Anaerobní fermentace je velmi složitý proces, který může být ovlivněn mnoha faktory. Mezi hlavní faktory patří teplota, HRT, pH a poměr C/N. Proces anaerobní fermentace je řízen v BPS. Nejčastěji se BPS dělí podle druhu zpracovávaného vstupního substrátu a typu zvolené technologie anaerobní fermentace. Hlavním technologickým faktorem pro dělení BPS je obsah sušiny ve vstupním substrátu, který rozlišuje technologie anaerobní fermentace na suché (od 15 hm. %) a mokré procesy (od 4 do 12 hm. %). Podle druhu zpracovávaného vstupního substrátu je možné dělit bioplynové stanice na odpadní BPS a zemědělské BPS. Odpadní BPS představují velkou výhodu ve zpracování biologicky rozložitelných odpadů a jejich následnému energetickému využití ve formě bioplynu. Dalším produktem, který vzniká po anaerobní fermentaci je digestát, který lze separovat a má široké uplatnění, kdy nejčastěji je využíván jako hnojivo (jak v separované formě, tak i neseparované), jelikož po anaerobní fermentaci zůstává v digestátu hodně dusíku a fosforu. Avšak momentálně nejčastěji využívaným způsobem výroby bioplynu ve světě je metodou mokré fermentace v mezofilním režimu, jelikož v tomto teplotním pásmu je proces stabilnější a je méně energeticky náročný než u termofilního pásma. Výtěžek bioplynu je relativně vysoký, ale pořád nižší než u termofilního procesu.

Do budoucna bude hrát bioplyn velmi důležitou roli v dosažení klimatické neutrality, jelikož se jedná o obnovitelný zdroj. Jeho upgradem dostáváme biometan, který může zcela nahradit zemní plyn a snížit emise nejen v odvětví energetiky, ale také dopravy a vytápění v domácnostech. Díky tomuto širokému spektru využití nabízí velmi účinné způsoby dekarbonizace v odvětvích, kam jiné OZE nedosáhnou. Výroba bioplynu má i mnohé další výhody co jiné OZE nemají, jakožto skoro celoroční nepřetržitou výrobu elektřiny nebo biometanu a snadnou regulaci procesu, až na pár týdnů plánovaných odstávek. Díky schválené podpoře z EU na upgradování bioplynu na biometan v ČR, bude biometan jeden z klíčových OZE při dosažení klimatických cílů v ČR do konce roku 2030. Jeden ze stanovených cílů je právě výroba 0,7 bcm biometanu do konce roku, což je zhruba jedna desetina spotřeby zemního plynu v ČR. Z toho vyplývá že se dá předpokládat nárůst biometanizačních jednotek z dosavadních 6 na mnohem větší počet.

V experimentální části je popsán vlastní postup výroby bioplynu, který ukazuje tři nevydařené pokusy, ze kterých byly brány poznatky a implementovány do úspěšného čtvrtého pokusu. Snahou bylo vyrobit bioplyn i z jiných vstupních substrátů, než je jenom kukuřičná siláž, ale jelikož nebyly předešlé dva pokusy úspěšné, byla kukuřičná siláž zvolena za výchozí vstupní substrát a podle ní byl poté celý proces nastaven. V prvním pokusu PET láhve, pojmenovaném podle použitého typu fermentoru, došlo mnohokrát k narušení bezkyslíkaté atmosféry jak odběry plynu nebo jen otevřením fermentoru, samotné PET fermentory nebyly ani nijak těsněny. Tento faktor je stěžejní ke správné výrobě bioplynu, proto zde k žádné výrobě nedošlo a pokus byl neúspěšný. U druhého pokusu bylo provedeno mnoho změn, jak ve způsobu ředění vstupního substrátu dle fermentační normy VDI 4630, tak typu fermentorů na malé plastové vzorkovnice, dle toho i samotný název, aby byla dodržena nepropustnost vzduchu. Bohužel i tento pokus byl neúspěšný, jelikož došlo k pění aktivního kalu, které vedlo k prasknutí fermentorů. U třetího pokusu bylo sníženo množství vstupního substrátu, aby pěna, která vznikne, měla prostor a nedošlo k prasknutí. Tento pokus byl však také vyhodnocen jako neúspěšný, jelikož došlo k odlepení spoje mezi hadičkou jímající bioplyn a fermentorem,

jenž narušilo anaerobní atmosféru. Čtvrtý pokus s sebou nesl řadu změn. Například v typu fermentoru, kde byly, jak použity skleněné vzorkovnice se zábrusem, tak i hadičky byly vyměněny za plastové namísto silikonových, které dobře netěsnily. Skleněný fermentor byl zcela plynotěsný a řešil spoj mezi fermentorem a hadičkou, jelikož hadička byla nasazena na sklo a nemohlo dojít k jejímu odlepení jako u předchozího pokusu. Díky všem předchozím poznatkům, které byly využity ve čtvrtém pokusu, byl pokus úspěšný a došlo k výrobě bioplynu. Jako posuzované faktory na kvantitu a kvalitu bioplynu byly zvoleny tyto: různá teplota ve fermentorech (20 °C nebo 50 °C), rozdílné ředění fermentoru (vodou nebo obsahem fermentoru z BPS Nížkovice), dusíkatá atmosféra ve fermentoru a doba zdržení, která byla zvolena dle normy VDI 4630 na 21 dní. Výsledky ukázaly, že fermentory, které byly naředěny vodou, nevyprodukovaly žádný plyn ani bioplyn. Teplota ovlivnila rychlost produkce bioplynu, kdy fermentory vystavené teplotě 50 °C vyprodukovaly hned první den maximální objem plynojemu. Teplota také ovlivnila obsah metanu v bioplynu, kdy při stejné době zdržení obsahují více objemových procent metanu fermentory umístěné v peci při teplotě 50 °C, díky většímu rozkladu vstupního substrátu. Dusíkatá atmosféra a její vliv lze vidět u pokusu s pokojovou teplotou 20 °C, kdy fermentor, jenž byl naplněn dusíkem, produkoval rychleji a více bioplynu než fermentor, který byl ponechán se vzduchem. Na obsah metanu v bioplynu podle pokusu neměla dusíkatá atmosféra vliv. Tento postup výroby bioplynu nabízí prostor ke zlepšení, například způsob vyhřívání a míchání fermentoru, které by bylo možné nahradit vyhřívanou vodní lázní s termostatem, což by předešlo výkyvům teploty, které jsou pro proces výroby bioplynu nežádoucí. Míchání obsahu fermentoru by se dalo provést kovovou tyčinkou rotující díky elektromagnetickému poli, místo protřepávání, které není tak efektivní a může vést k poškození fermentoru. Další prostor pro zlepšení nabízí také jímací systém, kdyby mohl být produkován plyn průběžně měřen a ukládán do mokrého plynojemu nebo suchého plynotěsného vaku s větší kapacitou, než jaká byla použita. Popřípadě by zde mohl být instalován trojcestný ventil, který by umožnil snadný odběr z plynojemu bez narušení anaerobní atmosféry ve fermentoru a tím by se předešlo zkreslení výsledků balastem. I přes možnosti ke zlepšení se ukázalo, že tímto způsobem je reálné bioplyn vyrobit. Díky postupu výroby bioplynu u čtvrtého úspěšného pokusu, by bylo možné do budoucna stanovovat vhodnost různých vstupních substrátů k anaerobní fermentaci a jejich výtěžnost. To by mohlo pomoci k nastavení a realizaci podmínek bioplynové stanice a zhodnotit její ekonomickou návratnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HORBAJ, Peter, Daniela MARASOVÁ a Imrich ANDREJČÁK. *Bioplyn a jeho využití*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2021. ISBN 978-80-248-4558-6.
- [2] STRAKA, František a Karel CIAHOTNÝ. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. 3., zkrác. vyd. Praha: GAS, 2010. ISBN 978-80-7328-235-6.
- [3] *Bioplyn* [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplyn.pdf>
- [4] Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. *IEA* [online]. Paris, 2020 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>
- [5] KHALIL, Mohamed a Hanaa MANSOUR. *Biogas production*. 2020/03/22. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.30410.31680
- [6] UŠŤAK, Sergej a Jaroslav VÁŇA. *Bioplynová fermentace biomasy a biologicky rozložitelných odpadů*. Vyd. 2. Praha: CZ Biom, 2006. ISBN 80-7427-207-9.
- [7] UDDIN, Md Mosleh a Mark Mba WRIGHT. *Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances: Physical Sciences Reviews*. 2023, **8**(9), 2819-2837. Dostupné z: doi:doi:10.1515/psr-2021-0068
- [8] *Průvodce výrobou a využitím bioplynu* [online]. Praha: CZ Biom – České sdružení pro biomasu, 2009, 1-160 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Pruvodce_vyrobou_vyuzitim_bioplynu_2.pdf
- [9] MEEGODA, Jay N., Brian LI, Kush PATEL a Lily B. WANG. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2018, **15**(10) [cit. 2024-04-03]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph15102224
- [10] ZIEMIŃSKI, Krzysztof a M. FRAC. Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms: Transformations, stages and microorganisms. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*. 2012/03/01, **11**. Dostupné z: doi:10.5897/AJBX11.054
- [11] VEDANTU. Anaerobic Digestion. *Vedantu* [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.vedantu.com/biology/anaerobic-digestion>
- [12] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-86167-21-6.
- [13] YILMAZ, Adem, Sinan ÜNVAR, Abdulkadir KOCER a Bünyamin AYGÜN. Factors Affecting the Production of Biogas. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018/05/01, **9**, 59-62.
- [14] KABEYI, Moses Jeremiah Barasa a Oludolapo Akanni OLANREWaju. Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy*. Hindawi, 2022, **2022**, 8750221. ISSN 2356-735X. Dostupné z: doi:10.1155/2022/8750221
- [15] KAJAN, Miroslav a Richard LHOTSKÝ. *Možnosti zvýšení výroby bioplynu na stávajících zařízeních* [online]. Třeboň, 2006, 1-123 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/30.pdf>
- [16] MUŽÍK, Oldřich a Jaroslav KÁRA. Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2024-04-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>

- [17] ADEKUNLE, Kayode Feyisetan a Jude Awele OKOLIE. *A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion* [online]. 2015, 205-212 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: doi:10.4236/abb.2015.63020
- [18] KÁRA, Jaroslav. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. Praha: VÚZT, 2007. ISBN 978-80-86884-28-8.
- [19] CZ BIOM. Spolehlivá a ověřená technologie bioplynové stanice. *Biom.cz* [online]. 2015 [cit. 2024-04-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/spolehliva-a-overena-technologie-bioplynove-stanice>
- [20] ŠKORVAN, Ondřej, Marek HOLBA a Karel PLOTĚNÝ. *Suchou nebo mokrou fermentaci* [online]. 2011 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/suchou-nebo-mokrou-fermentaci/>
- [21] *Types of Biogas Digesters and Plants* [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: https://energypedia.info/wiki/Types_of_Biogas_Digesters_and_Plants#Industrial_Digester_Types
- [22] MARJOLAINE. *STATE-OF-THE-ART DRY AND WET ANAEROBIC DIGESTION SYSTEMS FOR SOLID WASTE* [online]. In: . 2018 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.biogasworld.com/news/dry-wet-anaerobic-digestion-systems/>
- [23] *Introduction to Biogas Technology* [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <http://www.eagri.org/eagri50/AENG352/lec13.pdf>
- [24] *Členění bioplynových stanic* [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.bioplynovestanice.cz/cleneni-bps/>
- [25] *Anaerobní technologie* [online]. 2007 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [26] STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS, 2006. ISBN 80-7328-090-6.
- [27] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. 2004. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [28] BIOPROFIT. *Jak využít fermentační zbytek* [online]. 2007 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_fermentace.htm
- [29] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2022* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://eru.gov.cz/rocnizprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2022>
- [30] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Hodnocení zdrojové přiměřenosti elektrizační soustavy ČR 2022* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>
- [31] ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. *Česká bioplynová asociace* [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/>
- [32] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/aktualizace-vnitrostatniho-planu-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--277532/>
- [33] *Rozvoji biometanu nově pomůže státní podpora* [online]. In: . 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.elitanaroda.cz/clanek/4828-rozvoji-biometanu-nove-pomuze-statni-podpora/>
- [34] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Obnovitelné zdroje energie v roce 2021* [online]. 2022 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z:

- <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2023/1/Obnovitelne-zdroje-energie-2021-230125.pdf>
- [35] EVROPSKÁ RADA. *Zelená dohoda pro Evropu* [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/green-deal/>
- [36] BUDÍN, Jan. *Podíl OZE na spotřebě energie v EU vzrostl na 23 %. V roce 2030 má činit 42,5 %* [online]. 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/podil-oze-na-spotrebe-energie-v-eu-vzrostl-na-23-v-roce-2030-ma-cinit-425>
- [37] EUROBSERV-ER. *Biogas barometer 2023* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2023/>
- [38] EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. *EBA Statistical Report 2023 PRESS RELEASE* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/12/PR_EBA-Statistical-Report-2023.pdf
- [39] IEA. *Renewables 2023* [online]. Paris, 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- [40] EFG. *Česko patří mezi TOP 10 největších producentů bioplynu v Evropě, ve výrobě biometanu ale zaostává* [online]. CZBA. 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/aktuality/cesko-patri-mezi-top-10-nejvetsich-producentu-bioplynu-v-evrope-ve-vyrobe-biometanu-ale-zaostava.html>
- [41] NGUYENOVÁ, Ha My. *Bioplyn a biometan v Evropě. Biom.cz* [online]. Biom.cz, 2023 [cit. 2024-05-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplyn-a-biometan-v-evrope>
- [42] EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. *Breaking Free of the Energy Dependency Trap – Delivering 35 bcm of biomethane by 2030* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.europeanbiogas.eu/breaking-free-of-the-energy-dependency-trap-delivering-35-bcm-of-biomethane-by-2030/>
- [43] FRÉDÉRIC, Simon. *EU's 35 bcm target for biomethane 'unrealistic', campaigners say* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/eus-35-bcm-target-for-biomethane-unrealistic-campaigners-say/>
- [44] SEDLÁK, Martin, Tatiana MINDEKOVÁ a Martin SCHWARZ. *SVAZ MODERNÍ ENERGETIKY. Biometan: Nová energie Česka* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: https://www.modernienergetika.cz/wp-content/uploads/2023/11/Infolist_Biometan.pdf
- [45] EVROPSKÁ KOMISE. *Státní podpora: Evropská komise schválila český program v hodnotě 2,4 miliardy eur na podporu výroby udržitelného biometanu* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/cs/ip_23_3383
- [46] TRNAVSKÝ, Jiří. *Komise schválila podporu výroby biometanu v Česku* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://trvaleudrzitelnezemdelstvi.cz/clanky/komise-schvalila-podporu-vyroby-biometanu-v-cesku/>
- [47] VDI4630. *Fermentation of organic materials - Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*. 2006. ICS 13.030.30; 27.190.
- [48] FÍK, Jiří. *Zemní plyn - spalné teplo a další vlastnosti* [online]. 2004 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/1963-spalovaci-vlastnosti-zp-i>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

HRT	Hydraulická doba zdržení
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
OZE	Obnovitelné zdroje energie
BPS	Bioplynová stanice
POZE	Podpora obnovitelných zdrojů
CZBA	Česká bioplynová asociace
bcm	miliarda metrů krychlových
bioCNG	Bio stlačený zemní plyn
bioLNG	Bio zkapalněný zemní plyn
EFG	Energy financial group
PET	Polyethylentereftalát
EBA	European Biogas Association

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Průběh fází anaerobní digesce s meziprodukty. Upraveno dle [8]	12
Obr. 2 Schéma zemědělské bioplynové stanice na mokrou fermentaci [8]	19
Obr. 3 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v 2022 [29]	23
Obr. 4 Očekávaná produkce bioplynu v následujících letech [32]	27
Obr. 5 Aparatura na výrobu a jímání bioplynu	29
Obr. 6 Smrštěné a zevnitř plesnivé fermentory	30
Obr. 7 Aparatura na výrobu bioplynu při pokojové teplotě	34
Obr. 8 Fermentory v peci (vlevo) s jímacím systémem (vpravo) při teplotě 50 °C	36
Obr. 9 Nový typ fermentorů umístěný v peci při 50 °C	37
Graf 1 Výhřevnost bioplynu v závislosti na obsahu metanu. Upraveno dle [3]	11
Graf 2 Vývoj výroby celkové elektřiny z bioplynu. Upraveno dle [29; 31; 34]	24
Graf 3 Vývoj celkové produkce energie z bioplynu a biometanu v EU. Upraveno dle [40] ...	25
Graf 4 Jednotlivé složení plynů v objm. % z prvního odběru	30
Graf 5 Produkce plynu z různých vstupních substrátů	31
Graf 6 Jednotlivé složení plynů v objm. % z druhého odběru	32
Graf 7 Produkce plynu z různých substrátů při teplotě 40 °C	34
Graf 8 Průběh produkce plynu při pokojové teplotě 20 °C	38
Graf 9 Průběh produkce plynu při teplotě 50 °C v peci	38
Graf 10 Složení jednotlivých vyprodukovaných plynů v objm. %	39

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Běžné složení bioplynu [6]	10
Tab. 2 Vlastnosti bioplynu s obsahem 60 % CH ₄ [6].....	10
Tab. 3 Základní vlastnosti materiálů vhodných pro fermentaci [15].....	16
Tab. 4 Vybrané příklady vstupních substrátů a jejich vlastnosti. Upraveno dle [18].....	16
Tab. 5 Rozdílné složení bioplynu dle složení vstupního materiálu a místa vzniku za normálních podmínek, tj. 15 °C a 101 325 Pa [25].....	19
Tab. 6 Hodnoty vstupního substrátu u pokusu č. 1	29
Tab. 7 Hodnoty vstupního substrátu u pokusu č. 2.....	33
Tab. 8 Hodnoty vstupního substrátu a ředicích kapalin u pokusu č. 3	35
Tab. 9 Hodnoty vstupního substrátu a ředicích kapalin u pokusu č. 4	37
Tab. 10 pH v jednotlivých fermentorech na konci fermentačního testu	39
Tab. 11 Jednotlivé výhřevnosti vyprodukovaných bioplynů	40