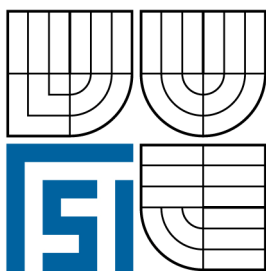


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

## **VÝTĚŽNOST BIOPLYNU Z RŮZNÝCH DRUHŮ SUBSTRÁTŮ**

BIOGAS YIELD FROM VARIOUS TYPES OF BIODEGRADABLE MATERIALS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JIŘÍ LAVICKÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. ZDENĚK BEŇO**

*BRNO 2008*

## Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popis výtěžnosti bioplynu z různých druhů substrátů. V úvodní části jsou zpracována základní fakta o anaerobní technologii, princip tvorby bioplynu a využití bioplynu v praxi.

Hlavní část práce je věnována výtěžnosti bioplynu, je uvedeno několik druhů substrátů s uvedením výtěžnosti, jsou popsány vlivy kvality surovin a jejich předúpravy na výtěžnost bioplynu. Součástí práce je i jednoduchý výpočet výtěžnosti bioplynu ze zvoleného substrátu.

### Klíčová slova:

anaerobní technologie, bioplyn, výtěžnost bioplynu

## Abstrakt

The objective of this bachelor thesis is a description of the biogas yield from various types of biodegradable materials. In the introductory part there are presented facts about anaerobic technology, production principle of biogas and biogas utilization in practice.

The document body deals with biogas yield, there are presented several types of biodegradable materials with biogas yield, there are described material quality effects and their preliminary treatment to biogas yield. Elementary calculation of the biogas yield from particular material is included.

### Keywords:

anaerobic technology, biogas, biogas yield

**Bibliografická citace:**

LAVICKÝ, J. *Výtěžnost bioplynu z různých druhů substrátů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 31s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Beňo.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výtěžnost bioplynu z různých druhů substrátů vypracoval samostatně za použití pramenů uvedených v přehledu literatury.

V Brně dne .....

Podpis .....

**Poděkování**

Děkuji všem, kteří mi byli při vypracování bakalářské práce nápomocni. Zvláště bych chtěl poděkovat Ing. Z. Beňovi za jeho velkou ochotu při řešení problémů, za jeho trpělivost a odborné vedení.

## Obsah

|                                                               |        |
|---------------------------------------------------------------|--------|
| 1. Úvod .....                                                 | - 8 -  |
| 2. Bioplyn.....                                               | - 9 -  |
| 2.1. Majoritní složky bioplynu .....                          | - 10 - |
| 2.2. Minoritní složky bioplynu .....                          | - 10 - |
| 2.2.1. Síra.....                                              | - 10 - |
| 2.2.2. Halogeny .....                                         | - 11 - |
| 2.2.3. Křemík .....                                           | - 11 - |
| 2.3. Skladování bioplynu.....                                 | - 12 - |
| 2.4. Využití bioplynu .....                                   | - 13 - |
| 3. Anaerobní fermentace .....                                 | - 14 - |
| 4. Metody fermentace .....                                    | - 16 - |
| 4.3. Zařízení .....                                           | - 18 - |
| 5. Faktory ovlivňující anaerobní proces.....                  | - 19 - |
| 5.1. Vliv teploty .....                                       | - 19 - |
| 5.2. Vliv pH .....                                            | - 20 - |
| 5.3. Přítomnost toxických a inhibujících látek.....           | - 20 - |
| 6. Výtěžnost bioplynu.....                                    | - 21 - |
| 6.1. Využití anaerobní technologie.....                       | - 23 - |
| 6.1.1. Odpady z jatek a kafileríí .....                       | - 23 - |
| 6.1.2. Zemědělské organické odpady a rostlinné materiály..... | - 23 - |
| 6.1.3. Biologicky rozložitelný komunální odpad.....           | - 23 - |
| 6.1.4. Výroba biopaliv .....                                  | - 24 - |
| 6.2. Vliv kvality suroviny na výtěžnost bioplynu.....         | - 24 - |
| 6.2.1. Mechanická dezintegrace .....                          | - 25 - |
| 6.2.2. Termická předúprava.....                               | - 26 - |
| 6.2.3. Chemická předúprava.....                               | - 27 - |
| 6.2.4. Biologické metody předúpravy .....                     | - 27 - |
| 7. Výpočet teoretické výtěžnosti metanu.....                  | - 28 - |
| 8. Závěr .....                                                | - 30 - |
| 9. Seznam použité literatury .....                            | - 31 - |

## 1. Úvod

V současné době neustále stoupá celosvětová poptávka po energiích a v souvislosti s tím i jejich cena. S rostoucím znečištěním, množstvím odpadů a koncentrací skleníkových plynů v atmosféře je stále více kladen důraz na využívání obnovitelných zdrojů energie. Dosavadní primární zdroje energie již totiž nestačí pokrývat poptávku po energiích, a proto je třeba hledat alternativu, která bude nejen šetrná k životnímu prostředí, ale způsob jejího využívání bude i efektivní.

Bioplyn a bioplynové technologie nabízí perspektivní možnost pro zpracování biologicky rozložitelných odpadů (materiálů). Tyto odpady, ať už z čistíren odpadních vod, ze zemědělství, lesnictví, potravinářského průmyslu nebo obsažené v komunálním odpadu, lze efektivně využívat v bioplynových stanicích za současné výroby tepelné a elektrické energie pomocí kogeneračních jednotek. Výroba bioplynu ale není vázána jen na výrobu z odpadních surovin. Pro výrobu je také možné využívat účelně pěstovanou biomasu.

Přestože bioplyn zatím není schopen vytlačit fosilní paliva z jejich dominantního postavení na trhu s energiemi, má na rozdíl od nich zcela neomezené perspektivy pro budoucí využití. Důkazem toho je i zvýšený zájem o technologii výroby bioplynu, který se projevuje rostoucím počtem projektovaných bioplynových stanic a také zájem zemědělců, soukromých osob i firem o vývoj v této oblasti.

Česká republika se také snaží splnit požadavky Evropské unie pro zvýšení podílu využívání obnovitelných zdrojů energie, a proto jsou tyto požadavky zapracovány do Plánu odpadového hospodářství ČR. Geografické umístění naší země bohužel neumožňuje ve větším měřítku efektivně využívat sluneční a větrnou energii a rovněž využívání vodní energie nelze příliš rozšířit. Anaerobní technologie proto nabízí perspektivní možnost, jak získávat energii z biologicky rozložitelných materiálů. Tomu napomáhá i fakt, že jako základ pro bioplynovou stanici lze vzít i patřičně nevyužité zemědělské stavby, kterých je v České republice dostatečné množství.

## 2. Bioplyn

Je to vysoce hořlavý plyn, lehčí než vzduch, který je produktem anaerobní fermentace organických materiálů. Hlavním cílem je likvidace organického znečištění a stabilizace organické hmoty z hlediska ochrany životního prostředí. Přitom se odstraněné organické znečištění přeměňuje na využitelnou surovinu – bioplyn. Bioplyn v největší míře přirozeně vzniká v sedimentech, mokřadech a trávicím traktu přežvýkavců. V prostředí vytvořeném lidmi vzniká bioplyn na rýžových polích, uskladnění hnojů a kejď. Dále je produkován na skládkách odpadů a v čistírnách odpadních vod (ČOV). Díky vysokému obsahu metanu je bioplyn cennou energetickou surovinou. Je to směs plynů skládající se převážně z metanu ( $\text{CH}_4$ ) a oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a menšího množství vodíku ( $\text{H}_2$ ), dusíku ( $\text{N}_2$ ), a sulfanu ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Jeho výhřevnost činí  $13,7 - 27,4 \text{ MJ.m}^{-3}$ , je tedy téměř dvojnásobná ve srovnání s výhřevností svítiplynu ( $13,0 \text{ MJ.m}^{-3}$ ). Jeden metr krychlový surového bioplynu má přibližně stejnou výhřevnost jako  $0,55 \text{ kg}$  lehkého topného oleje. Naproti tomu výhřevnost zemního plynu činí v průměru  $33 \text{ MJ.m}^{-3}$ . Výhřevnost bioplynu závisí na obsahu metanu. Čím větší je obsah metanu, tím větší bude mít bioplyn výhřevnost. Jeho obsah závisí na tom, z jakého substrátu je bioplyn získán.

Z různých substrátů vzniká bioplyn o různém složení. Není tedy možné udat přesné hodnoty složení. Zvláště kolísají hodnoty metanu, oxidu uhličitého a sulfanu.

| BIOPLYN                 | OBSAH $\text{CH}_4$ (obj.%) |
|-------------------------|-----------------------------|
| Čištění odpadních vod   | 55 - 85                     |
| Ze stabilizace kalů     | 60 - 70                     |
| Agroindustriální odpady | 55 - 75                     |
| Skládky                 | 35 - 55                     |

Tab.1 Obsah metanu v závislosti na druhu substrátu [2]

| složka                          | množství v [% obj.] |
|---------------------------------|---------------------|
| metan ( $\text{CH}_4$ )         | 58 - 80             |
| oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) | 20 - 42             |
| vodní pára                      | 0 - 10              |
| sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ) | 0 - 1               |
| dusík ( $\text{N}_2$ )          | 0 - 5               |
| kyslík ( $\text{O}_2$ )         | 0 - 2               |
| vodík ( $\text{H}_2$ )          | 0 - 1               |
| čpavek ( $\text{NH}_3$ )        | 0 - 1               |

Tab.2 Příklad složení bioplynu

## 2.1. Majoritní složky bioplynu

Za majoritní složky bioplynu lze považovat pouze metan ( $\text{CH}_4$ ) a oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ). Pokud jde o kvalitní bioplyn, jsou ostatní plynné složky zastoupeny pouze desetinami procenta. Jejich hodnoty se značně mění v závislosti na surovině, ze které byl bioplyn získán a na použité technologii. Jak velké budou hodnoty majoritních složek, také ovlivňuje fakt, zda se jedná o reaktorový nebo skládkový bioplyn. Skládka odpadu není plynotěsná, a proto bioplyn na ní vytvořený může být naředěn přisátým vzduchem. [1]

## 2.2. Minoritní složky bioplynu

Co se minoritních složek týče, obsahuje jich bioplyn obrovské množství, ale většina z nich se v něm nachází ve velmi malé koncentraci (stovky miligramů na krychlový metr).

### 2.2.1. Síra

Síra se v bioplynu vyskytuje nejčastěji ve formě sulfanu. Jak velká bude jeho koncentrace záleží na substrátu ze kterého je bioplyn získán. Někdy se může stát, že koncentrace sulfanu vzroste tak, že se stává majoritní složkou. Vysoká koncentrace sulfanu je nežádoucí, protože sulfan silně zapáchá a je smrtelně jedovatý. Síru lze z bioplynu odstranit například pomocí aktivního uhlí.[1]

| druh substrátu                                                                        | obsah $\text{H}_2\text{S}$ v bioplynu [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| dřevní biomasa, papír, celulóza, rostlinný odpad                                      | do 100                                                           |
| kaly z ČOV                                                                            | 300 - 1500                                                       |
| živočišné odpady (skot)                                                               | 500 – 800                                                        |
| živočišné odpady (drůbež, prasata)<br>potravinářské odpady z vysokým obsahem protejnů | 4000 - 6000                                                      |

Tab.3 Obsah sulfanu v bioplynu z různých substrátů [1]



Obr.1 Odsiřovací jednotka [6]

### 2.2.2. Halogeny

Vyskytují se převážně v bioplynu produkovaném na skládkách odpadů. V současnosti již nejsou problémy s freony, protože jejich používání bylo silně omezeno. Nyní mezi hlavní sledované složky patří sloučeniny chlóru. V bioplynu jsou obsaženy v desítkách miligramů na metr krychlový. Některé z nich způsobují korozi, nebo jsou karcinogenní. [1]

### 2.2.3. Křemík

Křemík se v bioplynu nachází převážně ve formě siloxanů. S tímto znečištěním se setkáváme hlavně u kalů z ČOV. Jeho zdrojem je narůstající používání různých aviváží, kosmetiky, maziv a čisticích prostředků. Jejich obsah v bioplynu je okolo  $30 \text{ mg/m}^3$ . Problém se siloxany spočívá v tom, že snižují životnost motorů spalujících bioplyn. Mají za následek snižování mazací účinnosti, což může vést až k zadření motoru. V současnosti je technologie pro odstranění křemíku z bioplynu příliš finančně náročná a nevyplatí se. [1]



Obr.2 Zanesený píst kogenerační jednotky sloučeninou křemíku

## 2.3. Skladování bioplynu

Před dalším použitím se bioplyn skladuje v různých typech plynojemů.



Obr.3 Kulovitý plynojem [13]

## 2.4. Využití bioplynu

Nejběžnějším způsobem využití bioplynu je jeho spalování za pomoci kogeneračních jednotek za současného vzniku tepla a elektřiny. V zahraničí, převážně ve skandinávských zemích, se bioplyn po úpravě začíná využívat jako alternativní palivo do dopravních prostředků nebo se dodává do plynárenské sítě. [3]



Obr.4 Kogenerační jednotka se vznětovým motorem. [12]



Obr.5 Čerpací stanice na bioplyn upravený pro pohon automobilů ve švédském Boras. [12]

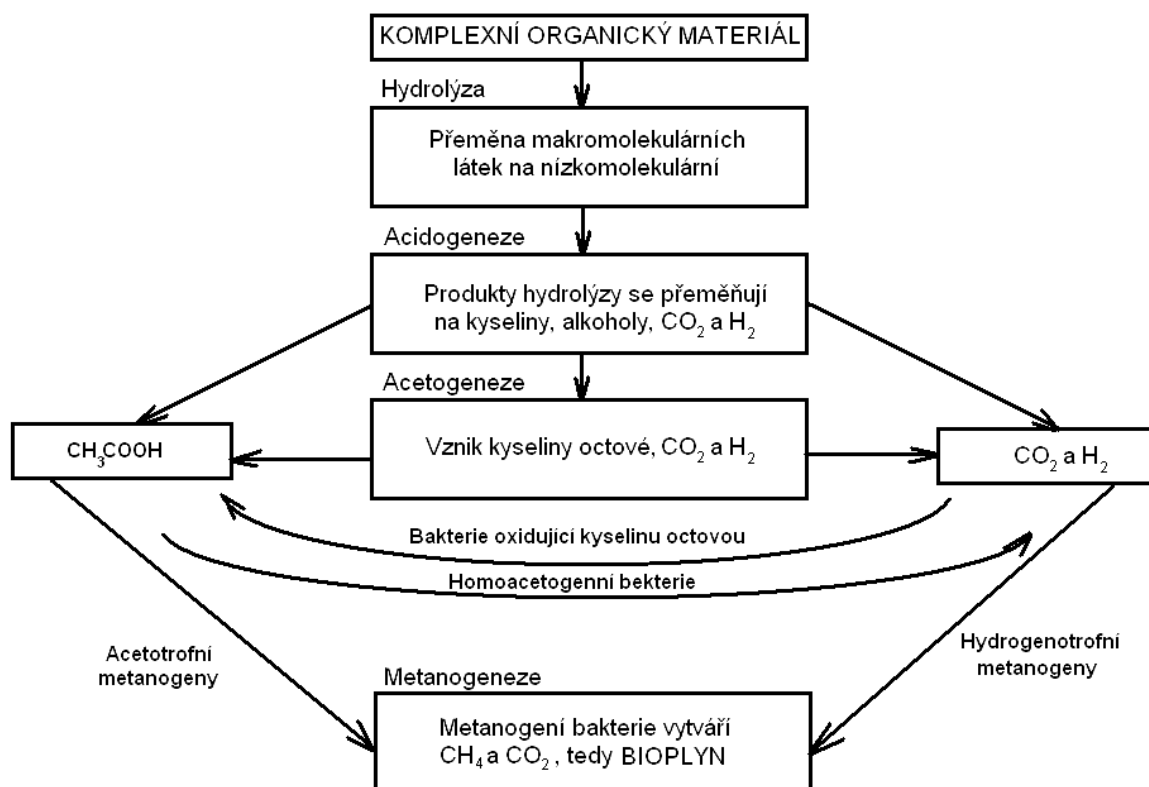
### 3. Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace organických materiálů neboli metanizace je souborem na sebe navazujících procesů, při níž směs mikroorganismů rozkládá organickou hmotu bez přístupu vzduchu za optimálně řízených podmínek (obsah sušiny, reakční teplota, pH). Na tomto procesu se podílí různé skupiny anaerobních mikroorganismů, kdy se produkt jedné skupiny stává potravou další. Proto je důležité, aby systém fungoval jako celek, jelikož vypadnutí jednoho článku procesu má za následek narušení celého systému. Celý proces probíhá nejčastěji mezi teplotami 0 °C a 70 °C. Při samotném procesu nevzniká teplo a je ho proto třeba dodat.

Konečným produktem anaerobní fermentace je bioplyn (metan, oxid uhličitý a voda) a digestát, tj. nerozložitelný zbytek organické hmoty, který je již stabilizován, je nezávadný k životnímu prostředí a lze jej dále využít pro jeho vysoký hnojivý účinek v zemědělství.

Proces anaerobní fermentace se skládá ze čtyř základních fází:

- hydrolýza
- acidogeneze
- acetogeneze
- metanogeneze



Obr.6 Průběh čtyřfázové anaerobní fermentace [7]

**Hydrolyza** – fáze, která probíhá v době, kdy je v prostředí ještě obsažen vzdušný kyslík. Anaerobní bakterie, nikoliv metanové bakterie, přeměňují rozpuštěné i nerozpuštěné makromolekulární látky (jako jsou bílkoviny, polysacharidy, tuky a celulóza). Tak vznikají nízkomolekulární látky (monosacharidy, aminokyseliny, mastné kyseliny) rozpustné ve vodě + voda. Ty jsou na rozdíl od vysokomolekulárních látek schopny transportu dovnitř buněk. Tato fáze ještě nevyžaduje prostředí neobsahující kyslík.

**Acidogeneze** – je "kyselá" fáze, kde dochází k odstranění zbytků vzdušného kyslíku a vytvoření anaerobního prostředí. Jsou zde produkty hydrolyzy (nízkomolekulární látky) rozkládány na jednodušší organické látky (kyseliny, alkoholy, oxid uhličitý a vodík). Fermentací těchto látek se tvoří řada konečných redukovaných produktů, které jsou závislé na charakteru počátečního substrátu a na podmínkách prostředí. Při nízkém parciálním tlaku vodíku jsou produkovány kyselina octová,  $H_2$  a  $CO_2$ , při vyšším jsou tvořeny vyšší organické kyseliny, mléčná kyselina, etanol apod. Sledováním koncentrace nižších mastných kyselin v systému lze zjišťovat průběh a rovnováhu celého procesu. [8],[11]

**Acetogeneze** – fáze, kde dochází k oxidaci produktů acidogeneze na oxid uhličitý, vodík a kyselinu octovou. Účast acetogenních mikroorganismů produkujících vodík na rozkladu je nezbytná, poněvadž rozkládají propionovou kyselinu a ostatní organické kyseliny vyšší než octovou, alkoholy a některé aromatické sloučeniny. Jsou zde zastoupeny i minoritní skupiny organismů produkující kromě kyseliny octové a vodíku také sulfan a dusík. [8],[11]

**Metanogeneze** – V této poslední fázi acetotrofní metanogenní bakterie rozkládají hlavně kyselinu octovou na metan a oxid uhličitý, hydrogenotrofní bakterie zase produkují metan z vodíku a oxidu uhličitého. Vyskytují se tu i kmeny bakterií, které provádějí obojí. Acetotrofní metanogenní bakterie mají v procesu velmi důležitou úlohu, protože jejich působením vzniká více jak 2/3 metanu v bioplynu. Jsou schopny udržovat pH fermentačního média, protože odstraňují kyselinu octovou a produkují  $CO_2$ , ale ve srovnání s hydrogenotrofními metanogeny pomaleji rostou (generační doba několik dnů). Hydrogenotrofní metanogenní bakterie rostou poměrně rychle, jejich generační doba je cca 6 hodin. V anaerobním procesu tyto vodíkové metanogeny působí jako samoregulátor, který odstraňuje ze systému téměř všechny vodík. Tato fáze je ze všech čtyř nejpomalejší, probíhá asi pětkrát pomaleji. S ohledem na to je třeba přizpůsobit velikost a konstrukci fermentoru a jeho dávkování surovým materiálem.

Koncentrace vodíku v kapalně fázi při dobré činnosti hydrogenotrofních metanogenních bakterií by měla být minimální, akumulace vodíku v plynu je způsobena buď přetížením anaerobního reaktoru nebo nedostatkem těchto metanogenů. V rámci čtyř hlavních souborů biochemických reakcí - hydrolyzy, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze - je možno rozlišit minimálně devět různých metabolických fází procesu s odpovídajícími skupinami bakterií, které jsou vzájemně propojené svými specifickými substráty a produkty. [8],[11]

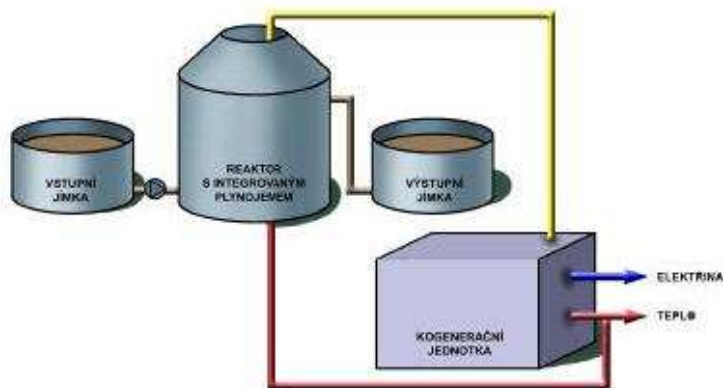
## 4. Metody fermentace

V praxi lze zpracování různých druhů substrátů rozdělit z hlediska obsahu sušiny, což přímo souvisí s tím, zda je substrát v pevném nebo kapalném stavu. Další rozdělení je z hlediska teploty, při níž se substrát zpracovává.

### 4.1. Mokrý fermentace

Je to nejpoužívanější způsob výroby bioplynu. Má širší uplatnění a je historicky a technologicky prověřená. Na druhou stranu vyžaduje složitější technologickou výbavu, jako jsou míchadla, čerpadla atd. To zvyšuje provozní náklady. Mokrý fermentace zpracovává substráty s obsahem sušiny menším než 12%. Pokud má substrát větší obsah sušiny, je na potřebný obsah naředěn. Mokrý anaerobní fermentace probíhá v uzavřených velkoobjemových nádobách. Využívá horizontálních nebo vertikálních reaktorů. Tyto nádoby jsou vyhřívány na danou teplotu a míchány.

V České republice je metoda mokré fermentace nejčastěji využívána v ČOV nebo v zemědělství. [3]



Obr.7 Princip mokré fermentace [3]

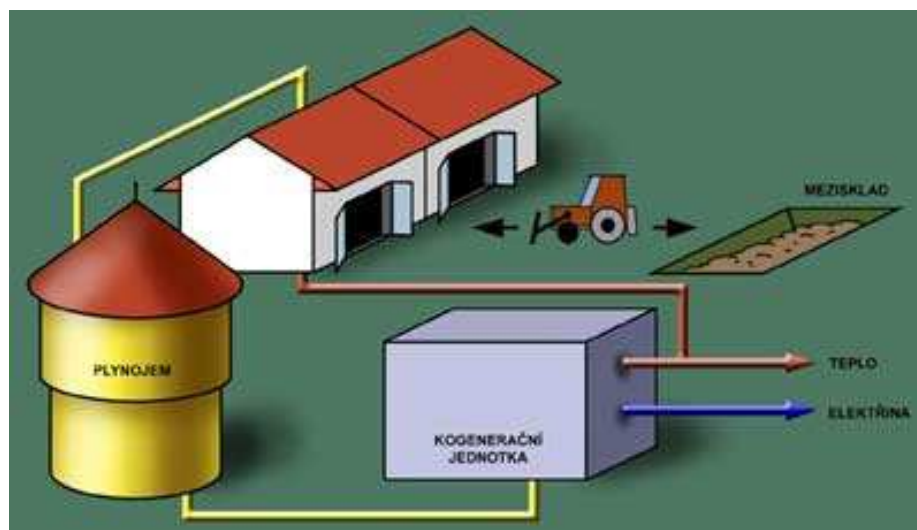
### 4.2. Suchá fermentace

Využívá se pro „nečerpateľné“ substráty s obsah sušiny 20% až 60%. Slouží většinou ke zpracování směsného zemědělského a komunálního odpadu. Není příliš používána. Využívá diskontinuální nebo kontinuální technologii.

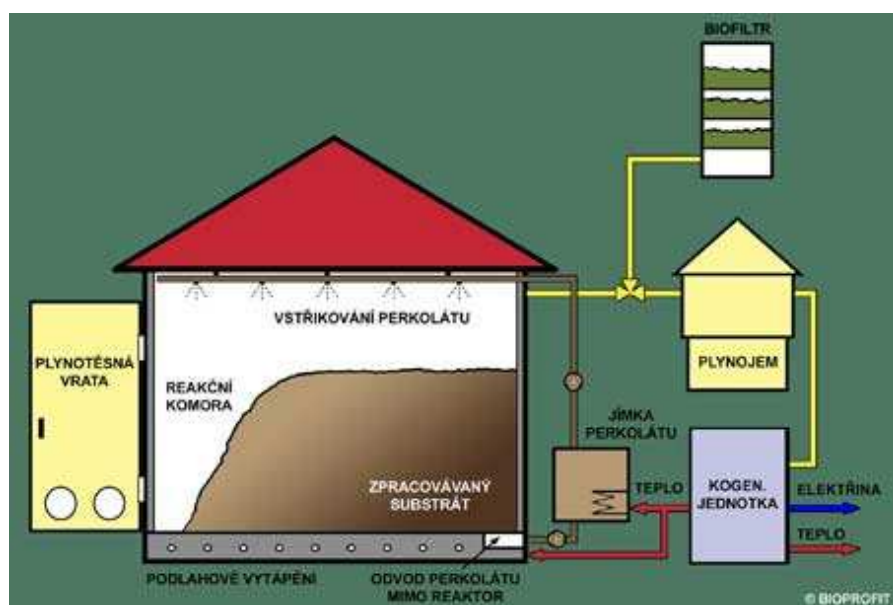
Diskontinuální technologie je využívána převážně v zemědělství na zpracování hnojů a jiného organického odpadu, který není možné zpracovat mokrou fermentací. Kontinuální technologie je velmi drahá a vyžaduje velkou investici a je doprovázena provozní náročností. Lze ji zpravidla využít pro zpracování komunálního a tříděného odpadu.

Příkladem suché fermentace je např. diskontinuální technologie BIOFREM. Využívá několika plynotěsných reakčních komor a mezisklad. Substrát bývá dopravován do komor zpravidla traktorem s radlicí. U tohoto typu fermentační technologie se pracovní cyklus stává z 3 dnů (naplnění reaktoru a nastartování reakce) + 24 – 27 dnů (vlastní reakce z následnou produkcí bioplynu).

U tohoto druhu stavby lze využít stávajících nevyužívaných zemědělských staveb, jako jsou seníky, kravíny atd. To dodává této technologii vysoké využití. [3],



Obr.8 Technologie BIOFREM [3]



Obr.9 Technologie BIOFREM [3]

### **4.3. Zařízení**

Podle způsobu dávkování substrátu do reaktoru můžeme proces dále rozlišit do následující tří technologií.

#### **4.3.1. Diskontinuální**

Dochází k přerušování provozu. Doba jednoho pracovního cyklu je stejná jako doba zdržení ve fermentoru. Celý obsah je vyměněn za nový. Tento způsob je na obsluhu velmi náročný a používá se především k suché fermentaci tuhých materiálů organického původu.

#### **4.3.2. Semikontinuální**

Během této technologie je doba mezi jednotlivými dávkami kratší, než je doba zdržení materiálu ve fermentoru. Tento způsob plnění patří k nejvíce používaným při zpracovávání tekutých materiálů organického původu. Tento postup umožňuje automatizaci technologického procesu.

#### **4.3.3. Kontinuální**

Kontinuální se používá při plnění fermentorů, které zpracovávají organický materiál s velmi malým obsahem sušiny. [11]

## 5. Faktory ovlivňující anaerobní proces

Anaerobní proces je ovlivňován množstvím různých faktorů. Ty nám ovlivňují prostředí mikroorganismů a je na ně třeba dbát již při konstrukci bioplynového reaktoru.

### 5.1. Vliv teploty

V technické praxi se pro anaerobní technologie nejčastěji používají teploty od 35 do 70°C. Toto rozmezí se dá rozložit na mezofilní a termofilní.

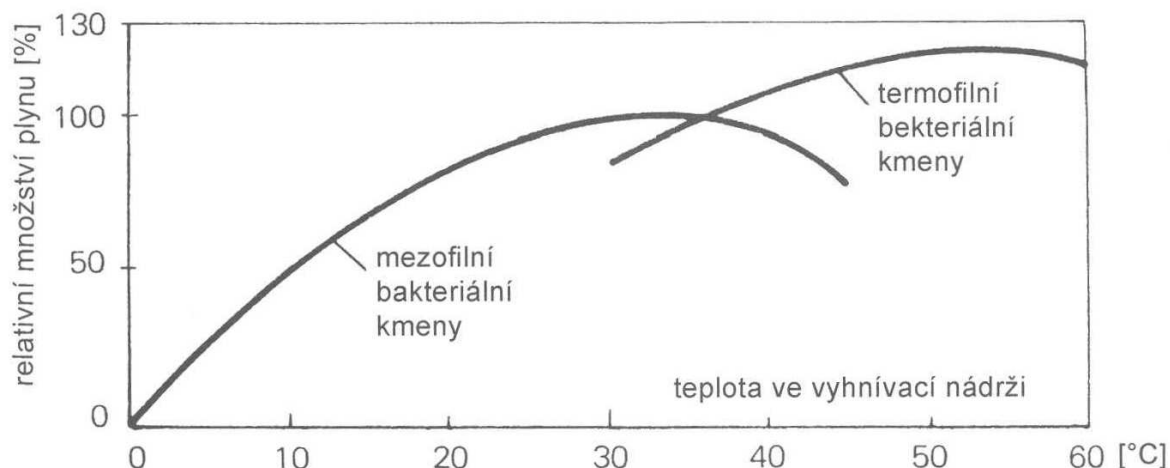
**Mezofilní proces** - probíhá za teplot 35 až 40°C. A využívá mezofilních mikroorganismů. Používá se tam, kde se zpracovává hygienicky nezávadný substrát. Neprovází ho příliš velké náklady na ohřev substrátu. Mezofilní zpracování substrátu je využitelné například při zpracování prasečí kejdy v zemědělství.

**Termofilní proces** - probíhá okolo teploty 55°C. Provoz při této teplotě je spojen s vyššími náklady na ohřev. Vysoká teplota nám ale zaručuje ničení choroboplodných zárodků a tím dochází k hygienizaci daného substrátu. To je zvláště zapotřebí při zpracování kalu na ČOV a jiných zdrojích znečištění jako třeba odpadu z jatek.

S nárůstem teploty roste rychlost všech chemických a biologických reakcí. Většina mikroorganismů potřebuje ke svému růstu vodní prostředí. Proto je za dolní limit považována teplota 0°C. Horní hraniční teplota růstu mikroorganismu závisí na teplotě, kdy dojde k rozložení jejich bílkovin. Extrémně nízké nebo vysoké teploty nejsou pro běžnou technickou praxi důležité. Běžně se pohybujeme v teplotách od 20 do 70°C. Termofilní mikroorganismy mají oproti mezofilním výhodu rychlejšího růstu (2 až 3 vyšší). Další nesporná výhoda je pak ničení choroboplodných zárodků a tím dochází k hygienizaci. Termofilní proces také dosahuje vyšší účinnosti zpracovávaného substrátu a tím i vyšší produkci bioplynu. Přesto nutně neplatí, že čím vyšší teplota tím lépe. Anaerobní proces při vyšších teplotách s sebou nese riziko citlivosti bakterií na teplotní výkyvy. Proto je u vyšších teplot nutná dlouhodobá adaptace při přechodu na jinou teplotu. Dále pak také vyšší náklady na vytápění reaktoru, případně na jeho izolaci. [1], [2]

| teplota °C           | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|----------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| psychofilní          |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| tolerantní mezofily  |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| mezofilní            |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| tolerantní termofily |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| termofilní           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| extrémní termofily   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Tab.4 Teplotní rozdělení mikroorganismů. [1]



Obr.10 Vliv teploty na dosažitelné množství plynu ve vztahu k hodnotě dosažené při optimálních teplotních poměrech [13]

## 5.2. Vliv pH

Vliv hodnoty pH je největší během poslední fáze na metanogenní bakterie. Ty vyžadují neutrální pH, tedy oblast mezi 6,5 – 7,5. Pokud se dostane pH pod 6 nebo nad 8, je činnost mikroorganismu silně utlumena. U některého substrátu jako je kejda nebo hnůj se pH upraví samovolně během druhé fáze, kdy se ve směsi tvoří amoniak. Nejčastějším důvodem poklesu pH je přetížení reaktoru. Dochází ke kumulaci kyselin, rychlejší mikroorganismy vytváří kyseliny a systém je nestačí spotřebovávat. Předchází se tomu řízením zatížení podle množství a složení mastných kyselin v médiu. Zhroucení celého procesu lze také zabránit udržováním dostatečné neutralizační kapacity přidáním alkalizačních činidel. [1]

## 5.3. Přítomnost toxických a inhibujících látek

Tyto látky nám nepříznivě působí na biologický proces. Nejčastěji se setkáváme s utlumujícími účinky amoniaku a nižších mastných kyselin. Jejich tvorba je závislá na pH procesu. [1]

## 6. Výtěžnost bioplynu

Substrát pro výrobu bioplynu je organická hmota rostlinného nebo živočišného původu a při jeho efektivním a ekologickém zpracováním nedochází k významným negativním vlivům na životní prostředí.

Zdroje pro výrobu bioplynu lze rozdělit na dvě základní skupiny. Jsou to zdroje odpadní a účelně pěstované. Odpadní zdroje pro výrobu bioplynu lze dále rozdělit na zvířecí exkrementy, jako jsou různé hnoje a kejdy, rostlinné odpady což jsou různé druhy slámy, sečené trávy či zbytky natí. Dalším odpadním zdrojem jsou substráty produkované lidmi. Jsou to převážně kaly z ČOV a organická složka komunálního odpadu. Pro účelně pěstovanou biomasu se využívá rychle rostoucích dřevin a rostlin.

Celý proces tvorby bioplynu je velmi složitý a je závislý na mnoha faktorech. Kolik metanu ze zpracovávaného materiálu získáme, bude ovlivněno těmito třemi faktory:

- chemické složení a chemické struktura daného materiálu
- biologická rozložitelnost zpracovávaného materiálu
- technologické podmínky procesu jako jsou teplota, pH, zatížení, doba zdržení, míchání, přítomnost toxických nebo inhibujících látek, uspořádání fermentace a dalších.

Produkce bioplynu z jednotlivých druhů substrátů se značně liší. Představu o různých výtěžcích bioplynu nám poskytuje následující tabulka. [14]

| Typ substrátu         | Substrát                                    | Výtěžek metanu<br>[ m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg VL] |
|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Zvířecí<br>exkrementy | hovězí hnůj                                 | 0,13                                                        |
|                       | hovězí hnůj + sláma                         | 0,09                                                        |
|                       | prasečí kejda                               | 0,28 – 0,48                                                 |
|                       | kuřecí trus                                 | 0,2                                                         |
|                       | prasečí kejda + kal ČOV                     | 0,30 – 0,40                                                 |
| Odpady                | kal z ČOV                                   | 0,28                                                        |
|                       | biodegradabilní frakce TKO                  | 0,12                                                        |
| Rostlinné<br>odpady   | kukuřice řezaná celá                        | 0,4                                                         |
|                       | kukuřičná nať                               | 0,18                                                        |
|                       | kukuřičná siláž                             | 0,37                                                        |
|                       | pšeničná sláma                              | 0,2                                                         |
|                       | ječná sláma                                 | 0,15                                                        |
|                       | ovesná sláma                                | 0,17                                                        |
|                       | tráva čerstvě sečená                        | 0,31                                                        |
|                       | nať z cukrové řepy                          | 0,24                                                        |
|                       | nať z brambor                               | 0,31                                                        |
|                       | jetel sečený                                | 0,26                                                        |
|                       | stébla trávy a staré seno                   | 0,19                                                        |
| Biomasa               | vodní hyacint                               | 0,14                                                        |
|                       | směs zel. kukuřice, brambory, kapusta, oves | 0,3                                                         |
|                       | prutová biomasa                             | 0,16                                                        |
|                       | dřevní biomasa                              | 0,18 – 0,28                                                 |

Tab.5 Výtěžnost metanu z různých typů substrátu [1]

## 6.1. Využití anaerobní technologie

### 6.1.1. Odpady z jatek a kafilerií

Odpadní materiál z jatek a kafilerií se obvykle zpracovává na kafilérský tuk a masokostní moučku. Zpracováním kafilérského tuku není problém, díky své vysoké výhřevnosti 37 MJ/kg ho lze lehce spalovat. Masokostní moučka byla dříve využívána jako doplňkové krmivo pro hospodářská zvířata, ale s narůstajícím strachem z propuknutí nemoci BSE se od tohoto řešení odpouští. Hledá se proto nový způsob naložení s tímto odpadem. Jednou z možností je i anaerobní fermentace, protože masokostní moučku tvoří převážně tuky a bílkoviny.

Při přímém využití jatečních odpadů bez předešlého kafilerního zpracování je nutné, aby bioplynová stanice byla vybavena hygienizační jednotkou. [14]

### 6.1.2. Zemědělské organické odpady a rostlinné materiály

Nakládání s exkrementy hospodářských zvířat za pomoci anaerobní fermentace patří mezi klasické aplikace této technologie. V bezstelivových provozech vzniká odpad, který je vhodný pro mokrou fermentaci a jeho zpracování je podobné jako na čistírnách odpadních vod. Rozdíl nastává ve vysoké koncentraci amoniaku ve fermentačním médiu. V bioplynu z prasečí kejdy je zase větší koncentrace sulfanu. Řešení spočívá ve kofermentaci s rostlinnou biomasou, která má malý obsah dusíku a síry. Přidaná rostlinná složka zajistí optimální poměr C : N. Nevýhodou je menší výtěžnost bioplynu z důvodu nízké účinnosti anaerobní fermentace rostlinného materiálu. To se zrcadlí v nutnosti velkoobjemových reaktorů, které jsou energeticky náročné a snižují ekonomickou rentabilitu. Slibně se rozvíjejícím technologickým řešením anaerobního rozkladu rostlinné biomasy jsou dvoustupňové systémy. Princip spočívá v oddělení hydrolyzační resp. acidogenní fáze od fáze metanogenní. Tím, že jsou fáze odděleny, je snadnější dosažení optimálních podmínek, což má za následek dosažení větší intenzity a účinnosti procesu. Dalšího zvýšení produkce je také dosaženo mechanickou dezintegrací. [14]

### 6.1.3. Biologicky rozložitelný komunální odpad

Každý komunální odpad obsahuje organickou složku. Ta má za následek zahňívání, zapáchá a ztěžuje manipulaci. Doposud se komunální odpad navážel na skládky, ale v budoucnu by se z důvodu hledání opatření na snížení obsahu organické složky měla tato část separovat. To by se provádělo buď zavedením kontejnerů pro organické zbytky, nebo vytříděním ve zpracovatelských závodech.

V evropských státech by mohla tato složka komunálního odpadu dosahovat od 35 do 75%, což je značná část. Do budoucna se předpokládá, že Česká republika vyprodukuje asi 5,1 miliónů tun komunálního odpadu s 60% obsahem biologicky rozložitelné frakce. Toto obrovské množství substrátu se dá použít pro bioplynové stanice a jednalo by se tak o stálý zdroj. Jeho zpracováním by se získalo velké množství energie, skládky by byly šetrnější k životnímu prostředí a snížil by se jejich objem.

Postupem času bude narůstat tlak na zvýšení kapacity anaerobní technologie pro zpracování komunálního odpadu. Bude tu snaha o naplňování Evropské direktivy, která počítá se snížením skládkované organické hmoty. Možností, jak zpracovat organickou složku komunálního odpadu, se nabízí několik. Jedná se o suchou fermentaci vytríděné části nebo

mokrou fermentaci již separovaného komunálního odpadu, který ještě obsahuje množství organického materiálu (40 – 70 % mokré váhy). Další možností je kofermentace sbíraných organických odpadů s čistírenskými kaly v anaerobních stabilizačních nádržích. [14]

#### 6.1.4. Výroba biopaliv

Perspektivní možnost uplatnění anaerobní technologie nastává při výrobě biopaliv. Z rostoucí poptávkou po ekologických palivech bude toto odvětví výrazně růst. V případě výroby bioetanolu jde o podobný proces jaký při výrobě v lihovaru, jen je tu množství zpracovávaného materiálu mnohonásobně větší. Denně se tu přetváří stovky až tisíce tun obilí. Z tohoto kvanta vznikne také adekvátní množství organického odpadu. Jde o tak velké objemy, že se záводу vyplatí pořídit vlastní bioplynovou stanici.

Dalším biopalivem je bionafta. Ta se vyrábí z olejů a tuků, nejčastěji rostlinného původu. Jako vedlejší produkt (až 10% vyrobené bionafty) je získána glycerolová fáze, jejíž hlavní složkou je glycerin. V současné době je tento produkt považován za vysoce koncentrovaný organický odpad. Tento odpad je velmi dobře rozložitelný, a tudíž je to vhodná surovina pro anaerobní technologii. [14]

### 6.2. Vliv kvality suroviny na výtěžnost bioplynu

Výtěžnost bioplynu ze směsných organických materiálů závisí na biologické rozložitelnosti, tedy na obsahu sacharidů, tuků, proteinů, na obsahu celulózy, hemicelulózy, ligninu a na poměru těchto jednotlivých složek. Tento poměr je v každé surovině jiný a to způsobí odlišnou následnou produkci metanu. Jak rychle a důkladně probíhá biologický rozklad ovlivňuje mimo druhu zpracovávaného materiálu i jeho chemická a fyzikální struktura. Svůj vliv má také vhodné složení anaerobní mikrobiální kultury.

Ve skutečnosti se ne všechny organické látky přítomné v surovině v průběhu anaerobní fermentace rozloží, vždy jich ve výstupním materiálu část zůstane jako stabilizovaný organický zbytek. Jak velký tento podíl bude závisí zejména na přítomnosti obtížně rozložitelných látek jako jsou celulózy. Množství nerozložené organické části je také ovlivněno technologickými podmínkami, hlavně teplotou, předúpravou a dobou zdržení ve fermentoru.

Pokud je naší prioritou výroba energie, je pro nás znalost složení zpracovávaného materiálu a výtěžnosti metanu z této suroviny nezbytná pro určení její vhodnosti pro anaerobní fermentaci. [14]

Hlavní technologické parametry, kterými posuzujeme vhodnost dané suroviny, jsou:

- koncentrace celkové sušiny
- obsah organických látek v sušině
- celkový obsah dusíku
- CHSK homogenizovaného vzorku
- obsah organického uhlíku
- výtěžnost metanu nebo bioplynu (zjištěno během laboratorního testu).

Hlavní význam mají první tři parametry, které jsou nezbytné pro návrh zpracování dané suroviny. Zbývající parametry jsou pomocné a umožňují nám stanovit teoretickou i skutečnou výtěžnost metanu nebo bioplynu. CHSK umožní dále provádět bilanci tvorby metanu.

Důležitý pojem je tzv. specifická produkce, která je měřítkem biologické rozložitelnosti a také určuje výtěžnost metanu. Je definovaná jako množství metanu nebo bioplynu vyprodukovaného za daných technologických podmínek z hmotnostní jednotky sušiny nebo organické sušiny zpracovávaného materiálu. Během již ustáleného provozu, kdy víme, že máme stabilním složení a koncentraci suroviny se využívá specifická produkce jako parametr pro kontrolu účinnosti procesu.

Výzkumy prokázaly, že správná předúprava zpracovávaného substrátu vede k větší kvalitě a účinnosti celého procesu. Proto se v současné době začíná předúprava daného materiálu stále více uplatňovat. [14]

Cílem tohoto procesu jsou:

- zajištění prohloubení biologické rozložitelnosti
- dosažení zvýšené produkce metanu (bioplynu)
- zmenšení množství stabilizovaného materiálu
- větší hygienizace stabilizovaného materiálu

Během všech metod pro zvyšování biochemické rozložitelnosti je kladen důraz na zpřístupnění materiálu k enzymovému rozkladu. Jednou z možností je zvětšení povrchu celého substrátu a tím i nárůstu plochy, na které mohou enzymy působit. Toho je dosaženo zmenšením velikosti částic zpracovávaného materiálu. Celý proces vyžaduje kapalné prostředí, proto je nutno převést organický materiál na roztok. Pro správný chod anaerobního procesu je také důležitý poměr C:N. Jelikož různé substráty mají různé koncentrace dusíku, lze dosáhnout rovnováhy těchto složek jejich kombinací. [14]

### 6.2.1. Mechanická dezintegrace

Patří mezi nejjednodušší možnosti. Jejím cílem je mechanické drcení materiálu za účelem dosažení jemnějších částic a zároveň dochází k homogenizaci substrátu. Během tohoto zpracování jsou přítomny mikroorganismy a dochází k narušení jejich buněčné struktury. Uvnitř těchto buněk jsou enzymy, které dále napomáhají rozkladu. Účinnost mechanické dezintegrace závisí na vynaložené energii a použité technice. Nejčastěji jsou používány různé varianty drtičů a mlýnů. [14]



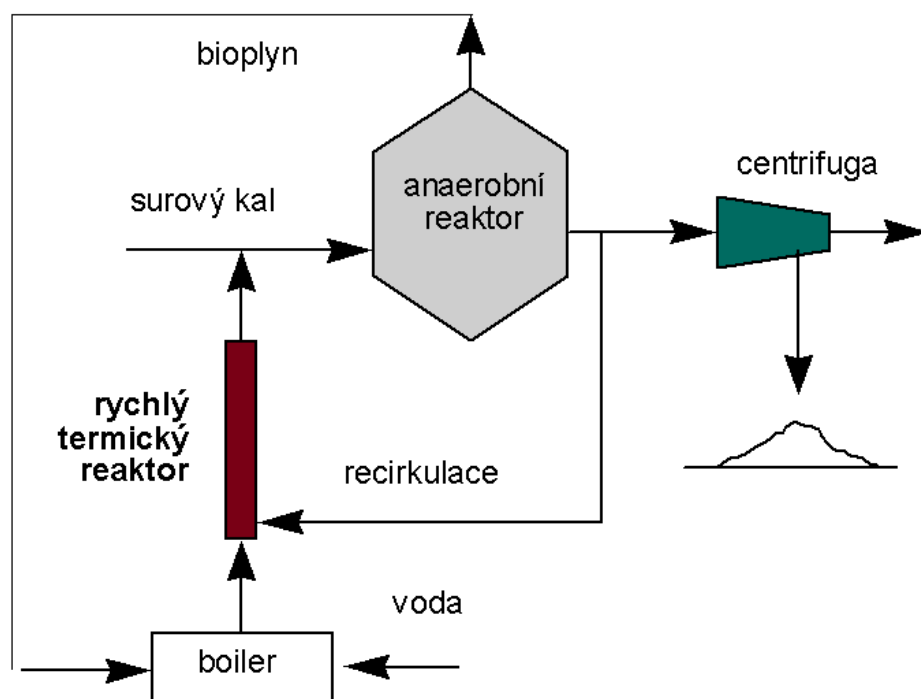
Obr.11 Drtič substrátu. [8]

### 6.2.2. Termická předúprava

V současnosti se termická předúprava, neboli hygienizační stupeň, zavádí pro zpracování materiálů, jako jsou vedlejší živočišné produkty (nevhodných k lidské spotřebě) nebo produkty gastronomie. Dle typu materiálu je pak aplikována buď pasterizace nebo hygienizace s vyšší teplotou.

Pasterizace je tepelná úprava při 70°C s dobou zdržení 1 hodina, hygienizace je úprava při alespoň 130°C po dobu minimálně 1 hodiny. Hygienizace musí probíhat v uzavřeném prostoru, protože je velkým zdrojem zápachu.

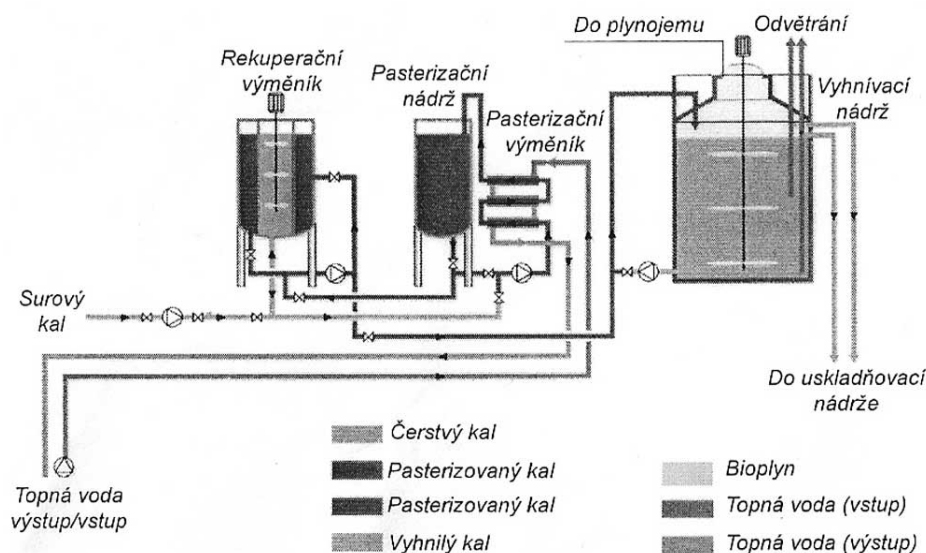
Tepelná předúprava není jenom hygienizační stupeň, ale také výrazně zvyšuje produkci bioplynu z daného materiálu destrukcí jeho složek. Zpracovávaná surovina se zahřeje na vysokou teplotu (130 –180°C) po určitou dobu (1 až 30 min.), poté se vzniklý vysoký tlak rychle uvolní, čímž dojde k další destrukci kavitací. Termickou úpravou suroviny dochází k hydrolýze tuhých buněčných komponent. Vysoká teplota naruší buňky a způsobí hydrolýzu proteinů, sacharidů, tuků a dalších makromolekul vylučovaných z buňky. Působením vysoké teploty se však mohou rozpouštět, popř. mohou vznikat sloučeniny, které nejsou biologicky rozložitelné. Termická předúprava byla rozpracovaná pro čistírenské kaly (metoda CAMBI, u nás metoda RTR),. [14]



Obr.12 Termická kondicionace biomasy (RTR) [7]

**Substráty vhodné k pasterizaci:**

- zbytky z jídelen a vývařoven
- kaly z ČOV
- odpadní voda a splachy
- biologicky rozložitelné odpady
- průmyslové a městské odpady



Obr.13 Schéma pasterizační jednotky [15]

**6.2.3. Chemická předúprava**

Chemická předúprava zahrnuje alkalickou nebo kyselou hydrolýzu a použití oxidačních činidel a to samostatně, ve vzájemné kombinaci nebo v kombinaci s vyšší teplotou. Rozklad kyselinami a louhy – chemickou hydrolýzu - lze realizovat v podstatě v celém rozsahu pH. V kyselém prostředí kyseliny chlorovodíkové při pH 6 proběhne hydrolýza během 6 až 12 hodin. V zásadité oblasti pH 11,5 - 12,5 dochází k hydrolýze během 20 až 30 minut. Tuto metodu lze aplikovat zejména na materiály obsahující celulózu, ale byla aplikována i na čistírenské kaly. Termochemickou předpravou statkového hnoje – zahřátí na 120 °C za přítomnosti CaO 4 % na sušinu, bylo dosaženo zvýšení produkce metanu o 64 %. [14]

**6.2.4. Biologické metody předúpravy**

Tato metoda zahrnuje přidávání různých enzymů ke zlepšení anaerobního rozkladu. Nejlepších výsledků při využívání enzymů se dosahuje zejména u materiálů s vysokým obsahem lignocelulóznych složek.

Za biologickou předúpravu lze považovat i silážování rostlinné biomasy. Během silážování travní hmoty dochází k velkému úbytku organických složek a to až 30 % za 6 měsíců. Tím patřičně klesne i produkce metanu. Pokud ale při silážování těžší suroviny přidáme kyselinu mravenčí, dosáhneme zvýšení produkce metanu o 13 - 22 % vztaženo na původní organickou sušinu oproti produkci z čerstvého materiálu. Po porovnání produkce metanu z čerstvého materiálu, dosáhneme přidáním tohoto enzymu zvýšení produkce o 47-86 % oproti produkci materiálu silážovanému po stejnou dobu ale bez aditiva. [14]

## 7. Výpočet teoretické výtěžnosti metanu

Výpočet je zaměřen na produkci elektrické energie z kogeneračních jednotek. Hodnoty účinnosti daného typu kogenerační jednotky byly zjištěny na internetových stránkách výrobce. Informace o bioplynu a SSK byly poskytnuty provozovateli ČOV. Hodnota specifické produkce byla převzata z [16].

### Výchozí podklady:

#### Směsný surový kal (SSK):

Objem přivedeného SSK:  $V_{d\ SSK} = 730\ \text{m}^3/\text{d}$

Obsah sušiny: 4,88 %

Organický podíl v sušině: 63%

$\rho_{SSK} = 1020\ \text{kg}/\text{m}^3$

#### Bioplyn:

Složení [obj.%]:  $\text{CH}_4 - 63,41$ ;  $\text{CO}_2 - 36,4$ ;  $\text{N}_2 - 0,20$ ;  $\text{O}_2 - 0,5$

Specifická produkce:  $V_{\text{spec}} = 0,6\ \text{m}^3/\text{kg}$  přivedených organických látek [16]

$Q_{\text{CH}_4} = 34,3\ \text{MJ}/\text{m}^3$

#### Účinnost:

Celková účinnost KJ:  $\eta_c = 86\ \%$

Celková účinnost KJ:  $\eta_t = 51\ \%$

Celková účinnost KJ:  $\eta_e = 35\ \%$

### Výpočty vztažené na denní množství:

#### Produkce sušiny SSK:

$m_{d\ S\dot{S}} = V_{d\ SSK} \cdot \rho_{SSK} \cdot 0,0488 = 730 \cdot 1020 \cdot 0,0488 = 36336,48\ \text{kg}/\text{d} = 36,34\ \text{t}/\text{d}$

#### Produkce bioplynu:

$V_{d\ BP} = m_{d\ S\dot{S}} \cdot V_{\text{spec}} \cdot 0,63 = 36336,48 \cdot 0,6 \cdot 0,63 = 13735,2\ \text{m}^3/\text{d}$

#### Výhřevnost bioplynu:

$Q_n = Q_{\text{CH}_4} \cdot 0,6341 = 34,3 \cdot 0,6341 = 21,75\ \text{MJ}/\text{m}^3$

#### Výroba tepelné energie:

$E_{dB, \text{tep}} = E_{1B, \text{tep}} \cdot V_{d\ BP} = 1,16 \cdot 36,34 = 42,15\ \text{MWh}$

#### Výroba elektrické energie:

$E_{1B, \text{el}} = E_{1B, \text{el}} \cdot V_{d\ BP} = 0,8 \cdot 36,34 = 29\ \text{MWh}$

**Výpočet vztažený na 1 t sušiny SSK:**Množství bioplynu:

$$V_{1B} = 1000 \cdot V_{\text{spec}} \cdot 0,63 = 1000 \cdot 0,6 \cdot 0,63 = 378 \text{ m}^3$$

Energetický obsah bioplynu:

$$Q_{1B} = V_{1B} \cdot Q_n = 378 \cdot 21,75 = 8221,5 \text{ MJ} = 2,28 \text{ MWh}$$

Výroba tepelné energie:

$$E_{1B, \text{tep}} = Q_{1B} \cdot \eta_t = 2,28 \cdot 0,51 = 1,16 \text{ MWh}$$

Výroba elektrické energie:

$$E_{1B, \text{el}} = Q_{1B} \cdot \eta_e = 2,28 \cdot 0,35 = 0,8 \text{ MWh}$$

## 8. Závěr

Cílem bakalářské práce byla rešerše na téma „Výtěžnost bioplynu z různých druhů substrátů.“ V úvodní části je popsán vznik bioplynu, jeho využití a základní složení bioplynu, včetně popisu jednotlivých složek. Podrobněji je popsána samotná anaerobní fermentace, jednotlivé fáze procesu, nejpoužívanější anaerobní technologie a jejich praktické aplikace.

Hlavní částí práce byl popis a seznámení s celkovou výtěžností bioplynu v závislosti na zvoleném substrátu, na mechanické, tepelné, chemické a biologické předúpravě substrátu, kvalitě suroviny a podmínkách anaerobní fermentace, jakými jsou především teplota a pH.

Součástí bakalářské práce je i jednoduchý výpočet zaměřený na produkci elektrické energie z kogeneračních jednotek. Pro tento výpočet byl jako substrát zvolen směsný surový kal z ČOV Modřice.

## 9. Seznam použité literatury

- [1] Straka, F a kol.: Bioplyn 1. vyd. GAS s.r.o., Říčany 2003. ISBN 80-7328-029-9
- [2] Dohányos, M a kol.: Anaerobní čistírenské technologie 1.vyd. NOEL 2000 s.r.o. Brno 1998, ISBN 80-86020-19-3
- [3] Stránky společnosti Bioprofit, dostupné na <http://www.bioplyn.cz/>
- [4] Stránky společnosti Energ, spol.s.r.o., dostupné na <http://www.energ.cz/>
- [5] Stránky internetové encyklopedie, dostupné na [http:// www.wikipedia.cz/](http://www.wikipedia.cz/)
- [6] Článek ze stránky zabývající se ekologií a biopalivy, dostupné na <http://biom.cz/clanky.stm?x=148446>
- [7] Článek ze stránky zabývající se ekologií a biopalivy, dostupné na <http://biom.cz/clanky.stm?x=1888405>
- [8] Článek ze stránky zabývající se ekologií a biopalivy, dostupné na <http://biom.cz/clanky.stm?x=109428>
- [9] Žídek, J.: Anaerobní digesce zvolených substrátů na laboratorním fermentoru, dostupné na [http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa\\_iii/papers/08-Zidek.pdf](http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iii/papers/08-Zidek.pdf)
- [10] SOVAK časopis odboru vodovodů a kanalizací, číslo 11/2005, dostupné na <http://www.sovak.cz/>
- [11] Dohányos, M a Šmejkalová, P.: Biotechnologie v ochraně životního prostředí, dostupné na <http://www.vscht.cz/tvp/>
- [12] Desatero bioplynových stanic, dostupné na <http://www.mze.cz/>
- [13] Michal,P.: Bioplyn – energie ze zemědělství, dostupné na <http://www.agronavigator.cz>
- [14] Zábranská,J.: Možnosti anaerobního zpracování odpadů
- [15] Stránky společnosti EKOMVO s.r.o. zabývající se ČOV dostupné na <http://www.ekomvo.cz>
- [16] Dohányos, M a kol.(2003): Porovnání energetické bilance spalování kalů a anaerobní stabilizace, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, Brno