



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

# VLIV DEZINTEGRACE VSTUPNÍHO MATERIÁLU NA PRODUKCI METHANU PŘI ANAEROBNÍ FERMENTACI

THE INFLUENCE OF DISINTEGRATION OF THE INPUT MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF  
METHANE BY ANAEROBIC FERMENTATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL HERMAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUCIE HOUDKOVÁ, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2011/12

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Pavel Herman

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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 diplomové práce:

**Vliv dezintegrace vstupního materiálu na produkci methanu při anaerobní fermentaci**

v anglickém jazyce:

**The influence of disintegration of the input material for the production of methane by anaerobic fermentation**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést úvodní rešerši v oblasti nakládání s biodegradabilními odpady. Prostudovat legislativu související s tématem práce, prostudovat principy anaerobního rozkladu organických materiálů a na základě těchto získaných znalostí provést praktická měření. Bude sledována produkce methanu při anaerobní fermentaci při různých stupních dezintegrace vstupního materiálu.

Cíle diplomové práce:

Prokázání vlivu dezintegrace vstupního materiálu na zvýšení produkce methanu při anaerobní fermentaci.

Seznam odborné literatury:

Štraka, F.: Bioplyn. 1. vyd. Říčany: GAS, 2003. 517 s. ISBN 80-7328-029-9.

Dohányos, M. a kol.: Anaerobní čistírenské technologie. 1. vyd. Brno: NOEL 2000, 1998. 341 s. ISBN 80-86020-19-3.

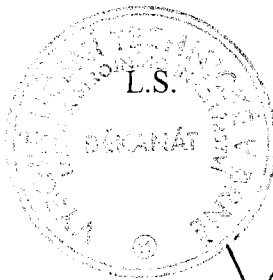
Sirotková, D.: Legislativa biologicky rozložitelných odpadů. Biom.cz, 28.4.2006,  
<http://biom.cz/index.shtml?x=1828921>

Šťastný V., Pospíšilová E., Schönbaurová L.: Vliv aplikace rozdrčených organických odpadů z domácností na provoz a funkci domovních čistíren odpadních vod, SOVAK 2/2008, 46-48, ISSN 1210-3039

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lucie Houdková, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 16.11.2010



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá vlivem dezintegrace pivovarského mláta na produkci bioplynu při anaerobní fermentaci. Úvodní část nás seznamuje s problematikou biologicky rozložitelných odpadů. Je zde uvedena jejich charakteristika, způsoby nakládání s nimi a legislativní omezení s nimi spojená. V dalších částech je podrobně popsána samotná anaerobní fermentace, včetně charakteristiky bioplynu, dále pak problematika dezintegrace při fermentaci včetně výčtu a popisu některých dezintegračních metod. Hlavní část práce tvoří popis provedených experimentů, na kterých je sledován přírůstek množství bioplynu v závislosti na dezintegraci mláta a následně také vyhodnocení daných experimentů včetně výpočtu ekonomiky samotné dezintegrace v laboratorních podmínkách.

## **Klíčová slova**

Dezintegrace, fermentace, mláto, bioplyn, produkce

## **Abstract**

This master's thesis deals with the influence of disintegration of brewer's grains for the production of biogas by anaerobic fermentation. The first part introduces us with the issue of biodegradable wastes. There are given their characteristics, ways of handling with them and legislative restrictions associated with them. In other sections there is a detailed description of anaerobic fermentation itself, including characteristics of biogas. Then there is issue of disintegration during fermentation including a list and characteristic of some disintegration methods. The main part of the thesis consists of description of the experiments on which it is observed increment of biogas based on the disintegration of brewer's grains and the evaluation of the individual experiments including the calculation of economic of the disintegration in laboratory conditions.

## **Key words**

Disintegration, fermentation, brewer's grains, biogas, production

## **Bibliografická citace**

HERMAN, P. *Vliv dezintegrace vstupního materiálu na produkci methanu při anaerobní fermentaci*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková, Ph.D.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro psaní diplomové práce, a že jsem svou práci „Vliv dezintegrace vstupního materiálu na produkci methanu při anaerobní fermentaci“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce slečny Ing. Lucie Houdkové, Ph.D. s použitím odborných zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 24. května 2012

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Lucii Houdkové, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady při tvorbě této práce. Zároveň bych jí rád poděkoval za obětavé zajišťování materiálu na pokusy. Díky patří také mým rodičům a dále pak všem, kteří mě při studiu podporovali.

## Obsah

Seznam použitých symbolů.....	9
Seznam použitých zkratk.....	11
1 Úvod.....	12
2 Biodegradabilní odpady .....	13
2.1 Legislativa biologicky rozložitelných odpadů.....	13
2.1.1 Přehled platné právní úpravy ČR .....	13
2.1.2 Přehled předpisů EU.....	15
2.2 Produkce BRO.....	16
2.3 Nakládání s BRO.....	16
2.3.1 Prognóza nakládání s biodegradabilním odpadem v ČR.....	18
3 Anaerobní fermentace.....	20
3.1 Průběh anaerobního rozkladu .....	20
3.1.1 Přehled mikroorganismů anaerobního rozkladu.....	21
3.2 Porovnání anaerobních a aerobních procesů .....	22
3.3 Faktory ovlivňující anaerobní fermentaci.....	23
3.3.1 Vliv teploty.....	23
3.3.2 Vliv pH.....	23
3.3.3 Vliv přítomnosti nutrientů .....	23
3.3.4 Vliv přítomnosti toxických a inhibujících látek .....	24
3.3.5 Vliv technologických faktorů .....	24
3.4 Ekologičnost anaerobních procesů .....	24
3.5 Bioplyn .....	25
3.5.1 Složení a vlastnosti bioplynu.....	25
3.5.2 Výtěžnost bioplynu.....	26
3.5.3 Úprava a čištění bioplynu.....	27
3.5.4 Využití bioplynu.....	28
4 Dezintegrace.....	30
4.1 Význam dezintegrace .....	30
4.2 Stupeň dezintegrace.....	30
4.3 Dezintegrační metody.....	31
4.3.1 Mechanické metody.....	31
4.3.2 Chemické metody.....	33
4.3.3 Fyzikální metody .....	34
4.3.4 Biotechnologické metody .....	37
4.3.5 Porovnání dezintegračních metod .....	38
5 Praktická část.....	39
5.1 Vlastnosti použitých materiálů .....	39
5.1.1 Stanovení podílu sušiny v materiálu a ztráty žíháním.....	39
5.1.2 Sítová analýza.....	40
5.1.3 Výpočet předpokládané produkce bioplynu .....	47
5.2 Popis aparatury .....	48
5.3 Popis experimentu .....	49
5.4 Naměřené stavy bioplynu při jednotlivých experimentech .....	50
5.4.1 Fermentace surového mláta.....	50
5.4.2 Fermentace mláta v prvním stupni dezintegrace .....	52
5.4.3 Fermentace mláta ve druhém stupni dezintegrace.....	54
5.5 Analýza složení plynu .....	56



5.6	Úbytek organických látek.....	57
5.6.1	Výpočet úbytku organických látek na výstupu z fermentoru.....	59
5.7	Diskuse výsledků.....	62
5.8	Účinnost dezintegrace.....	62
5.9	Ekonomika dezintegrace.....	66
5.9.1	Výpočet výnosů z prodeje energií.....	66
5.9.2	Výpočet nákladů na dezintegraci.....	68
6	Závěr.....	70
	Seznam příloh.....	75

## Seznam použitých symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
$Cena_E$	Výkupní cena elektrické energie	[Kč/MWh]
$Cena_{Ee}$	Cena elektrické energie	[Kč/Wh]
$Cena_T$	Výkupní cena tepla	[Kč/GJ]
$d_i$	Střední velikost částic	[mm]
$d_s$	Střední prosevní průměr částic	[mm]
$d_p$	Střední povrchový průměr částic	[mm]
$d_v$	Střední objemový průměr částic	[mm]
$CHSK_{Cr,rozp.ZPAK}$	CHSK <sub>Cr</sub> v kapalně fázi dezintegrovaného zahuštěného přebytečného aktivovaného kalu	[mg]
$CHSK_{Cr,rozp.PAK}$	CHSK <sub>Cr</sub> v kapalně fázi přebytečného aktivovaného kalu před dezintegrací	[mg]
$CHSK_{Cr,homogZPAK}$	CHSK <sub>Cr</sub> v homogenizovaném vzorku dezintegrovaného zahuštěného přebytečného aktivovaného kalu	[mg]
$Kal_{0IN}$	Hmotnost vsádky samotného kalu	[g]
$l_i$	Délka strany oka síta	[mm]
$LHV_{CH4}$	Výhřevnost metanu	[MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]
$LHV_{Biop}$	Výhřevnost bioplynu	[MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]
$m$	Celková hmotnost síťovaného materiálu	[g]
$m_i$	Hmotnost frakce	[g]
$m_{KalIN}$	Hmotnost vsádky kalu do fermentoru	[g]
$m_M$	Hmotnost vzorku vysušeného mláta	[kg]
$m_{mix}$	Hmotnost mláta v naplněném mixéru	[kg]
$m_{matIN}$	Celková hmotnost vsádky do fermentoru	[g]
$m_{MlátoIN}$	Hmotnost vsádky mláta do fermentoru	[g]
$m_{orgOUT}$	Hmotnost organiky ve vzorku na výstupu z fermentoru	[g]
$m_{orgM}$	Hmotnost organiky ve vsádce mláta	[g]
$m_{orgK}$	Hmotnost organiky ve vsádce kalu	[g]
$m_{orgIN}$	Celková hmotnost organiky ve vsádce fermentoru	[g]
$m_{náplně}$	Hmotnost jedné náplně ferm. obsahující 1kg suš. M	[kg/kg <sub>sušM</sub> ]
$m_{sušIN}$	Celková hmotnost sušiny ve vsádce fermentoru	[g]
$m_{sušK}$	Hmotnost sušiny ve vsádce kalu	[g]
$m_{sušKIN}$	Hmotnost sušiny ve vsádce samotného kalu	[g]
$m_{sušM}$	Hmotnost sušiny ve vsádce mláta	[g]
$m_{sušOUT}$	Hmotnost sušiny ve vzorku na výstupu z fermentoru	[g]
$m_{VodaIN}$	Hmotnost vsádky vody do fermentoru	[g]
$m_{vzOUT}$	Hmotnost odebraného vzorku na výstupu z fermentoru	[g]
$Náklady_{mix}$	Náklady na jedno mixování	[Kč]
$Náklady_{celk}$	Náklady na dezintegraci jedné náplně fermentoru	[Kč/kg <sub>sušM</sub> ]
$n_{mix}$	Počet mixování	[-]
$P_E^{KJ}$	Elektrický výkon	[J/kg <sub>sušM</sub> ]
$P_{mix}$	Příkon mixéru	[W]
$P_T^{KJ}$	Tepelný výkon	[J/kg <sub>sušM</sub> ]
$Q$	Energetický obsah paliva	[MJ/kg <sub>sušM</sub> ]
$Rozdíl$	Rozdíl výnosů z prodeje en. ze sur. a dezint. mláta	[Kč/kg <sub>sušM</sub> ]

$Rozdíl_{org}$	Rozdíl hodnot organiky na vstupu a na výstupu ferm.	$[\% suš]$
$Rozdíl_{suš}$	Rozdíl hodnot sušiny na vstupu a na výstupu ferm.	$[\%]$
$S_i$	Stupeň zdrobnění	$[-]$
$Suš_{IN}$	Obsah sušiny ve vstupním materiálu	$[\%]$
$Suš_K$	Průměrný obsah sušiny v kalu	$[\%]$
$Suš_{K0}$	Průměrné množství sušiny v daném kalu	$[\%]$
$Suš_M$	Průměrný obsah sušiny v mlátu	$[\%]$
$Suš_{OUT}$	Podíl sušiny ve směsi na výstupu z fermentoru	$[\%]$
$t_{mix}$	Doba mixování	$[s]$
$V$	Produkce bioplynu z daného substrátu	$[m^3 / kg_{sušM}]$
$V_{I.st}$	Průměrné množství plynu uvolněné ze mláta v I. stupni dezintegrace	$[dm^3 / kg_{sušM}]$
$V_{II.st}$	Průměrné množství plynu uvolněné ze mláta ve II. stupni dezintegrace	$[dm^3 / kg_{sušM}]$
$V_K$	Prům. množs. biopl. uvolněné z kalu při daném pokusu	$[ml]$
$V_{K0}$	Uvolněné množství bioplynu z kalu	$[ml]$
$V_{kgsušM}$	Prům. množs. biopl. uvol. z mláta při daném pokusu na 1 kg suš. mláta	$[dm^3 / kg_{sušM}]$
$V_M$	Prům. množs. biopl. uvol. z mláta při daném pokusu	$[ml]$
$V_{M+K}$	Prům. množství bioplynu uvolněné při daném pokusu	$[ml]$
$V_{mix}$	Objem mixovací nádoby	$[m^3]$
$V_{sur}$	Průměrné množství plynu uvolněné ze surového mláta	$[dm^3 / kg_{sušM}]$
$V_{vzMi}$	Objem vzorku vysušeného mláta	$[m^3]$
$Výt_{Celk}$	Celková teoretická výtěžnost bioplynu	$[ml]$
$Výnos_E$	Výnos z prodeje elektrické energie	$[Kč / kg_{sušM}]$
$Výnos_T$	Výnos z prodeje tepla	$[Kč / kg_{sušM}]$
$Výnos_{\Sigma}$	Celkový výnos z prodeje energií	$[Kč / kg_{sušM}]$
$Výt_K$	Teoretická výtěžnost bioplynu z kalu	$[ml]$
$Výt_M$	Teoretická výtěžnost bioplynu z mláta	$[ml]$
$Výt_{tabK}$	Tabulková výtěžnost bioplynu z kalu	$[m^3 / t suš]$
$Výt_{tabM}$	Tabulková výtěžnost bioplynu z mláta	$[m^3 / t suš]$
$w_i$	Hmotnostní zlomek frakce	$[-]$
$x_{CH_4}$	Obsah metanu v bioplynu	$[\%]$
$Zisk$	Zisk z prodeje energií po odečtení nákladů na dezint.	$[Kč / kg_{sušM}]$
$Zž_{IN}$	Ztráta žiháním materiálu na vstupu do fermentoru	$[\% suš]$
$Zž_K$	Ztráta žiháním u daného kalu	$[\% suš]$
$Zž_M$	Ztráta žiháním u daného mláta	$[\% suš]$
$Zž_{OUT}$	Ztráta žiháním směsi na výstupu z fermentoru	$[\% suš]$
$\eta_{I.st}$	Účinnost I. stupně dezintegrace mláta	$[\%]$
$\eta_{II.st}$	Účinnost II. stupně dezintegrace mláta	$[\%]$
$\eta_{sur}$	Účinnost dezintegrace surového mláta	$[\%]$
$\eta_E$	Účinnost výroby elektrické energie	$[\%]$
$\eta_T$	Účinnost výroby tepla	$[\%]$
$\rho_M$	Průměrná hustota mláta	$[kg / m^3]$
$\rho_S$	Sypná hustota mláta	$[kg / m^3]$

## Seznam použitých zkratk

<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>
<i>BRKO</i>	Biologicky rozložitelný komunální odpad
<i>BRO</i>	Biologicky rozložitelný odpad
<i>ČOV</i>	Čistírna odpadních vod
<i>ČR</i>	Česká republika
<i>ČSU</i>	Český statistický úřad
<i>EU</i>	Evropská unie
<i>CHSK</i>	Chemická spotřeba kyslíku
<i>ISOH</i>	Informační systém odpadového hospodářství
<i>PET</i>	Polyethylentereftalát
<i>POXČ</i>	Průměrné oxidační číslo
<i>TKO</i>	Tuhý komunální odpad

## 1 Úvod

V poslední době hýbe světem několik témat. Ať už je to neustále propíraná ekonomická krize, snižování zásob fosilních paliv a s tím spojené zdražování energií a nebo dnes tak moderní téma, ekologie.

V každé civilizované společnosti se také řeší otázka, kam s odpady. Obecně platí, že čím je společnost vyspělejší, tím více odpadů připadá ročně na jednoho člověka. Mezi tyto odpady patří samozřejmě i ty biologicky rozložitelné, které tvoří velmi významný podíl. Trendem poslední doby je biologicky rozložitelné odpady přestat ukládat na skládky, kde dochází k uvolňování skládkového plynu do atmosféry a tím k prohlubování skleníkového efektu a hledat nové způsoby jejich využití.

Z důvodů neustále se zmenšujících zásob fosilních paliv je třeba začít s postupným přechodem na jiné, alternativní zdroje energie, které by se daly neustále obnovovat. Vedle již známých slunečních elektráren, větrných elektráren, vodních elektráren a jiných zde již delší dobu existuje jeden u nás donedávna dost opomíjený zdroj. Je jím výroba elektrické energie z biologicky rozložitelných odpadů v bioplynových stanicích. Ty využívají bioodpad k tvorbě bioplynu, který je považován za ušlechtilý zdroj energie. Lze jej spalovat v kogeneračních jednotkách a vyrábět z něj elektrickou energii a teplo. Vyrobené energie pokryjí spotřebu samotné bioplynové stanice a třeba i přidruženého provozu a přebytky elektrické energie nebo tepla se prodají. Snižují taktéž ekologickou zátěž tím, že se do atmosféry neuvolňuje metan, jako by tomu bylo při skládkování bioodpadu, nýbrž je efektivně a ekonomicky využito. Taktéž materiál, který projde procesem anaerobní fermentace již nepředstavuje takové ekologické nebezpečí, naopak při splnění určitých podmínek je považován za hodnotné hnojivo.

Ne moc rozšířené je u bioplynových stanic použití dezintegrace nebo-li takzvané předúpravy materiálu před samotným vstupem do fermentoru. Ta by měla mít za následek zvýšení produkce bioplynu ze stejného množství biologicky rozložitelných odpadů. Vyžaduje samozřejmě dodatečné investice, které by se však při vhodném nastavení podmínek měly po určité době bohatě vyplatit.

Tato práce se pokusí několika experimenty a výpočty dát odpověď na to, zda se vyplatí vynakládat finanční prostředky na vlastní dezintegraci, to znamená, zda by případné přírůstky množství uvolněného bioplynu pokryly dodatečné náklady a mohly vést ke zlepšení profitu.

## 2 Biodegradabilní odpady

Biologicky rozložitelné odpady (BRO) jsou takové, které podléhají aerobnímu a anaerobnímu rozkladu. Tvoří je zejména odpady zemědělské (odpady z rostlinné i živočišné výroby), lesnické, potravinářské (pivovarské, lihovarnické, cukrovarnické, mlékárenské, masné aj.), papírensko-celulozářské, odpady ze zpracování dřeva, kůží, textilního průmyslu a odpady ze zeleně. Patří sem i biologicky rozložitelné komunální odpady, dále čistírenské a vodárenské kaly a biologicky rozložitelný obalový odpad.

Zaujímají hmotnostně i objemově velkou část všech odpadů. Vlivem jejich rozkladu na skládkách dochází k uvolňování skleníkových plynů nebo k případným škodlivým průsakům jejich kyselých výluhů hydrologickými procesy. Taktéž mohou obsahovat patogenní a podmíněně patogenní mikroorganismy a tím ohrožovat zdraví lidí a zvířat. Kvůli těmto důvodům je třeba skládkování biodegradabilních odpadů omezovat a hledat cesty pro jejich materiálové nebo energetické využití. [1][2]

### 2.1 Legislativa biologicky rozložitelných odpadů

#### 2.1.1 Přehled platné právní úpravy ČR

- Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí
- Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech
- Zákon č. 477/2001 Sb., o obalech
- Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení
- Vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady
- Vyhláška č. 381/2001 Sb., Katalog odpadů a další seznamy odpadů a států pro účely dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu a tranzitu odpadů
- Vyhláška č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě
- Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využití na povrchu terénu
- Nařízení vlády č. 197/2003 Sb., o Plánu odpadového hospodářství ČR

Rámec veškeré ochrany životního prostředí tvoří zákon o životním prostředí č. 17/1992 Sb. Biologicky rozložitelné odpady jsou definovány v zákoně o odpadech č. 185/2001 Sb. jako odpad podléhající anaerobnímu nebo aerobnímu rozkladu. Tento zákon taktéž upřednostňuje materiálové využití odpadů před využitím energetickým a uvádí povinnost evidence odpadů. [3][4]

V nově vydané vyhlášce o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady č. 341/2008 Sb., zaplňující mezeru v legislativě, která dlouhou dobu bránila materiálovému využití bioodpadů, je uveden seznam doporučených odpadů využitelných v aerobních nebo anaerobních zařízeních. Jsou zde i základní požadavky na zařízení, kontrolu technologie, vstupů a výstupů ze zařízení. Další významnou část tvoří soustava ukazatelů pro hodnocení a zařazování bioodpadů podle způsobu využití. Tato nová vyhláška by měla umožnit široké využití bioodpadů za současného zachování ochrany zdraví a životního prostředí. Nově je možné využít výstupu ze zařízení definované kvality kromě jako hnojiva na zemědělské a lesnické půdy, jako substráty na povrchu terénu v rekreačních a sportovních zařízeních, v městských parcích, v průmyslových zónách nebo pro rekultivační vrstvy skládek. [4][5]

Kal, jakožto biologicky rozložitelný odpad je také možné po úpravě využít na zemědělské půdě. Vyhláška č. 382/2001 Sb. specifikuje požadavky (chemické a mikrobiologické limity, množství a časové požadavky) jak na samotný kal, tak i na půdu, na kterou má být využit. Aplikací kompostů na zemědělskou půdu se zabývá zákon č. 156/1998 Sb. Ten také udává limitní hodnoty na kvalitu výsledného kompostu, hnojiv z digestátu nebo statkových hnojiv včetně rostlinné biomasy. Pokud by obsah rizikových prvků překročil limitní hodnoty, je zakázáno uvádět tato hnojiva do oběhu. [4]

Plán odpadového hospodářství, vydaný nařízením vlády č. 197/2003 Sb. obsahuje strategii odpadového hospodářství, stanovuje podíl recyklovaných odpadů a podíl odpadů ukládaných na skládky. [4]

„Pro snížení množství odpadu ukládaného na skládky jsou v něm vydána následující opatření [7]:

- a) vytvářet podmínky k oddělení shromažďování jednotlivých druhů biologicky rozložitelných odpadů vznikajících v domácnostech, živnostech, průmyslu a úřadech, mimo směsný odpad
- b) omezovat znečišťování biologicky rozložitelných odpadů jinými odpady zejména mající nebezpečné vlastnosti
- c) zvyšovat v maximální možné míře materiálové využití druhů odpadů tvořících BRKO vytríděný z komunálního odpadu, zejména papíru a lepenky
- d) zpracovat Realizační program České republiky pro biologicky rozložitelné odpady komplexně řešící nakládání s těmito odpady, zejména se zaměřením na snižování množství BRKO ukládaného na skládky
- e) navrhnout a vytvářet ekonomicky a technicky zdůvodněná společná řešení, v rámci dvou i více krajů, za účelem docílení požadovaného snížení množství BRKO ukládaného na skládky
- f) podpořit vytvoření sítě regionálních zařízení pro nakládání s komunálními odpady tak, aby bylo dosaženo postupného omezení BRKO ukládaných na skládky; při vytváření regionální sítě se zaměřovat zejména na výstavbu kompostáren, zařízení pro anaerobní rozklad a mechanicko-biologickou úpravu těchto odpadů
- g) zpracovat na základě dat a informací zejména z krajských koncepcí nakládání s odpady analýzu kapacit, provozních podmínek a technologického vybavení současných zařízení pro materiálové využití BRKO a případně stanovit opatření pro jejich uvedení do souladu s právním řádem České republiky
- h) upřednostňovat kompostování a anaerobní rozklad biologicky rozložitelných odpadů s využitím výsledného produktu zejména v zemědělství, při rekultivacích, úpravách zeleně; odpady, které nelze takto využít, upravovat na palivo a nebo energeticky využívat
- i) dodržovat důsledně požadavek zákazu ukládat na skládky odděleně vytríděné biologicky rozložitelné odpady s výjimkou řešení krizových situací způsobených živelnými pohromami a jinými mimořádnými událostmi
- j) vyhodnocovat na základě ohlašování odpadů každý rok množství a úroveň snižování podílu BRKO ukládaného na skládky a zveřejňovat výsledky vyhodnocení za uplynulý kalendářní rok vždy ke dni 30. září následujícího roku ve Věstníku Ministerstva životního prostředí.“

Návrh nového zákona o odpadech by měl obcím zavést povinnost separovaného sběru biologicky rozložitelných komunálních odpadů rostlinného původu. Nebude se vztahovat tam, kde bude zaveden systém komunitního nebo domácího kompostování. Měly by v něm být také zvýšeny ceny za uložení odpadu na skládky tak, aby motivoval původce k dodržování platné hierarchie nakládání s odpady. [5]

### 2.1.2 Přehled předpisů EU

- Směrnice Rady EU č.1999/31/ES., o skládkách odpadů
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 98/2008 o odpadech
- Nařízení EP a Rady č. 1774/2002., kterým se stanovují hygienická pravidla týkající se vedlejších živočišných produktů, které nejsou určeny k lidské spotřebě

„Směrnice č.1999/31/ES ukládá povinnost omezení ukládání na skládky biodegradabilního odpadu z komunálního odpadu a to do roku 2010 na 75 % hmotnosti tohoto druhu odpadu vzniklého v roce 1995, do roku 2013 na 50 % hmotnosti a nejpozději do roku 2020 na 35 %.“ [7] Toto omezení je Evropskou unií vnímáno jako klíčové pro omezení množství emisí metanu a průsaků ze skládek. [4]

Ve směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 98/2008 o odpadech je stanovena hierarchie způsobů nakládání s odpady v pořadí: předcházení vzniku, příprava k opětovnému využití, recyklace, jiné využití, odstranění. Nabádá taktéž členské státy k podpoře odděleného sběru biologického odpadu za účelem kompostování a anaerobní fermentace. [5]

Nařízení č. 1774/2002. má za cíl zajistit bezpečné využívání, recyklaci a odstraňování všech vedlejších produktů živočišného původu, které nejsou určeny k lidské spotřebě, včetně odpadů ze stravování. [4]

V rámci celé EU však neexistuje žádný oficiální dokument zastřešující celkové nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. [4]



## 2.2 Produkce BRO

Údaje z roku 2008 o produkci biologicky rozložitelných odpadů naleznete v tab. 1. Pocházejí ze dvou na sobě nezávislých zdrojů. Informačního systému odpadového hospodářství (ISOH) a Českého statistického úřadu (ČSÚ). [1]

Tab. 1: Produkce biologicky rozložitelných odpadů v roce 2008 [1]

Produkce vybraných skupin odpadů dle katalogu odpadů (kód odpadu – název)	% BRO	množství (t) dle ISOH		množství (t) dle ČSÚ	
		celkem	BRO	celkem	BRO
02 Odpady z prvovýroby v zemědělství, zahradnictví, myslivosti, rybářství a z výroby a zpracování potravin	90	934 000	840 600	578 614	520 753
03 Odpady ze zpracování dřeva a výroby desek, nábytku, celulózy, papíru a lepenky	80	279 000	223 200	504 172	403 338
04 Odpady z kožedělného, kožářského a textilního průmyslu	38	68 000	25 840	63 372	24 081
15 Odpadní obaly, absorpční činidla, čisticí tkaniny, filtrační materiály a ochranné oděvy jinak neurčené	27	1 034 000	279 180	656 540	177 266
17 Stavební a demoliční odpady	0,3	17 116 000	51 348	9 747 425	29 242
19 Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu, z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely	26	2 094 000	544 440	2 544 734	661 631
20 Komunální odpady (odpady z domácností a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů) včetně složek z odděleného sběru úřadů a z průmyslu, včetně odděleně sbíraných složek těchto odpadů	40	4 402 000	1 760 800	3 175 934	1 270 374
Úhrnné množství odpadů v přehledu		25 927 000	3 725 408	17 270 791	3 086 685

Roční přírůstek množství komunálních odpadů je přibližně 3 %. Celkový podíl biodegradabilní složky se bude velmi pravděpodobně zvyšovat. V roce 1995 to bylo 40 %, v roce 2013 by měl dosáhnout hodnoty 56 % a do roku 2020 až okolo 60 %. [1]

## 2.3 Nakládání s BRO

Existuje mnoho způsobů, jak vhodně přetvářet biologicky rozložitelný odpad na dále využitelné produkty jako jsou energie a krajina. Cílem všech způsobů je bioodpad neodstraňovat, ale využívat. Volba technologie zpracování závisí především na druhu odpadu a na finančních možnostech původců odpadu.

Nakládání s biodegradabilními odpady by se měl řídit těmito preferencemi: minimalizace, materiálová recyklace s produkcí energie, materiálová recyklace bez produkce energie, energetické využívání a skládkování. [8]

### Minimalizace

Zde patří podpora domovnímu kompostování, znovu používání oděvů, šetrnému používání papíru aj. [8]

### Materiálová recyklace s produkcí energie

Jedná se o velmi rychle se rozvíjející odvětví zpracování bioodpadů. Jde o výrobu bioplynu anaerobní fermentací a jeho následné spalování v kogeneračních jednotkách za produkce tepla a elektrické energie. Vyhnitý substrát je po odvodnění buď přímo využíván ke hnojení, nebo je kompostován a nebo je v separační jednotce rozdělen na vláknitou frakci a tekutou frakci. Vzhledem k technologické složitosti je vybudování bioplynové stanice finančně náročnější než například kompostování, ale ukazuje se, že i se započtením vstupů do budování vycházejí úsporněji s ohledem na produkci skleníkových plynů. Pro tento způsob zpracování jsou vhodnější vlhčí odpady. [8]

### Materiálová recyklace bez produkce energie

Jedinou čistou recyklací je asi recyklace papíru, avšak při zjednodušení do této kategorie spadá také kompostování a výroba rekultivačních substrátů. Aby bylo kompostování efektivní, mělo by docházet k rozvoji velkých kompostáren, které budou schopny dostatečně využít kapacitu potřebného strojního vybavení. Velká část kompostáren u nás vznikla adaptací zemědělských silážních žlabů, hnojišť a uhelných skladů. Většinou se kompostuje především bioodpad ze zemědělství a z lesní těžby, z papírenského a potravinářského průmyslu a řada kompostáren je zaměřena na kompostování čistírenských kalů. Z komunálních odpadů jsou to tráva, dřevní štěpka, listí a další sezónní bioodpad. [8]

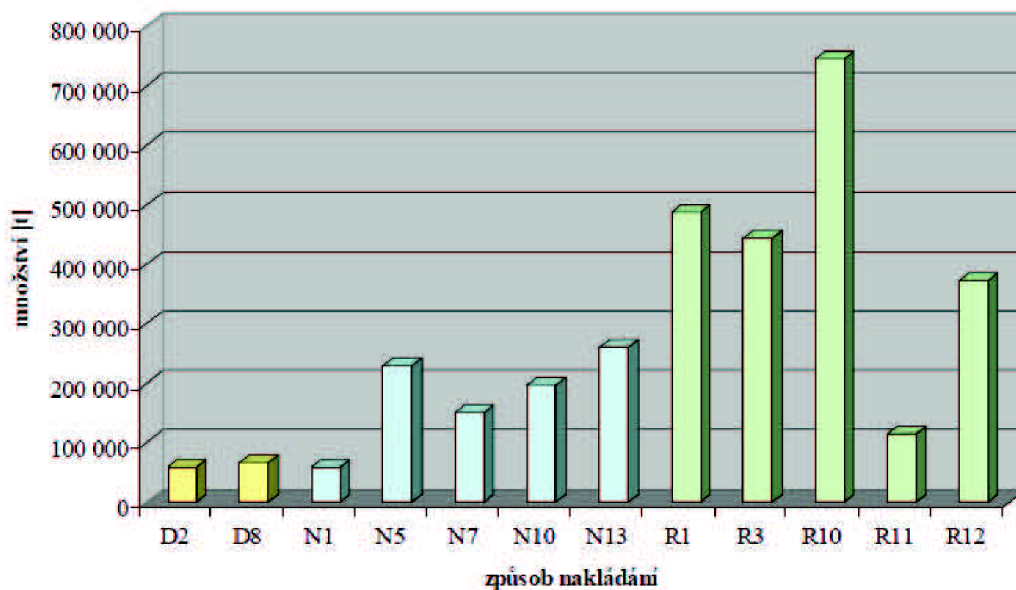
### Energetické využití

Například spalování dřevních odpadů, slámy nebo starého papíru nevhodného k recyklaci v kotelnách na biomasu. Také sem patří výroba peletek, briket, etanolu ze slámy či methylesteru řepkového oleje z odpadních rostlinných olejů a tuků. Tato paliva označujeme jako tzv. fytopaliva. Spalování směsného komunálního odpadu s podílem biodegradabilní složky je velmi nákladné a k návratnosti investice potřebuje velké množství odpadu. [8]

### Skládkování

Procesu skládkování se lze zcela vyhnout jen ve zvláštních případech, kdy je biologicky rozložitelný odpad shromažďován v tzv. separovaných sběrech. Není-li možné zajistit striktní separaci bio-složek již při sběru, pak je většinou nutno počítat s potřebou skládkování tuhých zbytků, což však již vyhovuje i požadavkům Evropské unie, neboť takto je před skládkováním dosaženo využití části odpadu, snížení váhy, objemu a stabilizace odpadu, čímž se předchází tvorbě skládkového plynu. Skládkování by mělo být postupně nahrazeno mezisklady vytríděných odpadů s dotřídovacími linkami. [6]

Graf 1: Evidované způsoby nakládání s BRO nad 50000 t v roce 2006 bez skládkování-D1 (na skládky bylo v roce 2006 uloženo 3 238 894 t BRO) [9]



D2 Úprava půdními procesy

D8 Biologická úprava jinde nespecifikovaná, jejímž konečným produktem jsou sloučeniny nebo směsi, které se odstraňují některým z postupů uvedených pod označením D1 až D12 (Zákon o odpadech - Způsoby využívání)

N1 Využití na terénní úpravy apod.

N5 Zůstatek na skladu k 31.12.

N7 Vývoz odpadů do členského státu EU

N10 Prodej odpadu jako suroviny

N13 Kompostování

R1 Využití kompostu jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie

R3 Získání/regenerace organických látek, které se nepoužívají jako rozpouštědla

R10 Aplikace do půdy, která je přínosem pro zemědělství nebo zlepšuje ekologii

R11 Využití odpadů, které vznikly aplikací některého z postupů uvedených pod označením R1 až R10

R12 Předúprava odpadů k aplikaci některého z postupů uvedených pod označením R1 až R11

### 2.3.1 Prognóza nakládání s biodegradabilním odpadem v ČR

Vstupem ČR do Evropské unie bylo nutné sjednotit platnou legislativu a tím změnit přístup státu k nakládání s odpady. Směrnice 1999/31/EC o „skládkování odpadu“ ukládá členským státům nejpozději do roku 2006 omezit množství skládkovaných biologicky rozložitelných odpadů na 75 % množství uloženého v roce 1995, do roku 2013 na 50 % a do roku 2020 na 35 % tehdejšího množství (viz kap. 2.1.2). Pokud bylo v r. 1995 skládkováno více než 80 % komunálních odpadů (což je příklad České republiky), je možné oddálit splnění těchto cílů nejvýše o 4 roky. Cílovými roky naplnění požadavku "Směrnice" jsou v České republice 2010, 2013 a 2020. [10] Požadavky na kapacity potřebné pro odstranění biologicky rozložitelných komunálních odpadů jinak než skládkováním naleznete v tab. 2.

Aby se tyto cíle podařilo splnit, musí dojít ke znevýhodnění skládkování biodegradabilních odpadů vůči ostatním ekologicky přijatelnějším způsobům například zvýšením ceny. Bude nutné důsledně vymáhat zákaz skládkování odpadů ze zeleně a separovaného komunálního bioodpadu včetně papíru a lepenky. Důležitým faktorem je také

prevence a minimalizace produkce bioodpadů. Domovní kompostování zbytků z potravin a odpadu ze zahrad je jednou z cest, kterou lze omezit množství biodegradabilní složky v komunálním odpadu. Odpadové hospodářství státu by se mělo orientovat především na podporu kompostování a anaerobní fermentace v místě vzniku odpadu, podporu komunitního kompostování a zavádění systémů odděleného sběru a zpracování bioodpadů. [11][12]

Tab. 2: Kapacity potřebné pro odstranění biologicky rozložitelných komunálních odpadů jinak než skládkováním (údaje v tis. t/rok) [10]

	1995	2010*	2013	2020
Prognóza produkce tuhých komunálních odpadů	3730	5135	5291	5673
Z toho biologicky rozložitelných	1529	3081	3174	3403
Možnosti:				
Možno uložit na skládky (BRO)		75 % r. 1995 1147	50 % r. 1995 764	35 % r. 1995 535
Jinak nutno odstranit		1934	2410	2868
Prognózovaný vývoj kapacit pro nakládání s odpady				
Recyklace papíru (nárůst)	380	+130	+150	1200
Kompostování BRO (nárůst)	220	+429	+458	+434
Spalování směsného TKO (nárůst)	636	+643	+687	+652

\*V roce 2010, se závazky plynoucí ze směrnice 1999/31/EC splnit nepodařilo a pravděpodobně se to nepodaří ani v roce 2013. Naopak, podíl biologicky rozložitelného odpadu ukládaného na skládky stále stoupá. Česko se tak vystavuje sankcím ze strany Evropské komise, které mohou dosahovat řádu miliard korun ročně.

Bude nutné zavést zásadní změny v nakládání s bioodpady a odpady obecně, jinak nelze stanovených cílů reálně dosáhnout. [36]

### 3 Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace je soubor biologických procesů, při nichž dochází k rozkládání biologicky rozložitelné hmoty vlivem působení několika základních skupin mikroorganismů bez přístupu vzduchu. Celý tento systém je velice křehký, neboť produkt jedné skupiny mikroorganismů je substrátem pro skupinu jinou, tudíž výpadek jedné skupiny může způsobit nestabilitu v celém systému. Finálními produkty tohoto procesu jsou biomasa, plyny, především tedy  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$  a  $\text{N}_2$  (viz kap. 3.5), a také nerozložený organický zbytek. [13]

#### 3.1 Průběh anaerobního rozkladu

V průběhu času byly pro popis anaerobní fermentace postupně vytvořeny 3 různé modely. První z nich, tzv. Nejstarší model předpokládal dvoufázový proces, který zahrnoval acidogenní fázi, během které jsou produkovány mastné kyseliny a metanogenní fázi, v jejímž průběhu metanogenní organismy přeměňují tyto kyseliny na  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$ , ale mohou také k produkci metanu využít  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ . [14]

Následoval třífázový model, začínající fermentační fází, ve které jsou uhlovodíky, proteiny a lipidy konvertovány na mastné kyseliny, alkoholy,  $\text{CO}_2$  a čpavek. Ve druhé fázi acetogenní bakterie produkující vodík štěpí tyto produkty na  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , acetát a nižší mastné kyseliny. Ve třetí fázi využívají metanogenní organismy  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  a acetát pro produkci metanu a mikrobiální biomasy. [14]

Podle nejnovějšího modelu můžeme anaerobní rozklad rozdělit na čtyři základní stádia [13][15]:

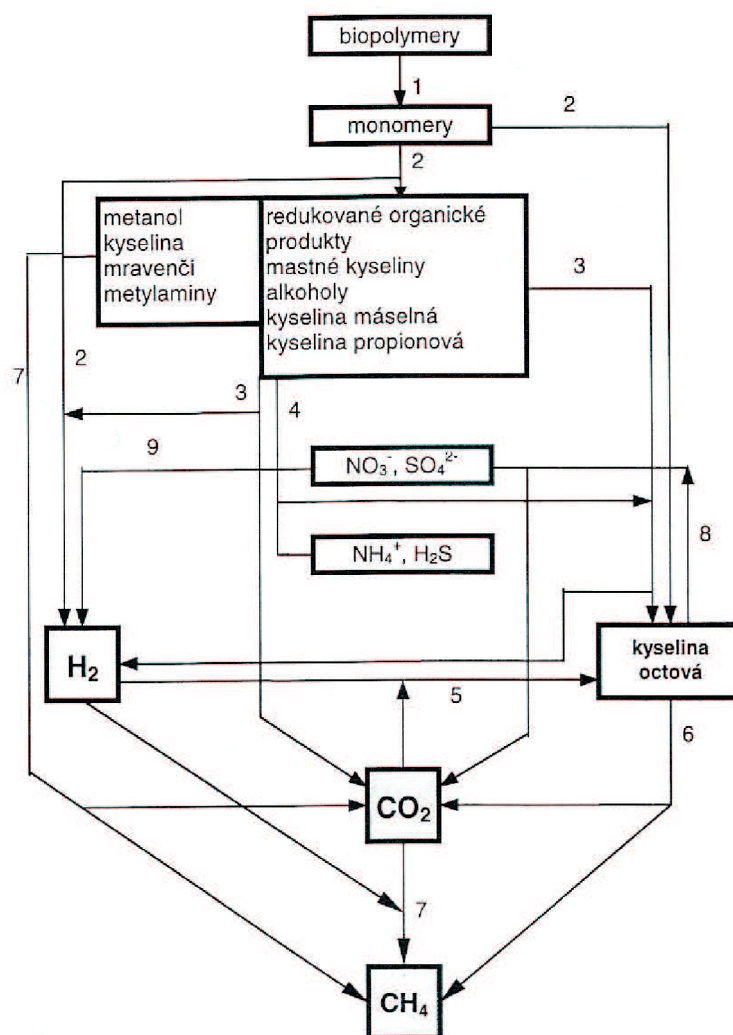
1) Hydrolýza – vlivem extracelulárních enzymů, produkovaných fermentačními bakteriemi, jsou hydrolyticky štěpeny makromolekulární organické látky (polysacharidy, lipidy a proteiny), čímž vznikají nízkomolekulární sloučeniny (mastné kyseliny a alkoholy), schopné transportu dovnitř buňky, za současného uvolňování  $\text{H}_2$  a  $\text{CO}_2$ .

2) Acidogeneze – rozkládání produktů hydrolýzy uvnitř buňky na jednodušší sloučeniny (kyseliny, alkoholy,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ). V závislosti na podmínkách prostředí a charakteru počátečního substrátu se fermentací těchto látek tvoří řada konečných redukováných produktů. Za nízkého parciálního tlaku vodíku jsou produkovány hlavně kyselina octová,  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ , při vyšším jsou tvořeny organické kyseliny vyšší než octová, kyselina mléčná, etanol apod.

3) Acetogeneze – rozkládání produktů acidogeneze syntrofními acetogenními mikroorganismy na  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  a kyselinu octovou v těsné součinnosti s dalšími mikroorganismy, které spotřebovávají vodík vytvořený acetogenními mikroorganismy, jejichž činnost, a také produkce metanogenních substrátů by byly přebytkem vodíku tlumeny.

4) Metanogeneze – striktně anaerobní metanogenní mikroorganismy, které jsou podobné nejstarším organismům na Zemi, rozkládají své specifické substráty (metanol, kyselina mravenčí, kyselina octová, metylaminy,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) za vzniku  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$ .

Podrobné schéma průběhu anaerobní fermentace naleznete na obr. 1.



Obr. 1: Schéma anaerobní fermentace organických látek

1 – hydrolyza, 2 - acidogeneze, 3 – acetogeneze, 4 – oxidace redukovaných organických produktů na  $\text{CO}_2$  a kyselinu octovou, 5 – acetogenní respirace  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ , 6 – metanogeneze z kys. octové, 7 – metanogeneze z jednoduchých substrátů,  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ , 8 – oxidace kys. octové na  $\text{CO}_2$ , 9 – oxidace  $\text{H}_2$  [13]

### 3.1.1 Přehled mikroorganismů anaerobního rozkladu

Hydrolytické a fermentační – nesou odpovědnost za první dva kroky anaerobní fermentace. Tyto rychle rostoucí mikroorganismy jsou velmi odolné vůči změnám podmínek. Pomocí enzymů, uvolňovaných do média, hydrolyzují komplexní organické látky na menší molekuly, schopné transportu dovnitř buňky. Fermentací těchto látek tvoří nižší mastné kyseliny, etanol, kyselinu mléčnou,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  apod. Patří zde bakterie rodu *Bacteroides*, *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus* a další. [13]

Acetogenní – mikroorganismy produkující  $\text{H}_2$ . Kyselina propionová, i ostatní organické kyseliny vyšší než octová, alkoholy a některé aromatické sloučeniny jsou těmito mikroorganismy katabolizovány na kyselinu octovou,  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ . Zástupci této kategorie jsou *Syntrophobacter willinii*, *Syntrophomonas wolfei* a *Syntrophus buswelii*. [13]

Homoacetogenní – skupina mikroorganismů schopných růst na jednoduhlíkatých i víceuhlíkatých substrátech. Disponují metabolismem s vysokou termodynamickou účinností, neboť netvoří vodík. Některé druhy jej naopak spotřebovávají a tím pomáhají udržovat nízký parciální tlak  $H_2$  v systému. Zástupci jsou *Clostridium thermoaceticum*, *Acetobacterium woodii* a *Butyribacterium methylotrophicum*. [13]

Sulfátredukující a denitrifikační – velmi důležité skupiny bakterií. Jsou schopné růst na víceuhlíkatých substrátech a podporovat tvorbu metanogenních substrátů (kyselina octová, sulfan, vodík a amoniak) s využitím síranů nebo dusičnanů. Za jistých podmínek mohou konkurovat i metanogenním bakteriím spotřebováváním jejich substrátů. Především jsou to zástupci rodu *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* a *Desulfobulbus*. [13]

Metanogenní – nejdůležitější metabolická skupina procesu metanizace. Převádějí konečné produkty obsahující uhlík do plynné fáze. Nejznámějšími druhy metanogenních bakterií jsou *Methanosarcina barkeri*, *Methanobacterium thermoautotrophicum* a *Methanotherix soehngeni*. [13]

### 3.2 Porovnání anaerobních a aerobních procesů

Z bilance energie a uhlíku vyplývá, že přednost anaerobní technologie oproti aerobní spočívá v transformaci a zušlechťování odpadních a organických látek do bioplynu, který je velice dobře energeticky využitelný.

Při aerobních procesech se přibližně 60 % energie spotřebuje na syntézu nové biomasy a 40 % se ztrácí ve formě reakčního tepla, naopak při anaerobních procesech se přibližně 90 % energie původně obsažené v substrátu zachová ve vzniklém bioplynu, 5 – 7 % se spotřebuje na růst nové biomasy a 3 – 5 % se ztratí ve formě reakčního tepla.

Také z bilance uhlíku vyplývá větší výhodnost anaerobní fermentace. Při aerobních procesech se ho ze substrátu okolo 50 % přemění na biomasu a dalších 50 % na oxid uhličitý. U anaerobních procesů přechází 95 % uhlíku do bioplynu a 5 % do biomasy. [13]

Výhody anaerobních procesů ve srovnání s aerobními [13][16]:

- Nižší spotřeba energie. Nevynakládá se energie na aeraci, navíc se za optimálních podmínek vytváří energeticky výhodný bioplyn.
- Asi desetkrát nižší produkce biomasy. Anaerobní kal nemusí být již dále stabilizován.
- Nízké požadavky na živiny.
- Možnost udržet vysokou koncentraci biomasy v reaktoru.

Nevýhody anaerobních procesů ve srovnání s aerobními [13][16]:

- Poměrně vysoká hodnota organických látek na odtoku. Většinou je nutno odtok z anaerobního reaktoru aerobně dočistit před vypouštěním do recipientu.
- Citlivost metanogenních bakterií na změny životních podmínek.
- Dlouhá doba zpracování anaerobních procesů.
- Nutnost ohřevu nádrží pro zajištění optimálního průběhu procesu.

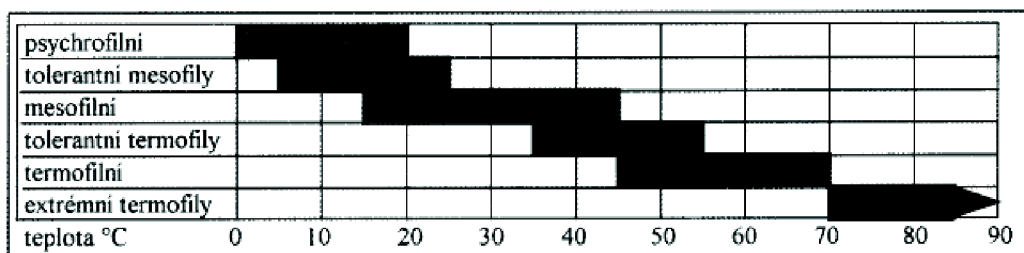
### 3.3 Faktory ovlivňující anaerobní fermentaci

Na proces anaerobního rozkladu organických látek působí řada faktorů. Ty mohou významným způsobem měnit životní prostředí mikroorganismů a tím ovlivňují průběh celého procesu. Mezi tyto faktory patří teplota, pH, složení substrátu a toxicita. Na základě dalších faktorů zase navrhujeme a posuzujeme anaerobní reaktor. [15]

#### 3.3.1 Vliv teploty

Teplota má jeden z největších vlivů na růst mikroorganismů, neboť stejně jako ovlivňuje všechny biochemické procesy, ovlivňuje i rychlosti všech reakcí, jež probíhají uvnitř i vně mikroorganismů. Obecně platí, že čím je teplota vyšší, tím je větší i rychlost všech probíhajících procesů. Jelikož každý mikroorganismus reaguje na teplotu jinak (viz obr. 2), bude mít teplota rozhodující úlohu i ve složení směsných kultur. Taktéž významně působí na interakce mezi jednotlivými mikroorganismy. Změnou teploty se mění rychlosti probíhajících pochodů, což může mít za následek porušení dynamické rovnováhy procesu a havárii celého procesu. Dlouhodobou změnou teploty dojde ke změně zastoupení jednotlivých druhů mikroorganismů. [13][17]

Za dolní teplotní limit pro růst mikroorganismů je považována teplota 0 °C (viz obr. 2), kdy mrzne kultivační médium. Horní teplotní hranice je dána teplotou denaturace bílkovin jednotlivých mikroorganismů. Může se pohybovat od 100 °C klidně až po 300 °C. K tvorbě metanu dochází v rozmezí teplot 5 – 95 °C. Anaerobní reaktory pracují ve dvou oblastech. Větší část pracuje v tzv. mezofilní oblasti s rozmezím teplot 30 – 40 °C, menší část pracuje v tzv. termofilní oblasti při teplotách 45 – 60 °C. Nejdůležitější pro celý proces je ovšem zabezpečení konstantní teploty, čímž dosáhneme jeho stability. [13][17]



Obr. 2: Přehled teplotních rozmezí optimálních pro jednotlivé skupiny mikroorganismů [18]

#### 3.3.2 Vliv pH

Závažným limitujícím faktorem je taktéž úzký rozsah koncentrace vodíkových iontů, jejímž měřítkem je pH, vhodný pro růst metanogenních mikroorganismů, pohybující se v neutrální oblasti 6,5 – 7,5. Toto pH je nutné uvnitř reaktoru zajistit. Jakmile klesne pod 6 nebo naopak stoupne nad 8 je činnost bakterií silně inhibována. Nejčastěji dochází k výkyvu pH vlivem přetížení reaktoru, kdy převládá produkce kyselin mikroorganismy předmetanizační fáze nad jejich spotřebou a tím narůstá jejich koncentrace v systému. Aby nedošlo ke zhroucení procesu, je třeba řídit zatížení reaktoru pomocí množství a složení mastných kyselin v médiu, popřípadě přidávat dodatečně alkalizační činidla. [17]

#### 3.3.3 Vliv přítomnosti nutrientů

Aby byl zabezpečen správný průběh anaerobního rozkladu a nejvyšší produkce metanu, je třeba zajistit, aby měl substrát vyvážený poměr dusíku a fosforu k organickému uhlíku. Na



základě produkce biomasy se poměr CHSK:N:P udává v rozmezí od 300:6,7:1 do 500:6,7:1. Často se jako dostatečný doporučuje poměr C:N:P 100:1:0,2.

Taktéž je důležitá přítomnost mikronutrientů, jako jsou Na, K, Ca, Mg, Fe, S, Ni, Co, Mo, Se, W, které jsou součástí některých enzymových systémů zejména acetogenních a metanogenních bakterií, ale i přítomnost růstových faktorů. Zejména přidáváním Ni a Co dosáhneme zvýšení metanogenní aktivity a zvýšení růstu anaerobní biomasy. U přirozených substrátů je množství nutrietů většinou dostačující, avšak u kejdy nebo jiných živočišných substrátů bývá vysoký podíl amoniaku, který za zvýšeného pH může působit inhibičně až toxicky. [13][19]

### 3.3.4 Vliv přítomnosti toxických a inhibujících látek

Mezi toxické a inhibující látky řadíme ty, které nepříznivě ovlivňují biologický proces. Může to být každá látka, která je zastoupena v dostatečně vysoké koncentraci, tudíž je lepší hovořit nikoliv o toxických látkách, ale o toxických koncentracích.

Nejčastějšími inhibitory jsou nižší mastné kyseliny a amoniak. Inhibice těmito látkami je závislá na pH a jejich koncentraci v systému. Při vysokém pH může inhibičně působit amoniak. Naopak při nízkém pH inhibičně působí nižší mastné kyseliny. Lze však vypěstovat i biomasu tolerující vyšší koncentraci amoniaku. Je k tomu ovšem potřeba dlouhodobá adaptace. Jedná se především o zpracování slepičího trusu a prasečí kejdy, kdy může koncentrace amoniaku dosahovat okolo 6 g/l, v závislosti na koncentraci vstupujícího materiálu.

Látky jako mikronutrinely působí na proces při nižších koncentracích stimulačně, ale ve vysokých inhibičně. Dalšími inhibitory jsou těžké kovy, sulfidy, kyanidy, oxidanty, pesticidy, tenzidy, rozpouštědla a další specifické látky.

Koncentrace látky, při které se projevuje inhibiční efekt je závislá na způsobu dávkování, na přítomnosti eventuálního detoxikantu a na fyziologickém stavu biomasy. [13][19]

### 3.3.5 Vliv technologických faktorů

„Obsah reaktoru musí být homogenní, tj. dobře promíchávan, tak aby byl umožněn co nerychlejší a nejdokonalejší kontakt mikroorganismů se substrátem. Doba zdržení musí být dostatečně dlouhá, aby nedocházelo k vyplavování potřebných mikroorganismů a aby bylo dosaženo potřebné účinnosti rozkladu.“ [15]

Další faktory ovlivňující průběh anaerobních procesů jsou vlhkost prostředí (minimálně 50%), přítomnost světla (zpomaluje množení mikroorganismů), velikost kontaktních ploch (co největší dotykové plochy), zatížení vyhnívacího prostoru (zajistit, aby nedošlo k přetížení fermentoru organickou sušinou), rovnoměrný přísun substrátu a také odplynění substrátu. [20]

## 3.4 Ekologičnost anaerobních procesů

Lidskou činností, především biologickou (chov hospodářských zvířat, pěstování rýže), ale také emisemi při zpracování a těžbě fosilních paliv, emisemi plynu ze skládek aj. se ročně uvolní do atmosféry okolo  $535 \cdot 10^6$  t metanu, který patří mezi skleníkové plyny. Zachycuje až 30x více tepla než  $\text{CO}_2$  a podle odborníků se z asi 18 % podílí na globálním oteplování. Příspěvek  $\text{CO}_2$  na globálním oteplování je asi 49 %. Tento vliv člověka na produkci metanu je možno snížit např. využitím odpadní biomasy pro produkci biopaliva, aplikací nových biochemických a termochemických metod k maximalizaci účinnosti procesů konverze na

biopalivo a v neposlední řadě také konverzí organických odpadů na metan a prevencí přímých emisí metanu do prostředí, k čemuž nám pomáhají anaerobní procesy.

Bioplyn, jakožto obnovitelný zdroj energie slouží k náhradě fosilních paliv a mimo to anaerobní fermentací kejdy a hnoje se snižují spontánní emise CH<sub>4</sub> z hnojišť.

Anaerobní procesy umožňují efektivněji recyklovat organické odpady používané jako hnojiva a taktéž nahrazují umělá hnojiva přirozenými. Anaerobně stabilizovaná hnojiva mají vyšší využitelnost živin a jejich nižší vyplavitelnost, nižší obsah semen plevelů, představují menší nebezpečí kontaminace vod a v neposlední řadě mají také nižší pachovou zátěž. [13]

### 3.5 Bioplyn

Bioplyn, jakožto produkt anaerobní digesce organických látek, je uvolňován při stabilizaci kalů, čištění odpadních vod, stabilizaci agroindustriálních odpadů a skládkování tuhých odpadů, je nejperspektivnějším plynným biopalivem. Vytváří vysoce hodnotné palivo, vhodné na pohon i stacionárních motorů, jež se svou výhřevností s ohledem na podíl CO<sub>2</sub> a vodní páry pohybuje okolo 70 % výhřevnosti zemního plynu. Hlavní výhřevnou složku tvoří metan.

Přínos všech metod na výrobu bioplynu je v tom, že zpracovávají odpady rostlinného a živočišného původu s vysokou vlhkostí, jejichž pozdější aplikace formou hnojiv je bez škodlivých účinků. [13][21]

#### 3.5.1 Složení a vlastnosti bioplynu

Bioplyn je směsí plynů, z nichž největší zastoupení má metan a oxid uhličitý (viz tab. 4). V menším množství jsou zastoupeny H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, vodní pára a může obsahovat stopová množství amoniaku, mastných kyselin aj. Složení bioplynu je závislé na druhu rozkládaného substrátu. Každý technologický proces produkuje bioplyn s jiným obsahem metanu (viz tab. 3). [13][21]

Tab. 3: Obsah metanu v bioplynu z různých technologií [13]

Technologie	Obsah CH <sub>4</sub> [obj %]
Čištění odpadních vod	50-85
Stabilizace kalů	60-70
Agroindustriální odpady	55-75
Skládky	35-55

Tab. 4: Průměrné složení bioplynu [21]

Složka	Obsah
CH <sub>4</sub>	45-75%
CO <sub>2</sub>	25-48%
H <sub>2</sub>	0-3%
H <sub>2</sub> S	0,1-1%
N <sub>2</sub>	1-3%
NH <sub>3</sub>	stopové množství

Tab. 5: Specifická produkce bioplynu několika substrátů, obsah metanu v něm obsažený a jeho výhřevnost [13]

Látka	Specifická produkce bioplynu [m <sup>3</sup> /kg rozložené látky]	Obsah CH <sub>4</sub> [%]	Výhřevnost [MJ/m <sup>3</sup> ]
Tuky	1,125-1,151	62-67	cca 23,45
Sacharidy	0,79-0,875	50	cca 17,76
Bílkoviny	0,56-0,75	71-84	cca 24,87
Čistírenský kal	0,8-1,3	65-75	cca 23
Prasečí kejda	1,07	64-70	cca 22
Odpadní vody z výroby pektinu	0,56	cca 50	cca 17
Odpadní vody z výroby droždí	0,5-0,7	66,71	cca 22

Hlavní složka bioplynu, metan, je bezbarvý plyn bez zápachu. Se kyslíkem může tvořit výbušnou směs. Meze výbušnosti jsou značně velké, od 4,4 do 15 obj. %. Relativní hmotnost bioplynu závisí na jeho složení a teplotě, jelikož metan sám o sobě je lehčí než vzduch, ale oxid uhličitý je těžší než vzduch. Je-li obsah metanu větší než 53 %, začíná být bioplyn lehčí než vzduch. Ve vzduchu v koncentraci okolo 0,1 obj. % působí metan anesteticky. Další vlastnosti metanu a některých jiných látek obsažených v bioplynu naleznete v tab. 6.

I když jsou metan i CO<sub>2</sub> bez zápachu, totéž neplatí o bioplynu. Jeho zápach je způsoben především obsahem H<sub>2</sub>S a ostatními sirnými sloučeninami, které zapáchají už při nízkých koncentracích. Jejich obsah závisí na množství organických sirných sloučenin ve zpracovávaném materiálu. Ještě větší zápach bioplynu ze skládek způsobují další látky jako estery, alkylbenzeny, aj. [13]

Tab. 6: Vlastnosti bioplynu [13]

Vlastnosti	Hlavní složky bioplynu			Směs (65 % CH <sub>4</sub> a 35 % CO <sub>2</sub> )
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	
Průměrný obsah (obj. %)	55-75	24-44	0,1-0,7	100
Práh vzplanutí (obj. %)	5-15	-	4-45	6-12
Zápalná teplota (°C)	700	-	270	650-750
Kritický tlak (Mpa)	4,7	7,5	9	7,5-8,9
Kritická teplota (°C)	-81,5	31	100	-82,5
Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	0,72	1,98	1,54	1,2

### 3.5.2 Výtěžnost bioplynu

Pro hodnocení kvality substrátu z energetického hlediska existuje několik kritérií. „Jsou jimi například ekvivalent dostupných elektronů obsažených v substrátu nebo u anaerobních systémů, kde jsou jiné finální akceptory elektronů než kyslík, lze použít vztah ekvivalentu dostupných elektronů a jednoho molu kyslíku a používat pro míru energetického obsahu substrátu kyslíkové jednotky ve formě CHSK (chemická spotřeba kyslíku). Teoretická

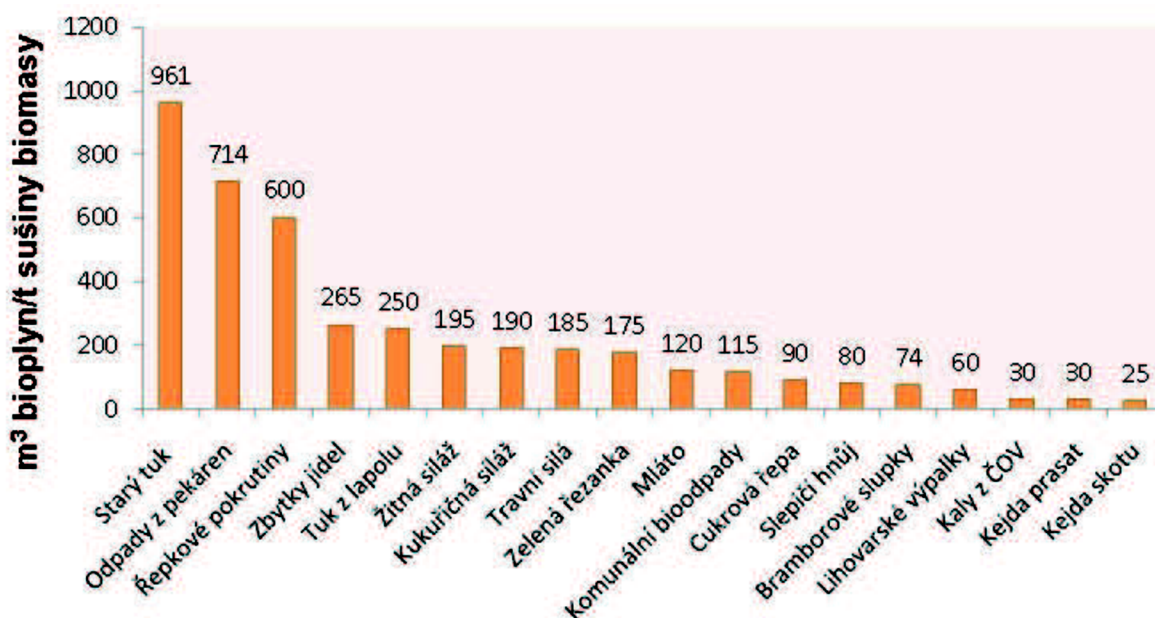
výtěžnost metanu závisí především na oxidačním stupni daného substrátu, vyjádřenému jako průměrné oxidační číslo uhlíkového atomu (POXČ) v molekule substrátu, které je ve vztahu k CHSK.“ [22]

Hlavní faktory, na kterých závisí výtěžnost metanu při anaerobní fermentaci [23]:

- Chemické složení a chemická struktura materiálu (obsah uhlohydrátů, tuků, proteinů, celulózy, hemicelulózy, ligninu a poměr jednotlivých komponent)
- Biologická rozložitelnost zpracovávaného materiálu
- Technologické podmínky procesu (teplota, pH, zatížení, doba zdržení, míchání, přítomnost toxických nebo inhibujících látek, počet stupňů fermentace aj)
- Předúprava zpracovávaného materiálu

Na grafu 2 můžeme vidět rozdílnost produkci z jednotlivých substrátů.

Graf 2: Výtěžnost bioplynu z jednotlivých druhů substrátů [21]



### 3.5.3 Úprava a čištění bioplynu

„Při všech v současné době používaných metodách využívání bioplynu je důležité odstranit halogenové uhlovodíky a H<sub>2</sub>S. Fluorované a chlorované uhlovodíky jsou nebezpečné, protože nedokonalým spalováním se mohou tvořit dioxiny a dibenzofurany. H<sub>2</sub>S vyvolává nebezpečí koroze následkem tvorby H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a její kondenzace ze spalin ve spalovacím zařízení. Mimo to přítomnost sloučenin chlóru, fluoru, síry a fosforu ve spalinách působí jako katalytický jed a znemožňuje katalytickou redukci NO<sub>x</sub>. Z těchto důvodů je důležité před využíváním bioplynu odstranit z něj vodu a výše uvedené nečistoty. Míra čištění bioplynu závisí na zamýšleném způsobu jeho využívání.“ [13]

#### Odstraňování kapalin a prachu

Nejlevnějším způsobem je použití různých druhů filtrů a cyklónů. Mezi jiné metody patří např. vymrazování, adsorpce nebo tlakové sušení. Tyto metody jsou však značně drahé a používají se jen v případě požadavku na vysokou čistotu bioplynu. [13]

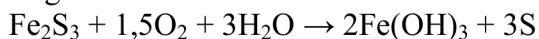
## Odstraňování H<sub>2</sub>S

Přidáváním solí železa – jako zdroje železa slouží FeCl<sub>3</sub>, FeClSO<sub>4</sub> nebo železité vodárenské kaly z čiření při úpravě pitné vody. Tyto se přidávají do zpracovávaného substrátu. Poté reagují se vznikajícím H<sub>2</sub>S za tvorby nerozpustných sulfidů.

Adsorpci – H<sub>2</sub>S se z bioplynu odstraňuje adsorpci na plynárenské hmotě. Princip spočívá v reakci H<sub>2</sub>S s hydratovaným oxidem železitým, který je hlavní součástí suché plynárenské hmoty. Regenerace se provádí oksyločením[13][17]:



Regenerace:



Mokrý způsob – praní alkalickými roztoky (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, soli slabých organických kyselin aj.). Praní suspenzemi sloučenin těžkých kovů v alkalickém roztoku (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v roztoku Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) nebo roztoky solí těžkých kovů (roztoky solí Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>). Praní organickými rozpouštědly (metanolem, dimethylformamidem). Praní oxidovanou formou redoxního systému, jež vylučuje z H<sub>2</sub>S přímo síru a regeneruje se vzduchem (organické systémy na bázi fenolů, chelatonát železito-sodný).

Biologický způsob – sírné bakterie ve vodním prostředí oxidují za aerobních podmínek H<sub>2</sub>S na elementární síru a sírany v závislosti na teplotě a pH. [13][17]

## Odstraňování halogenových uhlovodíků

Provádí se adsorpci na aktivním uhlí nebo jiném adsorbentu. [13]

## Obohacování o CH<sub>4</sub>

Zvýšení obsahu metanu v bioplynu se provádí snížením obsahu CO<sub>2</sub>. Vyšší podíl metanu je praktický především tehdy, chceme-li využít bioplyn pro pohon motorů.

Membránová separace – transport oxidu uhličitého, sulfanu a vody přes membránu z oblasti s vysokým tlakem do oblasti s atmosférickým tlakem. Z prostoru s vysokým tlakem se odvádí prakticky čistý metan.

Adsorpce na molekulových sítích – bioplyn je vháněn na molekulová síta, kde se adsorbuje oxid uhličitý

Nejjednodušším způsobem je tlaková vypírka. Dalším je např. sorpce CO<sub>2</sub> v alkalických roztocích. [13]

### 3.5.4 Využití bioplynu

Díky vysoké výhřevnosti je bioplyn řazen mezi ušlechtilé zdroje energie. Z metanizačních nádrží je odváděn do plynojemů a odtud se vede k dalšímu zpracování. [13]

V současné době je bioplyn využíván především k těmto účelům [13]:

- Spalování a ohřev teplotosného média
- Kombinovaná výroba tepla a elektrické energie spalováním v plynových motorech nebo plynových turbínách – v současné době neekonomičtější řešení. Část elektřiny a tepla využito pro provoz bioplynové stanice nebo ČOV, zbytek může být dodáván do sítí
- Výroba elektrické energie, tepla a chladu spalováním v trigeneračních jednotkách
- Spalování v plynových motorech pro přímý pohon různých agregátů

- Spalování v plynových motorech pro pohon motorových vozidel – v dnešní době značně ekonomicky neefektivní
- Spalování bez energetického využití – v případě, že není jiné využití nebo je neekonomické. Jedná se pouze o bezpečnou likvidaci bioplynu.
- Dodávka bioplynu s vysokým obsahem CH<sub>4</sub> do sítě
- Chemická výroba sekundárních produktů z bioplynu

## 4 Dezintegrace

Zvýšit produkci bioplynu bez nutnosti dalších investic lze u bioplynových stanic především optimalizací provozu. Tedy zabezpečením optimálních podmínek pro využití stávajících technologických komponent bioplynové stanice a optimalizací podmínek procesu vhodným dávkováním substrátu, dostatečným mícháním reaktorů, dodržováním technologických parametrů - správného zatížení a doby zdržení, zabezpečení konstantní teploty apod.

Vyšší výtěžnosti metanu, avšak při nutnosti dalších investic, dosáhneme také předúpravou vstupní suroviny, tzv. desintegrací. Ta je ale často opomenuta, nebo se bere za dostatečné zpracování materiálu při sklizni. [22][24]

### 4.1 Význam dezintegrace

Pod pojem dezintegrace řadíme všechny procesy, které vedou k rozbití stávající chemické nebo fyzikální struktury zpracovávaného materiálu. Mechanickou nebo jinou dezintegrací dojde k uvolnění buněčného lyzátu, působícího stimulačně na další biologický rozklad, do roztoku a k zpřístupnění pletiv fytohmoty hydrolyzujícím enzymům. To vede ke znatelnému nárůstu produkce bioplynu. Po dezintegraci dojde ke zvýšení biologické rozložitelnosti zpracovávaného substrátu a k lepší transformaci organického uhlíku do bioplynu. Míra nárůstu množství bioplynu závisí na stupni dezintegrace vstupní suroviny. Čím větší je stupeň dezintegrace, tím lepší je přístup enzymů k buněčným řetězcům a také efektivita hydrolyzace. [22][24][25]

„Applikací desintegrace dosáhneme [26]:

- Zvýšení výkonnosti anaerobních reaktorů
- Zvýšení rychlosti rozkladu
- Zvýšení rozložitelnosti organických látek v průběhu procesu fermentace, prohloubení anaerobního rozkladu
- Zvýšení produkce bioplynu
- Snížení doby zdržení ve fermentoru
- Snížení množství produkovaného stabilizovaného materiálu
- Zlepšení odvoditelnosti anaerobně stabilizovaného materiálu
- Zlepšení energetické bilance procesu v porovnání s klasickým uspořádáním“

### 4.2 Stupeň dezintegrace

Při dezintegraci představuje primární cíl uvolnění organického obsahu buněk do roztoku. Čím více buněk je dezintegrováno, tím více je také uvolněného buněčného lyzátu. Stupněm dezintegrace rozumíme tedy poměr přírůstku organických látek uvolněných dezintegrací do roztoku k celkovému množství organických látek před dezintegrací.

Abychom mohli určit stupeň dezintegrace kalu, musíme zjistit  $CHSK_{Cr}$  (chemická spotřeba kyslíku) homogenizovaného směsného kalu před dezintegrací a  $CHSK_{Cr}$  pouze kapalně fáze téhož vzorku po separaci pevné fáze. Pro zjištění přírůstku organických látek uvolněných do roztoku se po dezintegraci stanoví pouze  $CHSK_{Cr}$  kapalně fáze. [25]

Výpočet stupně dezintegrace (rov. 1) [25]:

$$SD = \frac{CHSK_{rozp.ZPAK} - CHSK_{rozp.PAK}}{CHSK_{homog.ZPAK} - CHSK_{rozp.PAK}} \cdot 100 \quad (1)$$

Kde:

$CHSK_{Cr,rozp.ZPAK}$ :  $CHSK_{Cr}$  v kapalně fázi dezintegrováného zahuštěného přebytečného aktivovaného kalu;  
 $CHSK_{Cr,rozp.PAK}$ :  $CHSK_{Cr}$  v kapalně fázi přebytečného aktivovaného kalu před dezintegrací;  
 $CHSK_{Cr,homogZPAK}$ :  $CHSK_{Cr}$  v homogenizovaném vzorku dezintegrováného zahuštěného přebytečného aktivovaného kalu.

U druhé metody se stupeň dezintegrace stanovuje jako poměr přírůstku množství rozpuštěných organických látek uvolněných dezintegrací do roztoku k celkovému množství organických látek uvolněných alkalickou hydrolyzou kalu před dezintegrací. Homogenizovaný směsný vzorek se podrobí alkalické hydrolyze a poté se stanoví  $CHSK_{Cr}$  kapalně fáze. Stanovení  $CHSK_{Cr}$  v kapalně fázi směsného vzorku je totožné s předchozí metodou. Touto metodou dosáhneme přibližně dvojnásobných hodnot ve srovnání s první metodou. [25]

Ve vzorci pro výpočet druhé metody jen  $CHSK_{Cr}$  kapalně fáze po alkalické hydrolyze homogenizovaného vzorku nahradí  $CHSK_{Cr,homogZPAK}$ . [25]

Uvedené metody lze aplikovat i na ostatní bioodpady.

### 4.3 Dezintegrační metody

Během evoluce si rostliny vytvořily pevnou lignocelulózovou strukturu, odolnou vůči nabourávání mikroorganismy. Úkolem dezintegračních metod je změnit vlastnosti materiálu tak, aby vnitřní pevnost rostlinných vláken byla co možná nejvíce narušena.

Někdy se předúpravy využívá také k hygienizaci fermentovaného materiálu nebo k minimalizaci množství výstupního stabilizovaného materiálu.

Během dezintegrace nesmí docházet k degradaci materiálu nebo k jeho znehodnocení znečištěním.

Jakákoli metoda dezintegrace musí být z principu velmi efektivní, protože z podstaty věci představuje dodatečné náklady. Obecně se uvádí, že při jejich použití se celkové nároky technologie na energii zvednou přibližně o jednu třetinu. To přispívá k jejich prozatímnímu využití pouze v laboratorním měřítku nebo v tzv. čistých biotechnologiích namísto využití v oblasti čištění odpadních vod a zpracování odpadů. [22][24][25]

#### 4.3.1 Mechanické metody

Patří zde dezintegrace mletím (vysokorychlostní kulový mlýn, dispersní mlýn, koloidní mlýn, nožový mlýn, úderový, diskový, válcový), drcením, mixováním, sekáním, stříháním, trháním, otíráním, působením úderu nebo tření. Dalšími mechanickými metodami jsou dezintegrace vysokotlakým homogenizátorem a dezintegrace v lyzátovací centrifuze. [17][24]



Při těchto metodách dochází ke zvětšení povrchu částic, a tudíž se při enzymatickém rozkladu zlepšuje přístup k organickým látkám.

Při kombinaci lámání, drcení a mletí se výsledná velikost částic pohybuje mezi 10 – 30 mm. Při kombinaci lámání a mletí se můžeme dostat na velikost částic 0,2 – 2 mm. Účinnost mechanické dezintegrace může dosáhnout 65 – 70 %. Tyto způsoby dezintegrace jsou velmi drahé, velmi energeticky náročné a s výjimkou lyzátovací centrifugy zatím provozně neaplikovatelné. [13][17][24]

### Mletí v kulovém mlýnu

Ve válcové mlecí komoře s vertikální nebo horizontální polohou na hřídeli rotují disky poháněné motorem. Komoře je téměř úplně naplněna korálky ze skla nebo umělé hmoty. Rotací míchadla se uvádějí do pohybu mlecí elementy a mletý materiál. Vzájemnými srážkami kuliček a jejich nárazy na stěnu mlecí komory dochází k dezintegraci mikroorganismů střížnými a tlakovými silami. Tento proces uvolňuje velké množství tepla.

Používá se k dezintegraci čistírenských kalů. Ty při kontinuálním provozu proudí přes komoru a mlecí kuličky jsou zachycovány na síti.

Účinnost procesu závisí na vložené energii, hydrodynamice míchání, rozměru kuliček, geometrii mlecí komory, teplotě procesu, hustotě upravované suspenze a zatížení. [27]

### Dezintegrace v lyzátovací centrifuzě

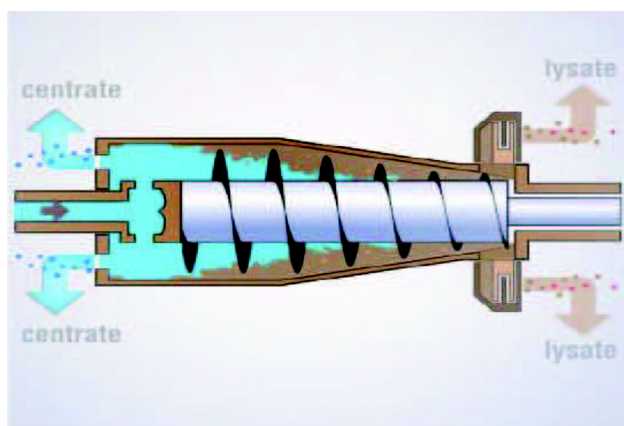
Jedná se o konstrukčně upravenou zahušťovací centrifugu, ve které destrukce buněk probíhá jako vedlejší proces. Rozrušovací zařízení ve formě soustavy speciálních nožů je vloženo do proudu vystupujícího z centrifugy. Není tedy zapotřebí použití speciálních samostatných zařízení. Tímto se počet rozrušených buněk podstatně zvýší a to bez zvýšení elektrického příkonu. Touto úpravou vznikne dvojúčelové (lyzace, zahušťování) zařízení využívající částečně přebytek kinetické energie centrifugy. Dochází k mechanickému rozrušení malé části buněk mikroorganismů střížnými silami.

Účinnost také závisí na parametrech centrifugy, na druhu rozrušovacího zařízení a na druhu a kvalitě zpracovávané biomasy. Výhodou je možnost dodatečné úpravy stávajících zahušťovacích centrifug na lyzátovací bez výrazných nákladů. [13][27]

Samotnou lyzátovací centrifugu naleznete na obr. 3 a schéma rozrušování na obr. 4.



Obr. 3: Lyzátovací centrifuga [33]



Obr. 4: Schéma rozrušování [24]

### Mletí v disperzních a koloidních mlýnech

Pro dezintegraci slabě vázaných aglomerátů a emulzí. Rozemílají upravovaný materiál na částice o velikosti přibližně 1  $\mu\text{m}$  za pomoci vysoké rychlosti střížných sil. Vlivem disipace energie se uvolňuje velké množství tepla. Koloidní mlýny jsou sestaveny z rotoru a statoru. Mezera mezi nimi je minimálně 25  $\mu\text{m}$ . Kuželovitý rotor má povrch hladký nebo vroubkovaný a otáčí se rychlostí přibližně 3600 ot/min. [27]

### Vysokotlaká homogenizace

„Vysokotlaký homogenizátor sestává z vícestupňového čerpadla a homogenizačního ventilu. Čerpadlo nasává suspenzi do pístového válce a stlačuje ji na tlak několik stovek barů, dosahující průtoku několika kubických metrů za hodinu. Suspenze prochází skrz štěrbinu, při čemž klesá tlak pod mez evaporace tekutiny, a rychlost tekutiny roste na 300 m/s. Když kavitační bubliny prasknou, gradient tlaku je zaveden do tekutiny a ten lokálně vyvolá teplotu stovek stupňů Celsia a tlakovou vlnu 500 x 10<sup>5</sup> Pa. Proces destrukce buněk při vysokém tlaku je téměř nezávislý na koncentraci biomasy. Velikost tlaku se řídí citlivostí k destrukci a ta závisí na druhu rozrušované biomasy.“ [27]

### Kavitace

Protlačování zmrzlé (-27 až -25 °C) buněčné pasty za velmi vysokého tlaku (550 MPa) přes malou štěrbinu. Je to velmi účinný způsob dezintegrace a současně zachovává vlastnosti zpracovávané hmoty. Poté, co se po průchodu materiálu dýzou uvolní tlak velká tlaková diference buňku roztrhne. [27]

### Dezintegrace mixováním

Jedná se o destrukci buněčných stěn přístroji na způsob mixérů. Při dezintegraci přebytečného aktivovaného kalu v laboratorních podmínkách na speciálním přístroji ULTRA-TURRAX® T 25 (viz obr. 5) bylo zjištěno, že rozsah desintegrace roste s rostoucími otáčkami a časem a že závisí na koncentraci nerozpuštěných látek v kalu. [27]



Obr. 5: Přístroj ULTRA-TURRAX® T 25 [28]

### 4.3.2 Chemické metody

Jedná se o velmi účinné metody hydrolýzy. Ta může probíhat v celém rozsahu pH. Látky reagují se sloučeninami buněčné stěny, což vede k jejich destrukci. Do této skupiny patří

působení alkálií, kyselin nebo oxidačních činidel a to samostatně, v kombinaci anebo v kombinaci s vyšší teplotou. Působením chemikálií se však do systému dostávají další nežádoucí složky. [17][22][23]

#### Rozklad kyselinami a hydroxidy

Při použití minerálních kyselin a zásad k destrukci buněk se kombinuje efekt chemické reakce s osmotickým šokem. „Při vysokých hodnotách pH média buňky ztrácí životaschopnost a nemohou udržovat vnitřní napětí. Buňky praskají a buněčný materiál se uvolní do roztoku, kde tak vzroste koncentrace proteinů. Když se pH v substrátu zvýší, povrch buněk se negativně nabije. Tím se vytváří elektrostatický odpor, který způsobuje desorpci některých částí extracelulárních polymerů. Alkálie reagují s buněčnými stěnami několika způsoby, jedním z nich je saponifikace lipidů buněčné stěny, která vede k rozpuštění membrány. Vysoké koncentrace alkálií vyvolají mnoho degradací včetně denaturace bílkovin. Tato metoda směřuje jak k rozrušení buněčné stěny, tak k rozbití uvolněných produktů. 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. Hydrolýzu lze realizovat v podstatě v celém rozsahu pH.“ [27]

#### Dezintegrace oxidací

Jedná se o úpravu substrátu ozónem. Ten nezatěžuje substrát žádnými chemikáliemi ani nezvyšuje koncentrace solí. „Ozón vyvolá současně částečnou oxidaci a hydrolýzu organické hmoty. Buněčné stěny mikroorganismů jsou rozrušeny a cytoplazma je rozpuštěna ve vodě. Látky nerozpustné ve vodě s vysokou molekulovou hmotností jsou rozštěpeny na menší, ve vodě rozpustné a rozložitelné fragmenty. Při ozonizaci také dochází ke snížení počtu patogenních mikroorganismů.“ [27]

#### Dezintegrace pomocí rozpouštědel

Metoda založená na destrukci buněčných stěn mikroorganismů organickými rozpouštědly jako butanol nebo toluen. Při aplikaci toluenu dochází k jeho absorpci do lipidů buněčných stěn. „Poté buňka nabobtná a praskne. Účinnost procesu závisí na teplotě a koncentraci rozpouštědla. Metoda je široce aplikovatelná, nevyžaduje konstrukci specializovaných zařízení a nezanáší zpracovávanou suspenzi cizími ionty. Použitá činidla jsou navíc poměrně levná.“ [27]

#### Dezintegrace detergenty

„Pro stabilitu vnější membrány Gramnegativních buněk je velmi důležitá přítomnost některých dvojmocných kationtů, zvláště  $Mg^{2+}$ . Účinnou složkou detergentů je anion kyseliny ethylendiamintetraoctové ( $EDTA^{4-}$ ), který vytváří vazbu s hořčnatými ionty, čímž dochází k destabilizaci nebo dokonce odstranění vnější membrány.“ [27]

### 4.3.3 Fyzikální metody

Mezi fyzikální metody patří termická hydrolýza, dezintegrace ultrazvukem, dezintegrace zmrazováním-rozmrazováním, ionizující záření, extruze, osmotické šoky a plazmové pulsy. [27]

## Dezintegrace ultrazvukem

Ultrazvuk je zvuk na horní hranici slyšitelnosti. Působením ultrazvuku na kapalné médium dochází k jeho periodickému stlačování a uvolňování. Při určité intenzitě dojde ke kavitaci, při které vytvářející se bublinky rostou a poté prudce explodují, což vyvolá velmi silné hydromechanické střížné síly v médiu obklopujícím bublinu. Tlak uvnitř praskajících bublinek může dosahovat několika set atmosfér a teplota roste až k 5000 K. Střížné síly poruší buněčné membrány i jiné buněčné struktury a rozpuštěné organické látky jsou uvolněny do roztoku. Nejeefektivnější frekvence stlačování a uvolňování je mezi 20 – 100 kHz.

Ultrazvukové zařízení se obvykle skládá z ultrazvukového generátoru, který zajišťuje změnu frekvence elektrického proudu z 50 Hz na danou frekvenci. Vysokofrekvenční proud je dále veden přes převodník s piezoelektrickým krystalem, jež převádí elektrickou frekvenci na zvukovou energii. Kovová (titanová) nebo keramická sonda poté rozvibrovává kapalinu.

Ultrazvuk nemůže rozrušit všechny buňky, není tedy vhodný k desinfekci. Lze jej ale snadno implementovat do stávajících zařízení, přičemž vychází ekonomicky i energeticky výhodněji ve srovnání s např. termickou hydrolýzou. Není totiž nutné linku vybavovat přídatnými nádržemi ani zařízeními na vysoký tlak a teplotu. [17][27]

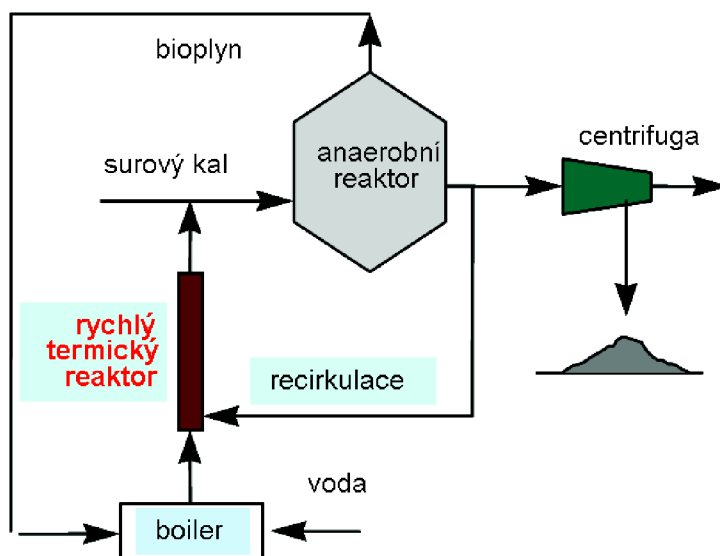


Obr. 6: Sonotródy pro dezintegraci ultrazvukem [26]

## Termická hydrolýza

Zpracovávaná surovina se za vysokého tlaku zahřeje na vysokou teplotu a poté náhle obě veličiny poklesnou, což způsobí hydrolýzu proteinů, uhlovodíků, tuků a dalších makromolekul vylučovaných z buňky.

Pro praxi je vhodná metoda rychlé termické kondicionace biomasy (viz obr. 7), kdy se materiál v termickém reaktoru na teplotě 100 – 200 °C a tlaku 0,1 – 1,3 MPa zdrží jen pár sekund, než dojde k opětovnému poklesu. To vede k destrukci buněk a k vylití buněčného obsahu do roztoku. „Díky krátké době působení vysoké teploty nedochází k úplné inaktivaci enzymů a stimulačních faktorů, přestože stupeň dezintegrace buněk mikroorganismů je vysoký.“ Při využití této metody u bioplynové stanice je možno anaerobní reaktor vyhřívat teplem z termické hydrolýzy. Pro termickou hydrolýzu je potřeba jen 10% produkované energie bioplynu, zbytek je možno využít v kogenerační jednotce nebo k sušení stabilizovaného substrátu. Vedle mechanických metod je tato v praxi jednou z nejpoužívanějších. [13][27]



Obr. 7: Schéma rychlé termické kondičiac biomasy [26]

### Dezintegrace zmrazováním a rozmrazováním

Během zmrazování dochází k utváření ledových krystalků uvnitř buňky. Ty vlivem většího objemu buněčné obaly roztrhají. Při opakovaném zmrazování a rozmrazování vznikají postupně větší a větší krystalky, které vedou k větší destrukci. Z roztržených buněk se do roztoku uvolňuje buněčný lyzát. [27]

### Dezintegrace extruzí

Jedná se o vysokoteplotní proces. V extrudéru je fytomase dodána teplo a mechanická energie, což způsobí fyzikálně-chemické proměny jeho struktury. Zvýšení tlaku dosáhneme přívodem horké páry do reaktoru. Po zdržení 1 – 30 minut na vysokém tlaku za daných podmínek následuje prudké uvolnění většinou na atmosférický tlak. Při tomto způsobu dezintegrace nedochází k výrazným změnám velikosti částic, ale dochází k hlubokému narušení rostlinných vláken až po samotné buňky. Po extruzi se sníží viskozita materiálu. Při správně nastavených parametrech (tlak, doba zdržení, hydromodul) buňky začnou kavitovat. To znamená, že se uvnitř buněk vytvoří bublinky vakua či okolního plynu a náhlým poklesem tlaku následně rostlinné buňky implodují a do jejich prostoru difundují páry plynů z okolní kapalné fáze. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, bublina plynů imploduje a vzniklá tlaková vlna má destruktivní účinky na okolní materiál.

Je-li celý proces dobře nastaven, výrazně zvyšuje přístupnost celulósových vláken a tím rozložitelnost polysacharidů na monosacharidy bez degradace materiálu. [17][24]

### Vysokovýkonná pulzní metoda

„Vysokovýkonná pulzní metoda je elektro-hydraulická metoda. Kal je upravován vysokým napětím (až 10 kV). Při tomto napětí dojde k výboji mezi dvěma elektrodami s periodou pulsu 10 ms. To vyvolává šokové vlny v kalu, které zapříčiní destrukci buněčných stěn. Dochází k okamžitému uvolnění organických látek.“ [27]

#### 4.3.4 Biotechnologické metody

Přidávání vhodných enzymů nebo mikroorganismů, napomáhajících rychlejší hydrolýze. Nejvíce jsou vhodné pro úpravu lignocelulózních materiálů. Používají se komerčně vyráběné enzymy, např. celulózy, také mikroorganismy s vysokou celulóзовou aktivitou - bachorové kultury anebo anaerobní houby. Při použití celulóз neexistuje jednoznačná metodika jejich aplikace, která by zaručovala deklarované výkonnosti, neboť výrobky různých producentů vykazují různé vlastnosti. Je také potřeba zajistit pravidelné dávkování enzymů, jejichž cena je poměrně vysoká. [17][22]

##### Enzymatická lyze a autolýza

Při aplikaci enzymů dojde k rozštěpení vazeb sloučenin buněčné stěny. Enzymy mohou narušovat dokonce i velmi odolné Grampozitivní bakterie. Tuto metodu je vhodné kombinovat s mechanickou dezintegrací, při které dojde k uvolnění enzymů ve vnitrobuněčném prostředí. Ty dále prohlubují dezintegraci. Nejúspěšněji jsou zatím enzymy používány při anaerobní stabilizaci vysoce lignocelulózních materiálů. Při aplikaci enzymů do aktivovaného kalu může dojít k degradaci enzymů ještě před samotnou hydrolýzou. [27]

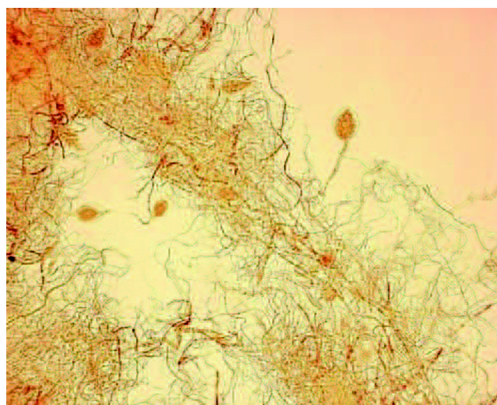
##### Lysozomy

Buněčné sekreční váčky, tzv. lysozomy obsahují škálu enzymů schopných hydrolyticky štěpit makromolekuly. Lysozomy slouží k rozkladu cizorodých struktur a opotřebených molekul buněk. Při zániku buňky lysozomy prasknou a uvolní enzymy. Ty lze využít při přípravě lyzátu k rozrušení buněk mikroorganismů přítomných ve zpracovávaném substrátu. S úspěchem lze využívat taktéž schopnosti živých buněk rozkládat bakterie pomocí svých lysozomů. [27]

##### Dezintegrace pomocí anaerobních hub

„Problémem bioplynových stanic na rostlinnou biomasu je především nízká účinnost způsobená špatnou rozložitelností rostlinných materiálů. Tato nevýhoda se dosud řeší hlavně prodlužováním doby zdržení ve fermentorech. To ale vede ke stavbě velkoobjemových fermentorů s vysokými požadavky na investice i na energii.“ Novou možnost řešení tohoto problému nabízí metoda aplikace anaerobních hub (viz obr. 8).

Tato metoda je založena na aplikaci mikroorganismů se zvýšenou celulóзовou aktivitou přímo do anaerobního fermentoru. V něm je nutné zajistit takové podmínky, aby mohly aktivně koexistovat s ostatními mikroorganismy fermentace. Anaerobní houby se vyskytují v zaživačích traktech býložravců, kde významným způsobem ovlivňují bachorový metabolismus. Pro svůj život potřebují prostředí o teplotě 35 – 40 °C s pH mírně alkalickým. Jejich produkty jsou vodík, CO<sub>2</sub>, mastné kyseliny aj. Ty je třeba ze systému odstraňovat. O to se ve fermentorech starají metanogenní mikroorganismy, pro něž je to vítaný substrát. Houby obsahují enzymy důležité pro rozklad celulóзы a hemicelulóзы. Tyto enzymy umožňují houbám rozrušit strukturu rostlinné biomasy, pronikat hluboko do rostlinného pletiva a odkrývat fermentační substráty jinak nedostupné pro povrchově působící anaerobní bakterie a kolonizovat a degradovat i vysoce odolná pletiva. To vede ke zvýšení celkové rozložitelnosti biomasy a ke zvýšení produkce bioplynu. Účinnost degradace anaerobními houbami je dokonce vyšší než u komerčně připravovaných enzymatických preparátů vyráběných z aerobních hub. [29]



Obr. 8: Houba *Anaeromyces mucronatus* KF4 ve světelném mikroskopu [29]

#### 4.3.5 Porovnání dezintegračních metod

Vysoká cena a náročnost na zařízení brání převážné většině metod, aby se více uplatnily v praxi. [17]

Největší účinnost destrukce a neaktivnější lyzát vykazují metody mechanické destrukce, opakované zmrazování a rozmrazování, ultrazvuková dezintegrace a termická hydrolýza. Naopak lyzátovací centrifuga má účinnost poměrně nízkou (viz tab. 7) avšak její pořízení a provoz jsou provozně nejefektivnější ze všech dnes známých dezintegračních metod. To přispívá k tomu, že je vedle termická hydrolýzy v provozu nejvíce aplikovnou metodou. Nadějně se jeví použití dezintegrace ultrazvukem a biologickými metodami. Avšak jejímu většímu rozšíření brání vyšší investiční a provozní náklady a u biologických metod také nejednoznačná metodika jejich účinné aplikace. [22][27]

Tab. 7: Přehled dosud provozně zkoušených metod dezintegrace a jejich účinek na proces anaerobní stabilizace kalů. [27]

Metoda dezintegrace	Dosahovaná účinnost dezintegrace [%]	Zvýšení stupně rozkladu [%]
Lyzátovací zahušťovací centrifuga	2,5-15	10-20
Homogenizátor	až 25*	~30
Ultrazvuk	až 40*	~30
Kulový mlýn	až 30*	~20
Termická kondicionace (170°C)	až 40*	30-40

\* účinnost lyzace závisí na vložené energii

## 5 Praktická část

K prokázání vlivu dezintegrace vstupního materiálu na produkci metanu při anaerobní fermentaci byla jako vstupní surovina použito pivovarské mláto (viz obr. 9) ze soukromého minipivovaru Richard v Brně - Žebětíně, doplněné o inokulum, vyhnílý kal (viz obr. 10) z ČOV v Brně - Modřicích.

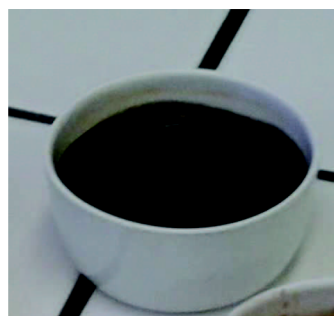
Pivovarské mláto je scezeným vedlejším produktem po vyluhování šrotovaného sladovnického ječmenu. Obsahuje pluchy a jejich úlomky, vysrážený bílkovinný kal a další suspendované látky. V čerstvém nebo suchém stavu se využívá jako nutričně bohaté krmivo pro dobytek. Zvláště v letních měsících podléhá rychle zkáze. Jeho konzervace se provádí silážováním, čímž získáme vhodné krmivo na zimu. [30]

Čistírenský kal je suspenze pevných látek a agregovaných koloidních látek původně přítomných v odpadních vodách. Při měřeních byl do systému přidáván jako zdroj bakterií, podporujících produkci bioplynu. Tento kal bylo taktéž nutné neustále dovážet čerstvý.

Rychlá kazivost a změna vlastností měla za následek nutnost neustále pro experimenty dovážet čerstvé mláto a čistírenský kal, což bylo velice časově náročné.



Obr. 9: Pivovarské mláto



Obr. 10: Čistírenský kal

### 5.1 Vlastnosti použitých materiálů

Pro možnost vyhodnocení vlivu dezintegrace na produkci bioplynu byl u vstupních surovin stanoven obsah sušiny a ztráta žíháním (viz kap. 5.1.1) a u mláta byla sledována granulometrie v původním i dezintegrovaných vzorcích (viz kap. 5.1.2). Pro úplnost a možnost porovnání s experimentem byla vypočtena teoretická produkce bioplynu na základě literárních dat (viz kap. 5.1.3).

#### 5.1.1 Stanovení podílu sušiny v materiálu a ztráty žíháním

V každém dovezeném materiálu byl stanoven podíl sušiny a ztráta žíháním. Sušení vzorků probíhalo při teplotě 105 °C (dle ČSN 44 1375) po dobu 25 hodin. Žíhání vzorků probíhalo při teplotě 550 °C (dle ČSN EN 15169) po dobu 2 hodin.

Na obr. 11 si můžete prohlédnout vzorky mláta a kalu určené k vysušení v sušárně (viz obr. 12) a následnému vyžíhání v žíhací peci (viz obr. 13)





Obr. 11: Vzorky určené k vysušení



Obr. 12: Sušárna



Obr. 13: Žihací pec

V tab. 8 jsou uvedeny stanovené obsahy sušiny a ztráta žiháním (jedná se o průměry ze dvou vzorků). Průměrná sušina v mlátě se během měření pohybovala okolo 19,898 % a ztráta žiháním okolo 95,042 %. Odebíraný kal obsahoval v průměru 3,428 % sušiny a ztráta žiháním činila průměrně 58,843 %.

Tab. 8: Obsah sušiny a ztráta žiháním v jednotlivých materiálech

Číslo materiálu	Datum	Mláto		Kal	
		Sušina [%]	Zž [% suš]	Sušina [%]	Zž [% suš]
1	17. 1. 2012	21,695	95,023	3,296	56,67
2	1. 2. 2012	16,875	95,062	3,169	57,083
3	29. 2. 2012	20,101	95,927	3,112	57,924
4	29. 2. 2012	18,591	94,827	3,162	57,053
5	21. 3. 2012	21,893	94,441	4,765	65,484
6	28. 3. 2012	20,234	94,971	3,062	58,844

### 5.1.2 Síťová analýza

Ze všech existujících metod dezintegrace byla pro mou diplomovou práci zvolena mechanická dezintegrace mixováním, která je v laboratorních podmínkách nejméně technicky náročná a tudíž i nejdostupnější. Jako dezintegrační jednotka byl použit dvourychlostní elektrický kuchyňský mixér Severin SM – 3713 o příkonu 450 W.

Granulometrické složení jsem měřil na třech vzorcích (viz obr. 14):

1. Surové mláto
2. I. Stupeň dezintegrace - mixováno po dobu 10 s na první rychlostní stupeň
3. II. Stupeň dezintegrace - mixováno po dobu 30 s na první rychlostní stupeň

Pro potřeby síťové analýzy pivovarského mláta bylo nutné vzorky mláta nejprve vysušit v sušárně při teplotě 105 °C. Vlhké mláto totiž tvoří agregáty částic, tudíž by se jen obtížně od sebe oddělovala jednotlivá zrna a neprocházela by síty síťovačky. Dokonce by mohlo docházet k upínání ok v sítích.



Obr. 14: Jednotlivé stupně dezintegrace mláta. (Zleva: surové, I. stupeň dezintegrace, II. stupeň dezintegrace)

Před každým síťováním bylo ještě u všech vzorků provedeno změření sypné hustoty materiálu. Nejdříve byl zvážen odměrný válec, do kterého bylo pak nasypáno určité množství vysušeného mláta. Po jeho zvážení, odečtení hmotnosti válce a zarovnání povrch nasypaného mláta byl bez setřásání odečten objem mláta. Z naměřených údajů byla pak vypočítána sypná hustota daného materiálu (rov. 2).

Objemovou hustotu se stanovit nepodařilo. Při ní je sledován nárůst objemu vody po nasypání určité hmotnosti vzorku materiálu. Jelikož byly vzorky vysušeny, plavalo mláto po nasypání do vody na hladině a k žádnému nárůstu objemu vody tedy nedošlo.

Sítovaný vzorek byl vždy vytvořen takzvaným kvartováním, při kterém je materiál nasypán na podložku a pravítkem rozdělen křížem na čtyři stejné hromádky. Jedna z těchto hromádek byla odebrána a zvážena na vahách Sartorius. Takto získaný vzorek by měl co možná nejlépe kvalitativně odpovídat celku, ze kterého je odebrán. Vlastní měření granulometrického složení bylo prováděno na digitální laboratorní síťovače Retsch AS 200 (viz obr. 15).



Obr. 15: Síťovačka Retsch AS 200

Sestavil jsem si sadu následujících čtyř sít se stranou oka  $l_i$ :

- |         |                         |
|---------|-------------------------|
| 1. síto | $l_1 = 2 \text{ mm}$    |
| 2. síto | $l_2 = 1 \text{ mm}$    |
| 3. síto | $l_3 = 500 \mu\text{m}$ |
| 4. síto | $l_4 = 250 \mu\text{m}$ |

Každý vzorek byl síťován po dobu 2 minut při amplitudě kmitů 1,5 mm/“g“. Po skončení síťování byla sestava rozebrána, jednotlivé frakce včetně podsítného na propadové misce zváženy na laboratorních vahách a následně proveden rozbor granulometrického složení (viz tab. 9 – 11).

Vzorce pro výpočet jednotlivých parametrů při měření granulometrie síťováním

Pro zjednodušení vycházíme z předpokladu, že částice mláta jsou kulovitého tvaru, i když ve skutečnosti jsou ve vzorcích částice jak kulovité, tak i šupinkovité, tyčinkovité aj. V případě uvažování jiných než kulovitých částic by bylo nutné do výpočtů zahrnout opravné koeficienty. Jejich hodnoty nejsou konstantní, ale mění se s velikostí částic a druhem materiálu.

Sypná hustota [31]:

$$\rho_s = \frac{m_M}{V_{vzM_i}} \quad \begin{array}{l} m_M - \text{hmotnost vysušeného mláta} \\ V_{vzM_i} - \text{objem vysušeného mláta} \end{array} \quad (2)$$

Střední velikost částic [31]:

$$d_i = \frac{l_{i-1} + l_i}{2} \quad l_i - \text{délka strany oka síta} \quad (3)$$

Hmotnostní zlomek frakce [31]:

$$w_i = \frac{m_i}{m} \quad \begin{array}{l} m_i - \text{hmotnost frakce} \\ m - \text{celková hmotnost síťovaného} \\ \text{materiálu} \end{array} \quad (4)$$

Střední prosevný průměr částic [32]:

Je to takový průměr částice, který násobený počtem částic dá stejný lineární rozměr jako je součet průměru všech částic obsažených ve vzorku.

$$d_s = \frac{\sum_i^n \frac{w_i}{d_i^2}}{\sum_i^n \frac{w_i}{d_i^3}} \quad \begin{array}{l} d_i - \text{střední velikost částic} \\ w_i - \text{hmotnostní zlomek frakce} \end{array} \quad (5)$$

Střední povrchový průměr částic [32]:

Je to takový průměr částice, jejíž povrch násobený počtem částic dá stejný povrch jako povrch všech částic obsažených ve vzorku.

$$d_p = \sqrt{\frac{\sum_i^n \frac{w_i}{d_i}}{\sum_i^n \frac{w_i}{d_i^3}}} \quad \begin{array}{l} d_i - \text{střední velikost částic} \\ w_i - \text{hmotnostní zlomek frakce} \end{array} \quad (6)$$

Střední objemový průměr částic [32]:

Je to takový průměr částice, který násobený počtem částic dá stejný objem jako je objem všech částic obsažených ve vzorku.

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{\sum_i^n w_i}{\sum_i^n \frac{w_i}{d_i^3}}} \quad \begin{array}{l} d_i - \text{střední velikost částic} \\ w_i - \text{hmotnostní zlomek frakce} \end{array} \quad (7)$$

Stupeň zdrobnění [31]:

$$S_i = \frac{d_{s0}}{d_{si}} \quad S_i = \frac{d_{s(i-1)}}{d_{si}} \quad d_s - \text{střední prosevný průměr} \quad (8)$$

Tab. 9: Granulometrické složení surového mláta

Frakce	$l_i$ [mm]	$m_i$ [g]	$d_i$ [mm]	$w_i$ [-]	$w_i/d_i$ [mm <sup>-1</sup> ]	$w_i/d_i^2$ [mm <sup>-2</sup> ]	$w_i/d_i^3$ [mm <sup>-3</sup> ]
1	2	28,758	3	0,646	0,215	0,072	0,024
2	1	12,434	1,5	0,279	0,186	0,124	0,083
3	0,5	2,582	0,75	0,058	0,077	0,103	0,138
4	0,25	0,491	0,375	0,011	0,029	0,078	0,209
5	Propad	0,243	0,125	0,005	0,044	0,349	2,795
	Σ	44,508	-	1	0,552	0,727	3,249

Tab. 10: Granulometrické složení mláta v I. stupni dezintegrace

Frakce	$l_i$ [mm]	$m_i$ [g]	$d_i$ [mm]	$w_i$ [-]	$w_i/d_i$ [mm <sup>-1</sup> ]	$w_i/d_i^2$ [mm <sup>-2</sup> ]	$w_i/d_i^3$ [mm <sup>-3</sup> ]
1	2	14,995	3	0,362	0,121	0,04	0,013
2	1	16,682	1,5	0,403	0,269	0,179	0,119
3	0,5	6,723	0,75	0,162	0,216	0,289	0,385
4	0,25	2,196	0,375	0,053	0,141	0,377	1,006
5	Propad	0,813	0,125	0,02	0,157	1,257	10,05
	Σ	41,409	-	1	0,904	2,142	11,58

Tab. 11: Granulometrické složení mláta ve II. stupni dezintegrace

Frakce	$l_i$ [mm]	$m_i$ [g]	$d_i$ [mm]	$w_i$ [-]	$w_i/d_i$ [mm <sup>-1</sup> ]	$w_i/d_i^2$ [mm <sup>-2</sup> ]	$w_i/d_i^3$ [mm <sup>-3</sup> ]
1	2	9,307	3	0,225	0,075	0,025	0,008
2	1	16,082	1,5	0,389	0,259	0,173	0,115
3	0,5	10,445	0,75	0,253	0,337	0,449	0,599
4	0,25	3,966	0,375	0,096	0,256	0,682	1,82
5	Propad	1,532	0,125	0,037	0,297	2,372	18,98
	$\Sigma$	41,332	-	1	1,224	3,702	21,52

Stanovení sypné hustoty jednotlivých vzorků:

Hmotnost vzorků mláta:

$$m_{M1} = 0,008954 \text{ kg}$$

$$m_{M2} = 0,01145 \text{ kg}$$

$$m_{M3} = 0,012954 \text{ kg}$$

Objem vzorků mláta:

$$V_{M1} = 0,000051 \text{ m}^3$$

$$V_{M2} = 0,000061 \text{ m}^3$$

$$V_{M3} = 0,000058 \text{ m}^3$$

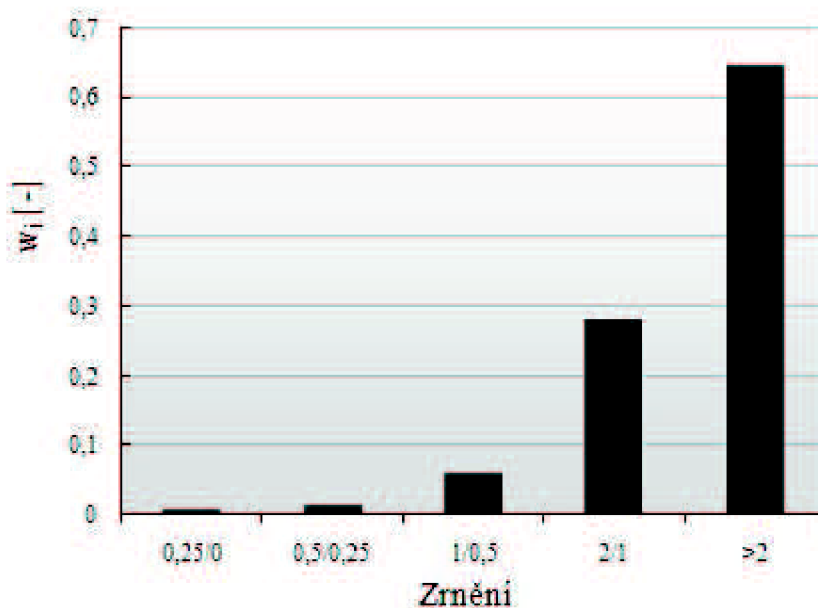
$$\rho_{V1} = \frac{m_{M1}}{V_{vzM1}} = \frac{0,008954}{0,000051} = 175,569 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{V2} = \frac{m_{M2}}{V_{vzM2}} = \frac{0,01145}{0,000061} = 187,7049 \text{ kg/m}^3$$

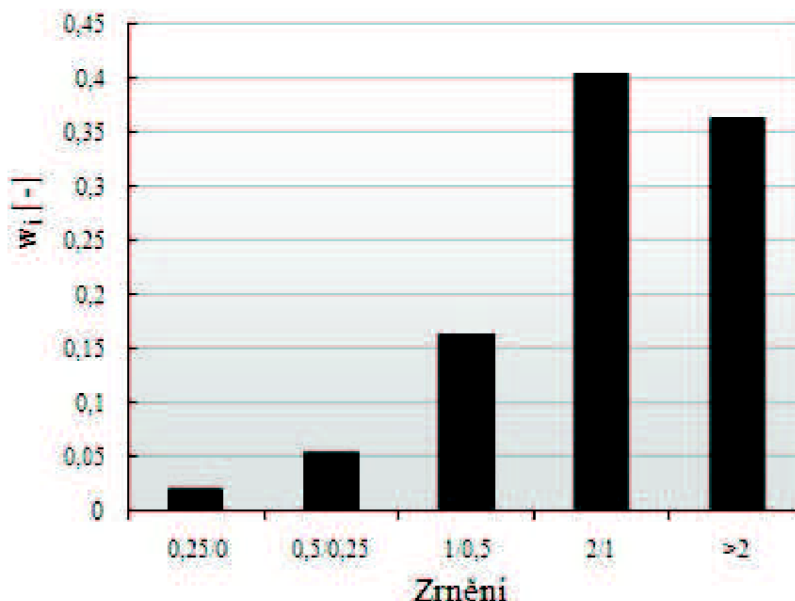
$$\rho_{V3} = \frac{m_{M3}}{V_{vzM3}} = \frac{0,012954}{0,000058} = 223,3448 \text{ kg/m}^3$$

Po vypočítání sypné hustoty jednotlivých vzorků vidíme, že sypná hustota s rostoucí mírou dezintegrace mláta roste. Tuto závislost potvrzuje i graf 7 .

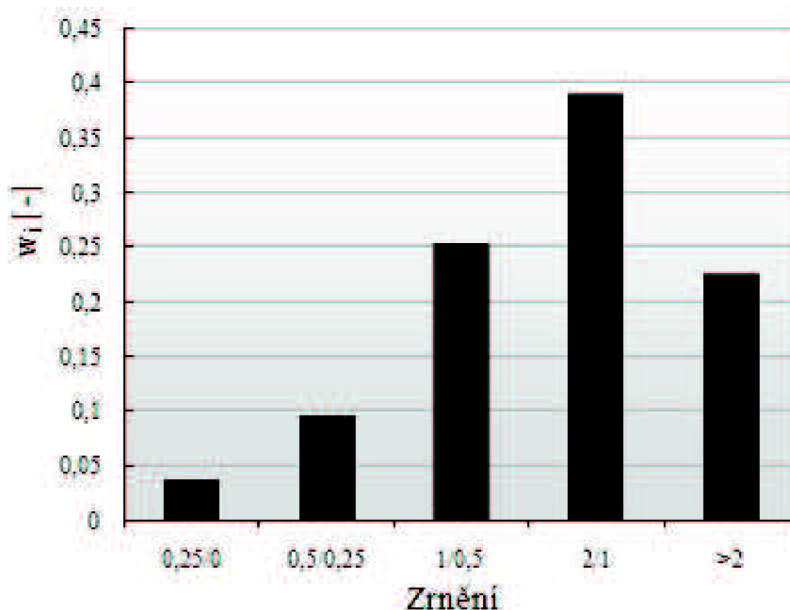
Graf 3: Histogram surového mláta



Graf 4: Histogram mláta v prvním stupni dezintegrace



Graf 5: Histogram mláta ve druhém stupni dezintegrace



Změnu granulometrického složení můžeme pozorovat na sloupcových histogramech (graf 3 – 5). V prvním vzorku převažovala s více než 60 % zastoupením frakce větší než 2 mm, naopak podíl frakcí menších než 0,5 mm byl ve vzorku zanedbatelný. U druhého vzorku již největší část tvořila frakce 2/1 mm. Podíl největší frakce se zmenšil na necelých 40 % a lehce narostl podíl menších frakcí. Ve třetím vzorku tvořila největší část taktéž frakce 2/1 mm. Její zastoupení bylo přibližně stejné, jako u druhého vzorku. Podíl menších frakcí zde ale opět narostl na úkor největší frakce.

Výsledky granulometrických rozborů jednotlivých vzorků mláta potvrzují s prodlužující se dobou mixování neustálé zdrobňování částic.

Tab. 12: Závislost parametrů mletého materiálu na čase mletí

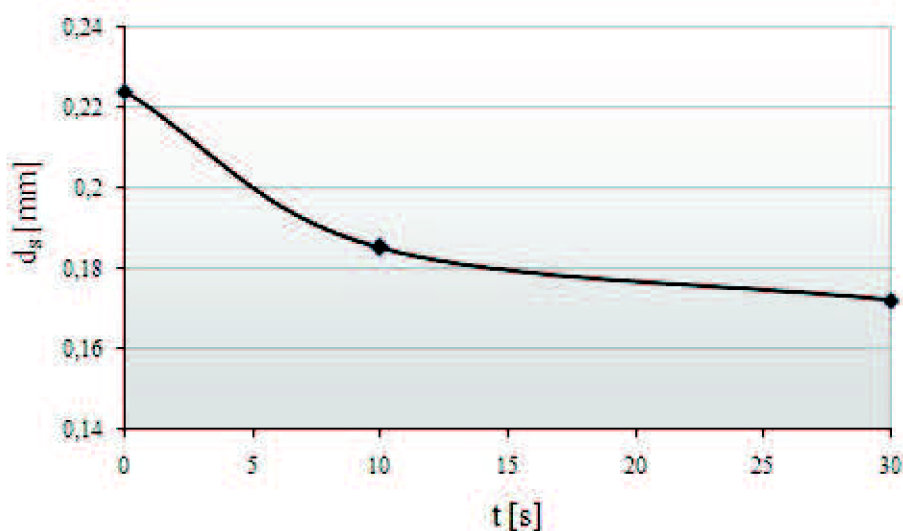
Stupeň dezintegrace mláta	t	$d_s$	$d_p$	$d_v$	$S_i$	$S_i^{\sim}$	$\rho_v$
	[s]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[kg/m <sup>2</sup> ]
Surové	0	0,224	0,412	0,675	1	1	175,6
I. stupeň	10	0,185	0,279	0,442	1,209	1,209	187,7
II. stupeň	30	0,172	0,238	0,36	1,301	1,076	223,3

Velikost středního prosevního průměru (viz graf 6), stejně jako středního povrchového průměru a středního objemového průměru se během mixování zmenšují. Naopak hodnoty stupně zdrobnění se mixováním zvětšují.

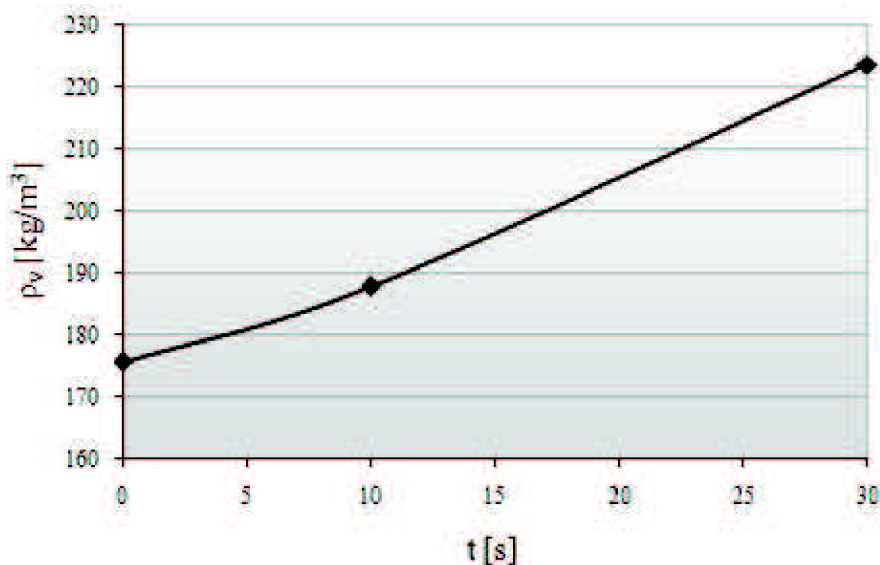
Pro přesnější vykreslení závislosti by však bylo potřeba provést analýzu granulometrie většího počtu vzorků s nejrůznější dobou mixování.

Závislosti všech parametrů materiálů na době mletí dobře vystihují logické předpoklady.

Graf 6: Závislost středního prosevního průměru  $d_s$  na době mletí  $t$



Graf 7: Závislost sypné hustoty  $\rho_v$  na době mletí  $t$



### 5.1.3 Výpočet předpokládané produkce bioplynu

Na základě nalezených tabulkových údajů o výtěžnosti jednotlivých substrátů se pokusíme vypočítat, jaká by měla být teoretická produkce bioplynu ze surového mláta při zde uvedených pokusech. Vsádku mláta a kalu do fermentoru uvažujeme stejnou jako bude při všech experimentech, tedy vždy 100 g a jako obsah sušiny uvažují mnou naměřené průměrné hodnoty ze všech materiálů.

Tabulková výtěžnost bioplynu z mláta [21]:	$Výt_{tabM} = 120 \text{ m}^3/\text{t suš}$
Tabulková výtěžnost bioplynu z kalu [21]:	$Výt_{tabK} = 30 \text{ m}^3/\text{t suš}$
Průměrný obsah sušiny v mlátu:	$Suš_M = 19,898 \%$
Průměrný obsah sušiny v kalu:	$Suš_K = 3,419 \%$

Jelikož známe hodnoty tabulkové výtěžnosti na 1 t sušiny, převedeme si tunu na gramy a následně vypočteme teoretickou výtěžnost bioplynu z mláta a také z kalu.

$$Výt_M = \frac{Výt_{tabM}}{1000000[\text{g}]} \cdot Suš_M \quad (9)$$

$$Výt_M = \frac{120}{1000000} \cdot 19,898 = 0,00238776 \text{ m}^3 = 2387,76 \text{ ml}$$

$$Výt_K = \frac{Výt_{tabK}}{1000000[\text{g}]} \cdot Suš_K \quad (10)$$

$$Výt_K = \frac{30}{1000000} \cdot 3,419 = 0,00010257 \text{ m}^3 = 102,57 \text{ ml}$$

Celkovou teoretickou výtěžnost bioplynu ze směsi 100 g mláta a 100 g kalu dostaneme ze sumy výtěžností bioplynu z mláta a kalu.

$$Výt_{Celk} = Výt_M + Výt_K \quad (11)$$

$$Výt_{Celk} = 2387,76 + 102,57 = 2490,33 \text{ ml}$$

Teoreticky by se při mé fermentaci surového mláta s kalem mělo uvolnit okolo 2490 ml plynu, v závislosti na množství sušiny a organických látek v daných materiálech. Při fermentaci dezintegrovaného mláta lze předpokládat, že uvolněného bioplynu by mělo být ještě více.

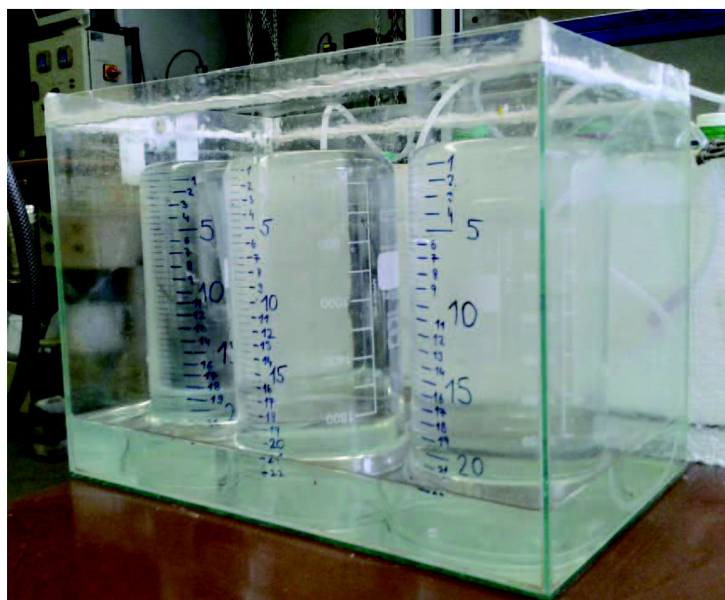


## 5.2 Popis aparatury

Pro účely pokusu byla sestrojena vhodná aparatura. Ta se původně skládala ze tří upravených mixérků, sloužících jako fermentory, avšak po pár neúspěšných pokusech o jejich utěsnění byly nakonec za fermentory použity 0,5 l PET láhve. Jednalo se o vsádkové fermentory bez míchání. Ve víčku PET láhvi byl vyvrtán otvor a jím prostrčena a utěsněna plastová hadička průměru 0,5 mm. Na ní byl nasazen T kus, ze kterého vedla první hadička do skleněného plynojemu a druhá hadička sloužící k odběru vzorků vytvořeného bioplynu, ukončená „škrτίtkem“.

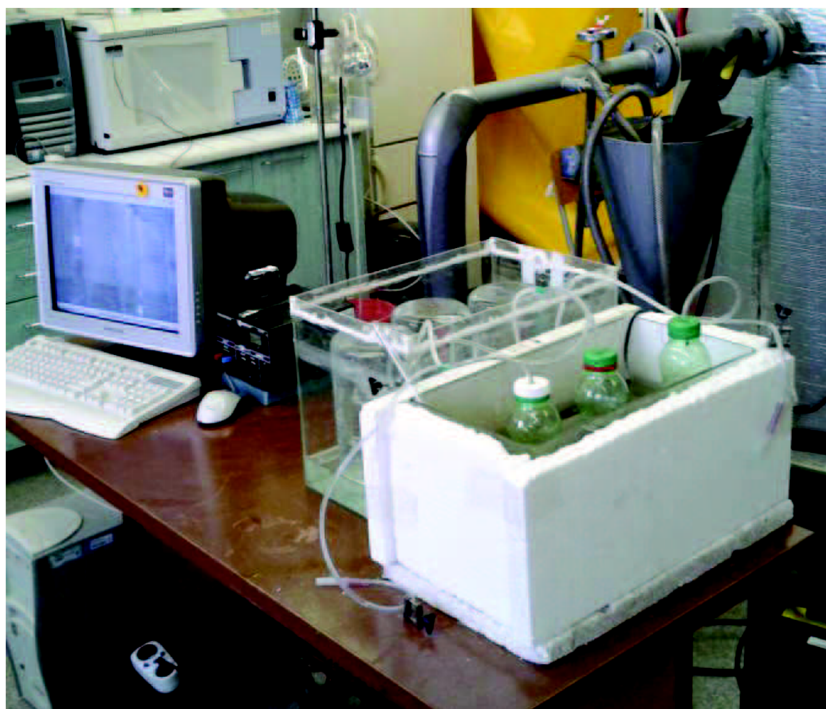
Jako plynojemy sloužily skleněné kádinky o objemu 2000 ml, umístěné dnem vzhůru do akvária s vodou. Na kádinky byla pro přesnější odečítání naměřených údajů odměřena a dokreslena podrobnější stupnici (viz obr. 16).

Fermentory byly umístěny taktéž do zvláštního akvária s vodou, která byla akvariijním topným tělesem ohřívána na stálých 40 °C, kontrolovaných na teploměru. Fermentace byla tedy provozována v mezofilním teplotním režimu. Aby se zamezilo úniku tepla z akvária, bylo navíc oblepeno polystyrenem a přikryto krytem. (viz obr. 17)



Obr. 16: Plynojemy

Pro zajištění dostatečného množství naměřených údajů byly plynojemy snímány web kamerou napojenou na počítač, který pomocí programu Fergo pravidelně ukládal aktuální dění na obrazovce do počítače. Aby bylo možné pokus sledovat i přes noc, osvětlovalo jej ještě světlo, napojené na časový spínač.



Obr. 17: Pohled na celou aparaturu (bez horního krytu)

### 5.3 Popis experimentu

Celkem bylo provedeno šest experimentů, při kterých byl zkoumán vliv tří stupňů dezintegrace mláta, popsaných v kap. 5.1.2, na produkci bioplynu. Vždy tedy po dvou experimentech od každého stupně dezintegrace. Při pokusech bylo anaerobně fermentováno nejdříve surové mláto a poté mláto dezintegrované ve dvou různých stupních. Jak již bylo výše popsáno, dezintegrace byla zvolena metodou mixování na elektrickém kuchyňském mixéru Severin SM-3713 (viz obr. 20).

Všechny tři fermentory byly vždy naplněny stejnou náplní. Tu tvořilo přibližně 100 g pivovarského mláta o různých stupních dezintegrace, 100g čistírenského kalu a 55 g vody, která byla přidávána kvůli naředění husté směsi. Jednotlivé složky tedy byly zastoupeny v poměru 39 % mláto, 39 % kal a 22 % voda. Jednalo se tedy o tzv. mokrou fermentaci.

Směs byla vždy připravována ve třech kádinkách (viz obr. 18) a odvažována na laboratorních vahách Denver Instrument SI-603 (viz obr. 19) s maximálním zatížením 600 g a čitelností 1 mg a až poté s ní naplněny fermentory.



Obr. 18: Kádinky s namíchanou směsí



Obr. 19: Laboratorní váhy



Obr. 20: Mixér Severin SM - 3713

Během příprav experimentů bylo zkoušeno jak dlouho náplň ve fermentorech ponechat, tedy po jakou dobu se bude bioplyn uvolňovat. Byly provedeny zkoušky, při kterých byl materiál fermentován týden i čtrnáct dní, ovšem kromě prvního dne už k vývinu dalšího plynu nedocházelo. Jednotlivé experimenty tedy byly prováděny pouze po dobu 24 hodin.

## 5.4 Naměřené stavy bioplynu při jednotlivých experimentech

### 5.4.1 Fermentace surového mláta

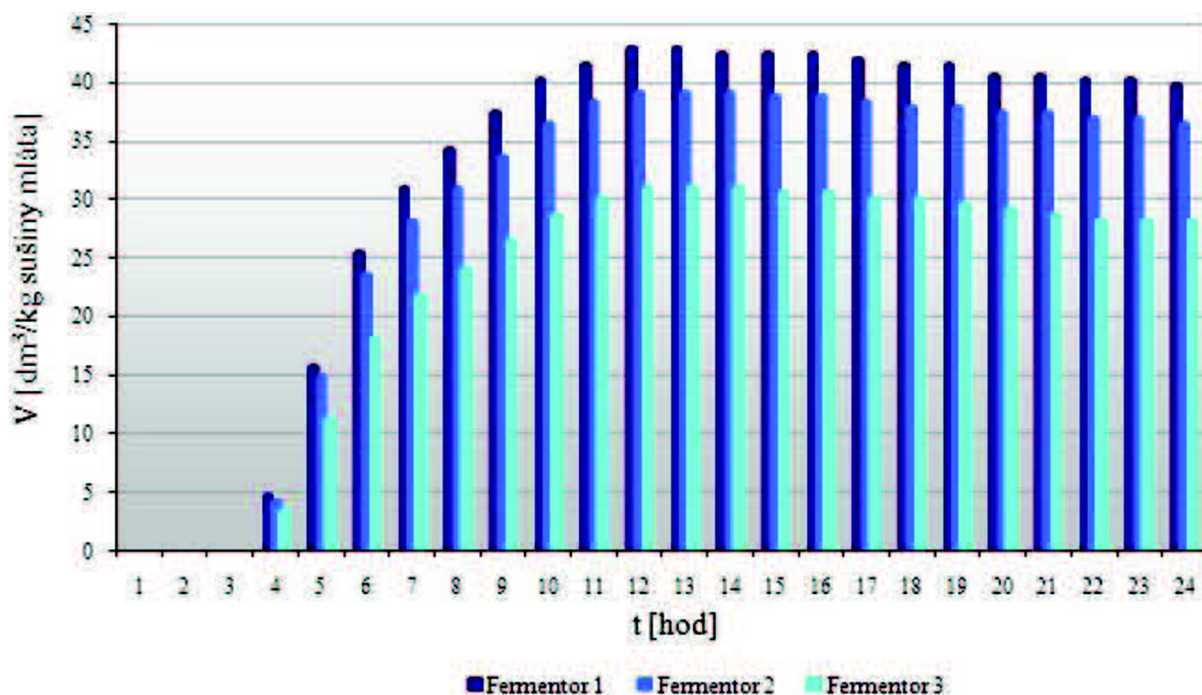
Pokus č. 1 – 24. 1. 2012

Materiál č. 1

		F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]:	Mláto	100,124	100,215	100,209
	Kal	100,019	100,025	100,07
	Voda	55,2	55,04	55,019
	Σ	255,343	255,28	255,298

Množství uvolněného bioplynu při pokusu č. 1 můžete vidět na grafu 8.

Graf 8: Srovnání množství uvolněného bioplynu na 1 kg sušiny mláta z jednotlivých fermentorů při prvním pokusu



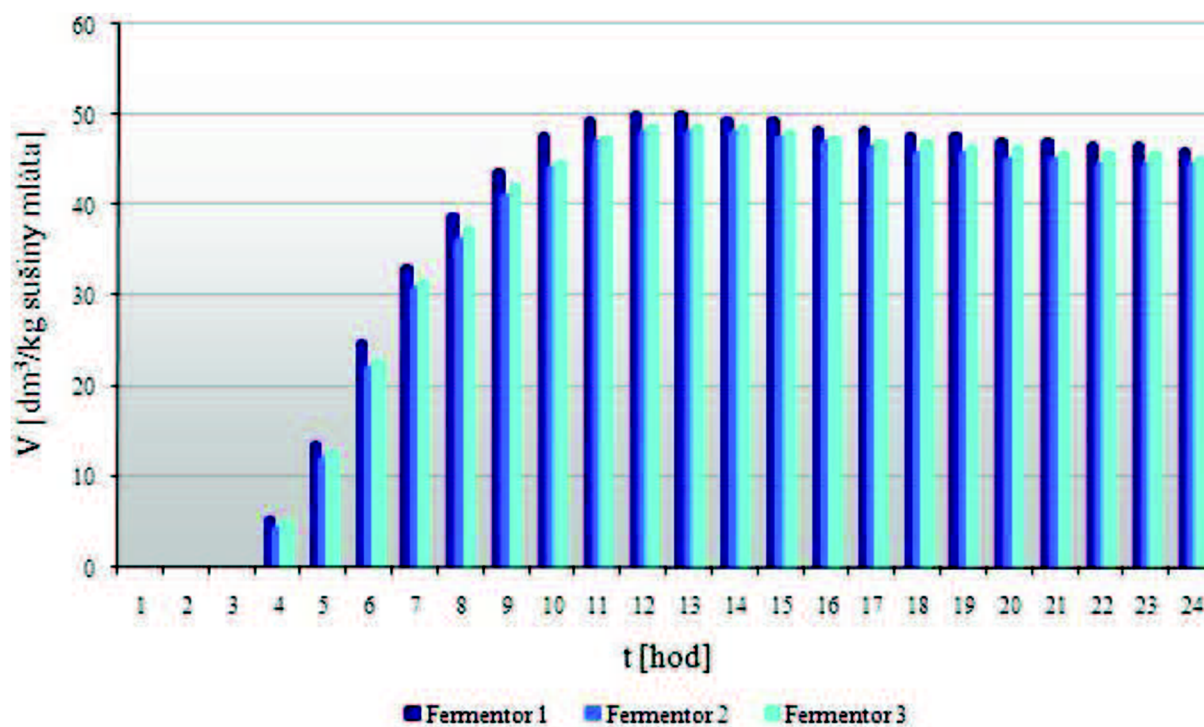
Výpočet množství sušiny a ztráty žháním naleznete v příloze 1. Vlastní nepřečítané hodnoty produkce bioplynu naleznete v příloze 2.

Pokus č. 2 – 1. 2. 2012  
Materiál č. 2

		F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]:	Mláto	100,566	100,065	100,048
	Kal	100,107	100,107	100,076
	Voda	55,135	55,121	55,09
	$\Sigma$	255,808	255,293	255,214

Množství uvolněného bioplynu při pokusu č. 2 můžete vidět na grafu 9.

Graf 9: Srovnání množství uvolněného bioplynu na 1 kg sušiny mláta z jednotlivých fermentorů při druhém pokusu



Výpočet množství sušiny a ztráty žiháním naleznete v příloze 1. Vlastní nepřečítané hodnoty produkce bioplynu naleznete v příloze 2.

### 5.4.2 Fermentace mláta v prvním stupni dezintegrace

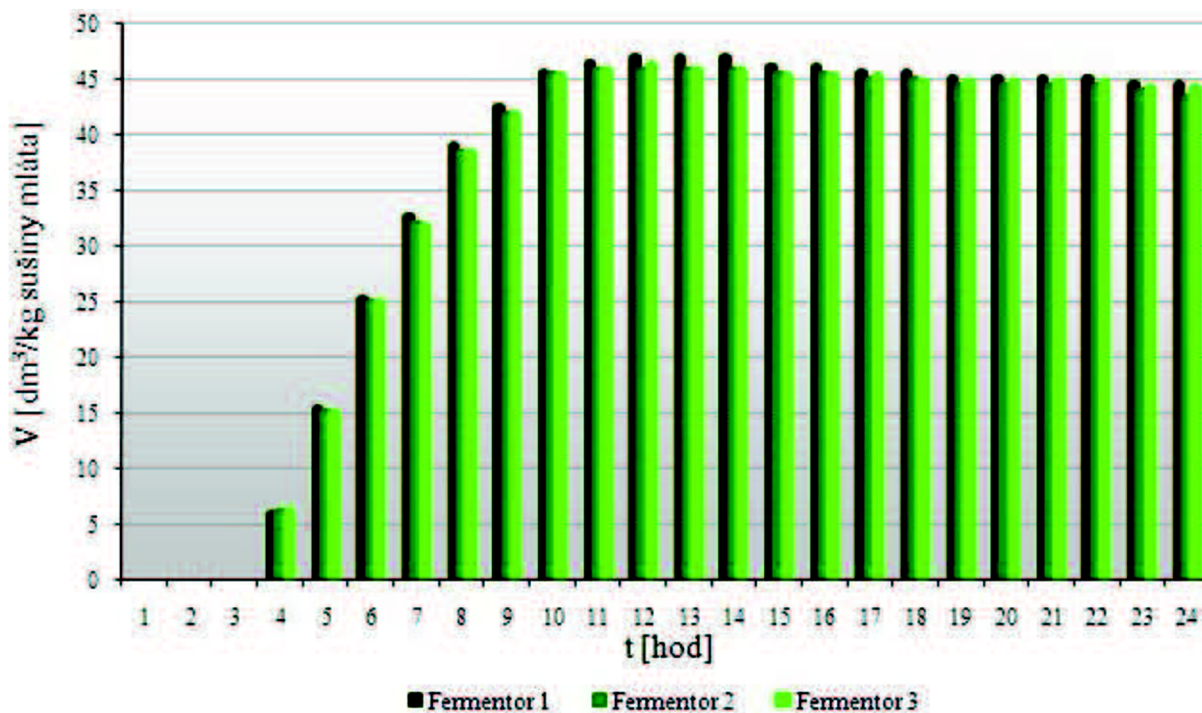
Pokus č. 3 – 29. 2. 2012

Materiál č. 3

		F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]:	Mláto	100,69	100,022	100,263
	Kal	100,042	100,075	100,095
	Voda	55,025	55,036	55,156
	$\Sigma$	255,757	255,133	255,514

Množství uvolněného bioplynu při pokusu č. 3 můžete vidět na grafu 10.

Graf 10: Srovnání množství uvolněného bioplynu na 1 kg sušiny mláta z jednotlivých fermentorů při třetím pokusu



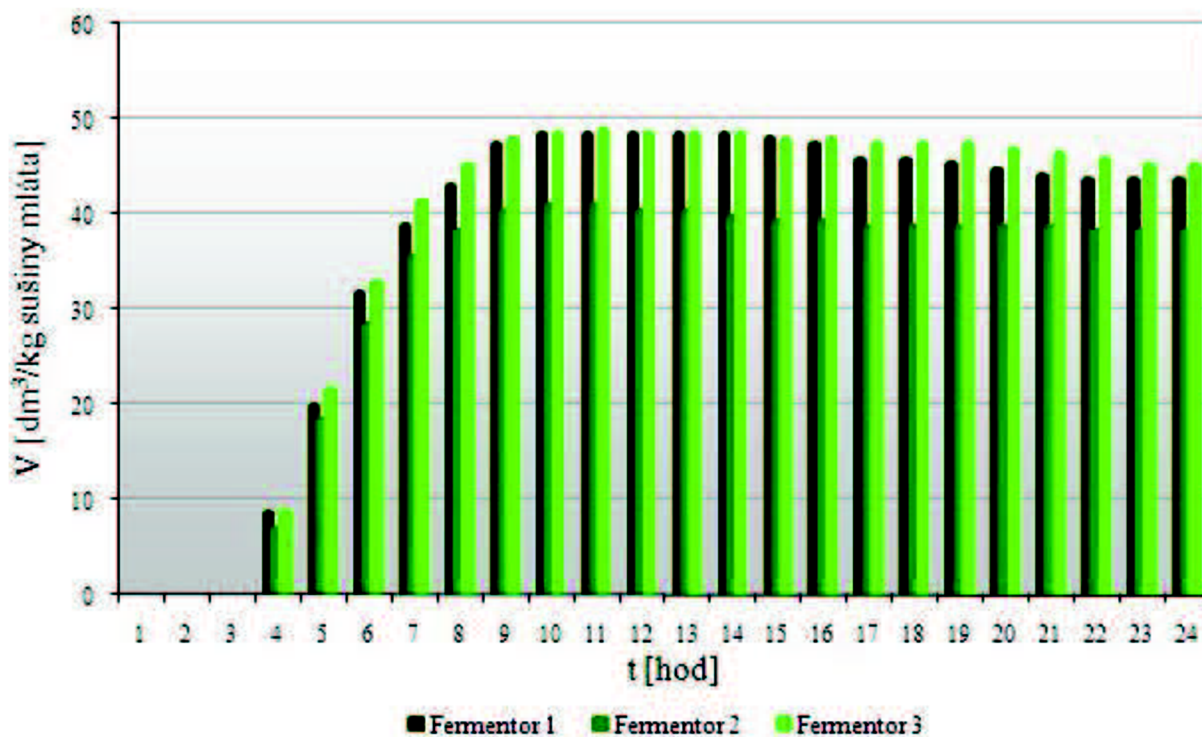
Výpočet množství sušiny a ztráty žháním naleznete v příloze 1. Vlastní nepřečítané hodnoty produkce bioplynu naleznete v příloze 2.

Pokus č. 4 – 14. 3. 2012  
Materiál č. 4

	F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]: Mláto	100,125	100,32	100,228
Kal	100,162	100,075	100,127
Voda	55,09	55,072	55,225
$\Sigma$	255,377	255,467	255,58

Množství uvolněného bioplynu při pokusu č. 4 můžete vidět na grafu 11.

Graf 11: Srovnání množství uvolněného bioplynu na 1 kg sušiny mláta z jednotlivých fermentorů při čtvrtém pokusu



Výpočet množství sušiny a ztráty žiháním naleznete v příloze 1. Vlastní nepřečítané hodnoty produkce bioplynu naleznete v příloze 2.

### 5.4.3 Fermentace mláta ve druhém stupni dezintegrace

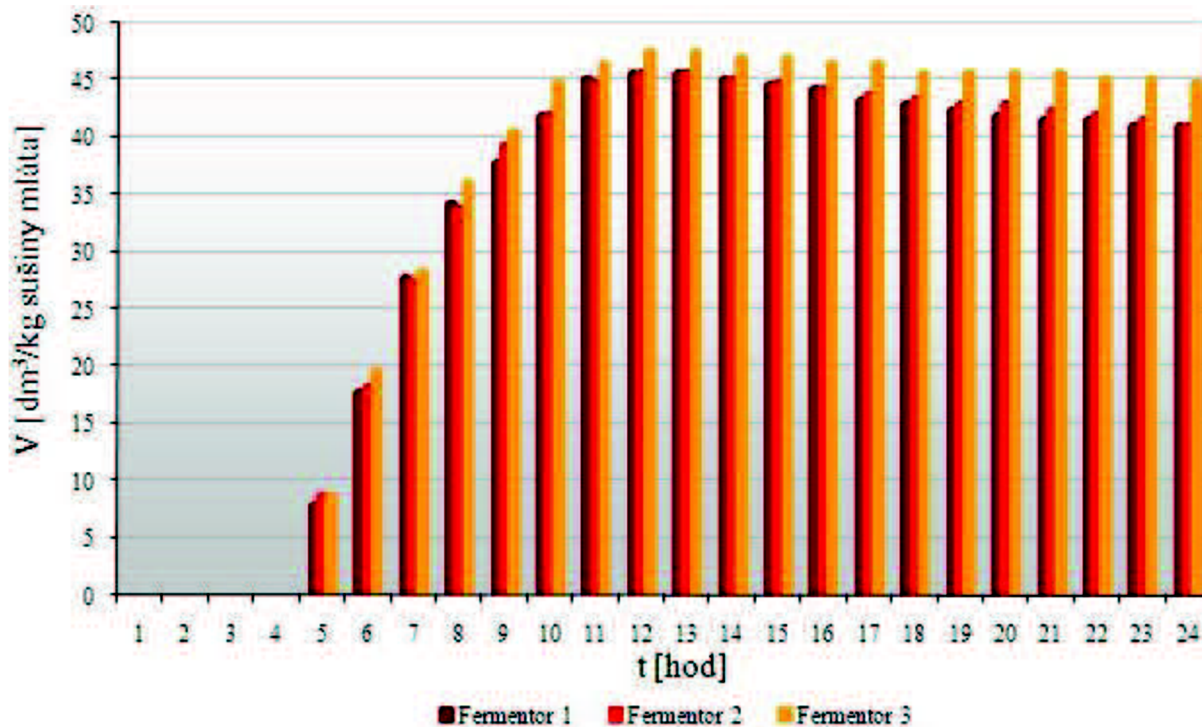
Pokus č. 5 – 21. 3. 2012

Materiál č. 5

		F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]:	Mláto	100,29	100,153	100,23
	Kal	100,16	100,125	100,075
	Voda	55,238	55,325	55,262
	$\Sigma$	255,688	255,603	255,567

Množství uvolněného bioplynu při pokusu č. 5 můžete vidět na grafu 12.

Graf 12: Srovnání množství uvolněného bioplynu na 1 kg sušiny mláta z jednotlivých fermentorů při pátém pokusu



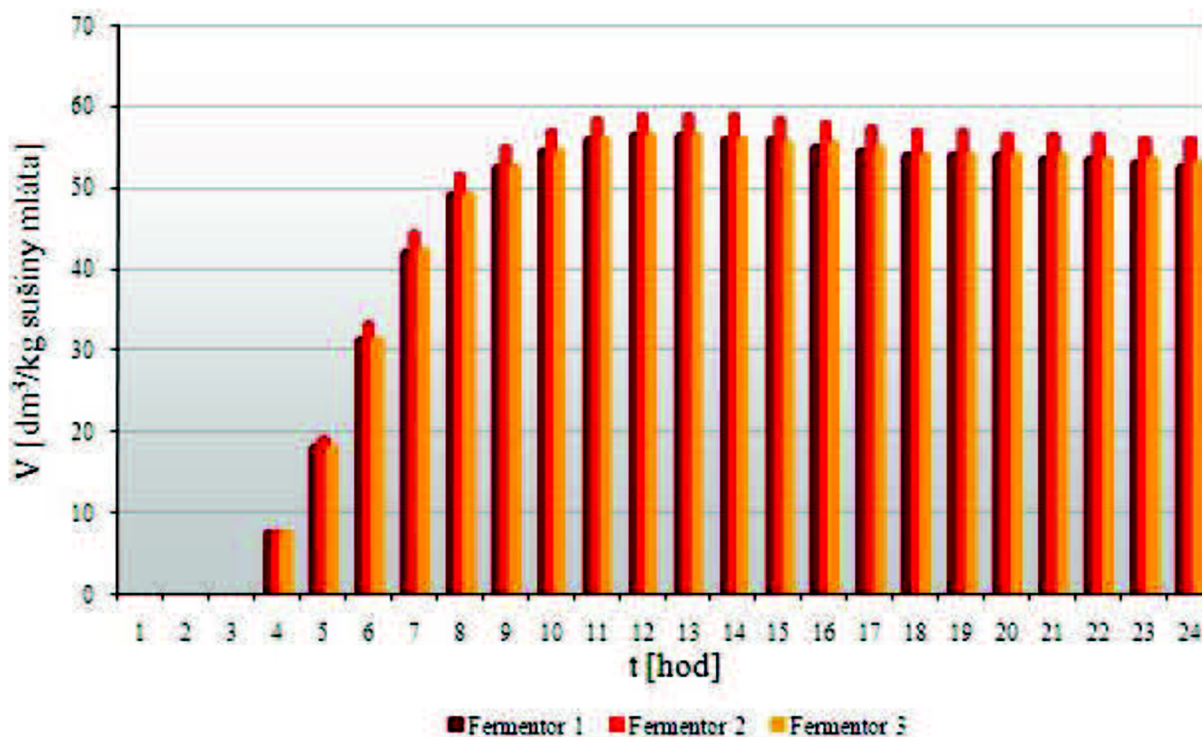
Výpočet množství sušiny a ztráty žiháním naleznete v příloze 1. Vlastní nepřečítané hodnoty produkce bioplynu naleznete v příloze 2.

Pokus č. 6 – 28 .3. 2012  
Materiál č. 6

	F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]: Mláto	100,094	100,182	100,038
Kal	100,062	100,102	100,071
Voda	55,088	55,466	55,5
$\Sigma$	255,244	255,75	255,609

Množství uvolněného bioplynu při pokusu č. 6 můžete vidět na grafu 13.

Graf 13: Srovnání množství uvolněného bioplynu na 100g sušiny mláta z jednotlivých fermentorů při šestém pokusu



Výpočet množství sušiny a ztráty žiháním naleznete v příloze 1. Vlastní nepřečítané hodnoty produkce bioplynu naleznete v příloze 2.



## 5.5 Analýza složení plynu

Analýza složení uvolněných plynů byla provedena pouze na několika vzorcích, i když původně bylo plánováno odebrat a analyzovat plyny ze všech pokusů a všech fermentorů. Plyn byl vždy odebrán po skončení pokusu, tedy po 24 hodinách od začátku. Po provedení prvních odběrů vzorků plynu při fermentaci surového mláta, bylo při pokusu o jejich analyzování na plynovém chromatografu PerkinElmer (viz obr. 21) totiž zjištěno, že tlaková láhev s nosným plynem He-H<sub>2</sub> je prázdná a naplnění nové bude trvat několik měsíců, tudíž bych už vzorky nestihl analyzovat. Z tohoto důvodu již vzorky plynů z dalších pokusů nebyly odebrány. Nakonec však pořízení nového nosného plynu tak dlouho netrvalo, a tudíž analýzu již odebraných vzorků provést možné bylo. Zároveň se ještě stihly odebrat vzorky z pokusu č. 6, při kterém bylo fermentováno mláto ve druhém stupni dezintegrace a pokusu č. 7 (viz kap. 5.6) se všemi stupni dezintegrace mláta ve fermentorech.



Obr. 21: Chromatograf PerkinElmer

Tab. 13: Složení jednotlivých vzorků odebraného plynu

Datum stanovení	Obsah [%]										
	28.3.2012			29.3.2012			30.3.2012				
	Pokus č. 1		Pokus č. 2	Pokus č. 6		Pokus č. 8					
Složka	F1	F2	F3	F1	F2	F1	F2	F3	F1	F2	F3
H <sub>2</sub>	21,69	19,24	25,8	31,28	34,51	47,26	47,94	47,36	39,33	40,04	44,54
CO <sub>2</sub>	13,23	8,48	10,34	16,93	16,67	21,13	20,76	17,77	19,43	18,09	19,05
O <sub>2</sub>	0,66	0,69	0,7	0,67	0,65	0,97	0,46	0,51	0,56	0,57	0,52
N <sub>2</sub>	60,81	67,99	58,66	47,01	43,89	30,55	30,1	33,65	38,06	40,31	35,32
CH <sub>4</sub>	3,6	3,61	4,5	4,11	4,29	0,7	0,73	0,72	2,62	0,99	0,57

Z analýzy složení plynů (viz tab. 13) vidíme, že uvolněný bioplyn obsahoval maximálně do 4,5 % metanu. Největší zastoupení měly ve většině vzorků dusík a vodík. Při fermentaci mláta se ve vzorcích se rostoucím stupněm dezintegrace obsah metanu snižoval a naopak rostl obsah vodíku. Tyto skutečnosti potvrzuje i analýza vzorků z pokusu č. 8, při němž byly ve fermentorech všechny tři stupně dezintegrace mláta. Obsahy dusíku, kterého bylo ve vzorcích

nejvíce s rostoucí dezintegrací klesají, ovšem při souhrnném pokusu se tento trend nepotvrdil. Obsahy oxidu uhličitého ani kyslíku žádnou závislost na dezintegraci mláta neprokazují.

Přestože byla analýza složení provedena pouze na několika vzorcích, můžeme vypočítat jisté závislosti. Pro jejich potvrzení by ovšem chtělo provést více pokusů a zanalyzovat více vzorků plynu.

Pokud by bioplyn vykazoval složení podobné tomu, které vyšlo při některých pokusech uvedených v této práci, bylo by určitě ekonomičtější vyrábět jej namísto kvůli metanu, kvůli vodíku.

## 5.6 Úbytek organických látek

Jelikož u prvních experimentů nebyl měřen úbytek organických látek v sušině na výstupu z fermentorů, bylo nutné provést ještě další dva samostatné experimenty. Označme je pokus č. 7 a 8. Při těchto experimentech byly ve fermentorech vždy všechny tři dezintegrační stupně mláta. Pro účely těchto pokusů byl použit materiál z pokusů č. 5 a 6, ovšem skladovaný den v lednici, tudíž nebyl úplně čerstvý.

Na výstupu z každého fermentoru byly vždy po důkladném promíchání směsi odebrány dva vzorky. Předpokládejme tedy, že ve vzorcích jsou složky ve stejném poměru, jako na vstupu.

Úbytek organických látek je tedy počítán pro celkovou směs mláta a kalu ve fermentoru. Určit úbytek organiky pro každou složku zvlášť by bylo možné jen za předpokladu, že by byl úbytek u mláta i kalu stejnoměrný.

### Pokus č. 7

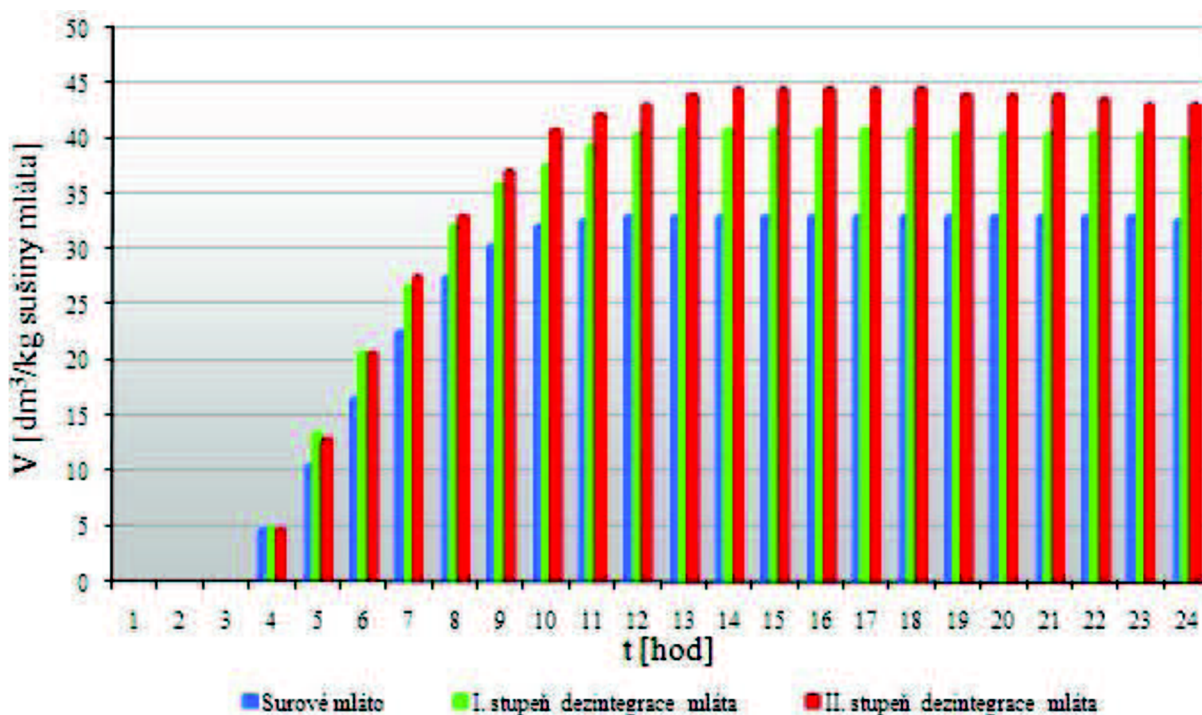
Na tento pokus byl použit materiál z pokusu č. 5, který, jak již bylo zmíněno, byl ovšem před pokusem jeden den skladován v lednici.

Pro připomenutí uvádím, že podíl sušiny u mláta byl 21,893 % a u kalu 4,765 %. Podíl organických látek v sušině byl u mláta 94,441 % a u kalu 65,484 %.

V prvním fermentoru bylo surové mláto, ve druhém mláto v prvním stupni dezintegrace a ve třetím mláto ve druhém stupni dezintegrace.

		F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]:	Mláto	100,083	100,064	100,138
	Kal	100,129	100,081	100,234
	Voda	55,135	55,804	55,624
	$\Sigma$	255,347	255,949	255,996

Graf 14: Srovnání množství uvolněného bioplynu na 1 kg sušiny mláta z jednotlivých fermentorů při prvním dodatečném pokusu



Z grafu 14 je názorně patrné, jaký vliv má dezintegrace na přírůstky množství uvolněného bioplynu.

#### Pokus č. 8

Na tento pokus byl použit materiál č. 6, taktéž před pokusem jeden den skladovaný v lednici. U tohoto materiálu byl u mláta podíl sušiny 20,234 % a u kalu 3,062 %. Podíl organických látek v sušině byl u mláta 94,971 % a u kalu 58,844 %.

Náplně fermentorů byly stejné jako u předchozího, tedy v prvním fermentoru surové mláto, ve druhém mláto v prvním stupni dezintegrace a ve třetím mláto ve druhém stupni dezintegrace.

		F 1	F 2	F 3
Vsádka [g]:	Mláto	100,094	100,182	100,038
	Kal	100,062	100,102	100,071
	Voda	55,088	55,466	55,500
	$\Sigma$	255,244	255,750	255,609

Bohužel z tohoto experimentu neexistují žádná naměřená data, jelikož se počítač během experimentu zasekl a tak nemohl zaznamenávat naměřené stavy bioplynu.

### 5.6.1 Výpočet úbytku organických látek na výstupu z fermentoru

Vsádka fermentoru:	$m_{MlatoIN} = 100,083 \text{ g}$
	$m_{KalIN} = 100,129 \text{ g}$
	$m_{VodaIN} = 55,135 \text{ g}$
Podíl sušiny v daném mlátu:	$Suš_M = 21,893 \%$
Podíl sušiny v daném kalu:	$Suš_K = 4,765 \%$
Ztráta žiháním u daného mlátu:	$Zž_M = 94,441 \%$ suš
Ztráta žiháním u daného kalu:	$Zž_K = 65,484 \%$ suš
Hmotnost odebraného vzorku na výstupu z fermentoru:	$m_{vzOUT} = 56,789 \text{ g}$
Hmotnost sušiny ve vzorku na výstupu z fermentoru:	$m_{sušOUT} = 5,138 \text{ g}$
Hmotnost organiky ve vzorku na výstupu z fermentoru:	$m_{orgOUT} = 4,639 \text{ g}$

Nejdříve určíme celkovou hmotnost vsádky do fermentoru ze součtu hmotností jednotlivých složek (rov. 12).

$$m_{matIN} = m_{MlatoIN} + m_{KalIN} + m_{VodaIN} \quad (12)$$

$$m_{matIN} = 100,083 + 100,129 + 55,135 = 255,347 \text{ g}$$

Ze známých obsahů sušiny v materiálech nyní vypočítáme hmotnost sušiny ve vsádce (rov. 13, 14). Uvažujeme pouze mláto a kal, jelikož z vody žádná sušina nevznikne. Celková hmotnost sušiny tedy vznikne ze sumy hmotností sušiny mláta a kalu (rov. 15).

$$m_{sušM} = \frac{Suš_M \cdot m_{MlatoIN}}{100} \quad (13)$$

$$m_{sušM} = \frac{21,893 \cdot 100,083}{100} = 21,911 \text{ g}$$

$$m_{sušK} = \frac{Suš_K \cdot m_{KalIN}}{100} \quad (14)$$

$$m_{sušK} = \frac{4,765 \cdot 100,129}{100} = 4,771 \text{ g}$$

$$m_{sušIN} = m_{sušM} + m_{sušK} \quad (15)$$

$$m_{sušIN} = 21,911 + 4,771 = 26,682 \text{ g}$$

Nyní určíme, kolik procent vstupního materiálu (včetně vody) tvořila sušina (rov. 16).

$$Suš_{IN} = \frac{m_{sušIN}}{m_{matIN}} \cdot 100 \quad (16)$$

$$Suš_{IN} = \frac{26,682}{255,911} \cdot 100 = 10,449\%$$

Obdobný výpočet jako pro sušinu provedeme i pro stanovení množství organických látek ve vsádce sušiny fermentoru (rov. 17, 18, 19). Vycházíme v něm však z hmotnosti sušiny ve vsádce materiálů, namísto z hmotnosti jednotlivých složek.

$$m_{orgM} = \frac{m_{sušM} \cdot Zž_M}{100} \quad (17)$$

$$m_{orgM} = \frac{21,911 \cdot 94,441}{100} = 20,693g$$

$$m_{orgK} = \frac{m_{sušK} \cdot Zž_K}{100} \quad (18)$$

$$m_{orgK} = \frac{4,771 \cdot 65,484}{100} = 3,124g$$

$$m_{orgIN} = m_{orgM} + m_{orgK} \quad (19)$$

$$m_{orgIN} = 20,693 + 3,124 = 23,817g$$

Nyní určíme, kolik procent sušiny na vstupu do fermentoru tvořily organické látky (rov. 20).

$$Zž_{IN} = \frac{m_{orgIN}}{m_{sušIN}} \cdot 100 \quad (20)$$

$$Zž_{IN} = \frac{23,817}{26,682} \cdot 100 = 89,263\%suš$$

Z celkové hmotnosti vzorku na výstupu z fermentoru a hmotnosti jeho sušiny vypočteme podíl sušiny ve směsi na výstupu z fermentoru (rov. 21).

$$Suš_{OUT} = \frac{m_{sušOUT}}{m_{vzOUT}} \cdot 100 \quad (21)$$

$$Suš_{OUT} = \frac{5,138}{56,789} \cdot 100 = 9,048\%$$

A obdobně také z hmotnosti organiky ve vzorku na výstupu z fermentoru a hmotnosti sušiny vzorku určíme podíl organických látek v sušině ve směsi na výstupu z fermentoru (rov. 22).

$$Z\check{z}_{OUT} = \frac{m_{orgOUT}}{m_{sušOUT}} \cdot 100 \quad (22)$$

$$Z\check{z}_{OUT} = \frac{4,639}{5,138} \cdot 100 = 90,288\%suš$$

Porovnáním údajů před fermentací a po ní zjistíme, jaký byl rozdíl hodnot sušiny a organiky na vstupu a na výstupu (rov. 23, 24)

$$Rozdíl_{suš} = Suš_{OUT} - Suš_{IN} \quad (23)$$

$$Rozdíl_{suš} = 9,048 - 10,449 = -1,402\%$$

$$Rozdíl_{org} = Z\check{z}_{OUT} - Z\check{z}_{IN} \quad (24)$$

$$Rozdíl_{org} = 90,288 - 89,263 = 1,025\%$$

Tab. 14: Rozdíl v podílu sušiny a organických látek v sušině ve směsi na vstupu a výstupu z fermentorů při pokusu č. 7

	Vzorek	Suš <sub>IN</sub>	Suš <sub>OUT</sub>	Rozdíl <sub>suš</sub> *	Zž <sub>IN</sub>	Zž <sub>OUT</sub>	Rozdíl <sub>org</sub> *
		[%]	[% suš]	[%]	[%]	[% suš]	[%]
F 1	1	10,449	9,048	-1,402	89,263	90,288	1,025
	2		9,497	-0,953		90,604	1,341
F 2	3	10,422	9,276	-1,146	89,264	90,687	1,422
	4		9,027	-1,395		90,863	1,599
F 3	5	10,429	7,713	-2,717	89,260	90,293	1,032
	6		8,861	-1,58		90,618	1,357

\*Kladná hodnota čísla znamená přírůstek množství, záporná značí naopak úbytek.

Tab. 15: Rozdíl v podílu sušiny a organických látek v sušině ve směsi na vstupu a výstupu z fermentorů při pokusu č. 8

	Vzorek	Suš <sub>IN</sub>	Suš <sub>OUT</sub>	Rozdíl <sub>suš</sub> *	Zž <sub>IN</sub>	Zž <sub>OUT</sub>	Rozdíl <sub>org</sub> *
		[%]	[% suš]	[%]	[%]	[% suš]	[%]
F 1	1	9,135	8,94	-0,195	90,224	90,424	0,2
	2		9,088	-0,047		90,436	0,212
F 2	3	9,125	9,497	0,373	90,226	90,954	0,728
	4		9,222	0,097		90,161	-0,065
F 3	5	9,118	9,069	-0,048	90,221	90,753	0,532
	6		9,148	0,03		90,323	0,101

\*Kladná hodnota čísla znamená přírůstek množství, záporná značí naopak úbytek.

Průběžné výpočty naleznete v příloze 3.

## 5.7 Diskuse výsledků

Na základě porovnání reálného množství uvolněného bioplynu (viz příloha 2) s teoretickou výtěžností vypočítanou v kap. 5.1.3 vidíme, že produkce ani zdaleka nedosahovaly teoretických hodnot. Přesto lze pozorovat nárůst produkce bioplynu v závislosti na dezintegraci mláta. Příčinu nižších produkcí můžeme hledat v analýze složení plynů, při které bylo zjištěno, že uvolněný bioplyn neobsahoval skoro žádný metan. Přesněji tedy obsahoval ho maximálně do 4,5 %. Anaerobní fermentace se tak nejspíše vůbec nedostala do fáze metanogeneze, při které je produkován metan (viz kap. 5.5) a zastavila se. Tomu by odpovídala i krátká doba vývinu bioplynu. Jelikož byly fermentory vyrobeny z PET lahví, nebylo možné během procesu měřit pH. Šlo by tak například odhalit zvýšené množství amoniaku v procesu, které by mohlo vést k zastavení vývinu plynu.

Bohužel analýza složení plynů proběhla kvůli výše popsaným skutečnostem až v době, kdy byla většina experimentů už provedena a na jejich opakování například za jiných podmínek již nezbýval dostatek času.

Z grafů produkce bioplynu můžeme pozorovat, že již asi po 12 hodinách od začátku pokusu dochází v plynojemech k úbytku uvolněného bioplynu. Může to být způsobeno rozpouštěním oxidu uhličitého, kterého bioplyn obsahoval do 20 %, ve vodě, ve které byly plynojemy umístěny.

Z výpočtu změny množství organických látek na výstupu z fermentoru při 7. a 8. pokusu vidíme, že skoro ve všech vzorcích byl prokázán přírůstek množství organických látek v sušině na výstupu z fermentoru (viz tab. 14, 15). Obsah sušiny ve většině vzorků po fermentaci o trochu poklesl. Při standardní anaerobní fermentaci by se měl podíl organických látek v sušině však spíše snižovat. Možným vysvětlením by mohl být nárůst kultury mikroorganismů, které ale nezačaly ve velkém zpracovávat přítomné živiny. Rozdíly nejsou u obou sledovaných parametrů nijak výrazné a jsou způsobeny nejspíše nehomogenním složením odebraných vzorků. Nejeví se zde žádná závislost změny množství organických látek ani sušiny na stupni dezintegrace materiálu.

Při porovnání naměřených hodnot bioplynu u pokusu č. 7, který byl prováděn na stejném materiálu jako pokus č. 5 je u mláta ve II. stupni dezintegrace patrný jistý pokles produkce bioplynu. Důvodem tohoto poklesu může být to, že tento pokus byl prováděn až druhý den po přivezení materiálu a do té doby byl materiál uskladněn v lednici. Tato závislost množství uvolněného bioplynu na čerstvosti materiálu byla pozorována i při jiných, zde neuvedených, experimentech.

## 5.8 Účinnost dezintegrace

Účinnost dezintegrace byla hodnocena vzhledem k produkci bioplynu ze samotného mláta. Aby to bylo možné, bylo nejprve nutné zjistit, kolik bioplynu se produkuje jen z čistírenského kalu. To bylo určeno z pokusu, při kterém byl ve fermentoru pouze samotný kal.

Hmotnost vsádky kalu:

$$Kal_{0IN} = 219,947 \text{ g}$$

Průměrné množství sušiny v daném kalu:

$$Suš_{K0} = 2,754 \%$$

Uvolněné množství bioplynu z kalu:

$$V_{K0} = 270 \text{ ml}$$

Hmotnost sušiny ve vsádce samotného kalu:

$$m_{sušKIN} = \frac{Suš_{K0} \cdot Kal_{0IN}}{100} \quad (25)$$

$$m_{sušKIN} = \frac{2,754 \cdot 219,947}{100} = 6,057g$$

Výpočet množství bioplynu uvolněného jen z mláta:

Průměrné množství sušiny v daném mlátu:	$Suš_M = 21,695 \%$
Průměrné množství sušiny v daném kalu:	$Suš_K = 3,296 \%$
Průměrné množství bioplynu uvolněné při daném pokusu:	$V_{M+K} = 817 \text{ ml}$

Z výpočtu množství sušiny kalu vstupující do fermentoru a znalosti produkce bioplynu ze samotného kalu určíme, kolik se uvolnilo bioplynu z kalu při daném experimentu (rov. 26).

Jelikož počítám účinnost dezintegrace pro průměrnou hodnotu množství bioplynu ze všech tří fermentorů při jednom experimentu, pro zjednodušení uvažuji ve výpočtu množství kalu ve vsádce 100 g.

$$V_K = \frac{V_{K0} \cdot Suš_K}{m_{sušKIN}} \quad (26)$$

$$V_K = \frac{270 \cdot 3,296}{6,057} \doteq 147ml$$

Poté odečteme toto množství od celkové produkce a získáme množství uvolněného bioplynu jen z mláta (rov. 27).

$$V_M = V_{M+K} - V_K \quad (27)$$

$$V_M = 817 - 147 \doteq 670ml$$

Ještě přepočítáme na 1 kg sušiny mláta, aby se daly hodnoty porovnávat. Zde taktéž uvažujeme vsádku mláta 100 g.

$$V_{kgsušM} = \frac{V_M}{Suš_M} \cdot 100 \quad (28)$$

$$V_{kgsušM} = \frac{670}{21,695} \cdot 100 \doteq 30867ml = 30,9dm^3 / kg_{sušM}$$

Výsledné hodnoty jsou ještě zprůměrovány vždy pro jednotlivé stupně dezintegrace a z nich je vypočten nárůst produkce bioplynu v závislosti na stupni dezintegrace.

V tab. 16 je přehledně vidět, jak rostla produkce bioplynu v závislosti na stupni dezintegrace fermentovaného mláta.



Tab. 16: Množství bioplynu uvolněné z mláta při jednotlivých pokusech

Mláto	Pokus	Suš <sub>K</sub>	V <sub>K</sub>	V <sub>M+K</sub>	V <sub>M</sub>	Suš <sub>M</sub>	V <sub>kg<sub>sušM</sub></sub>	Průměr
		[%]	[ml]			[%]	[dm <sup>3</sup> /kg <sub>sušM</sub> ]	
Surové	1	3,296	147	817	670	21,695	30,9	35,7
	2	3,169	141	827	686	16,875	40,6	
I. st. dezintegrace	3	3,112	139	933	794	20,101	39,5	38,8
	4	3,162	141	850	709	18,591	38,1	
II. st. dezintegrace	5	4,765	213	1013	800	21,893	36,6	43,5
	6	3,062	137	1157	1020	20,234	50,4	

Výpočet účinnosti dezintegrace v prvním a druhém stupni (rov. 29, 30)

$$\eta_{sur} = 100\%$$

$$\eta_{I.st} = \frac{V_{I.st}}{V_{sur}} \cdot 100 \quad (29)$$

$$\eta_{I.st} = \frac{38,8}{35,7} \cdot 100 = 108,65\%$$

Oproti surovému mlátu se při anaerobní fermentaci mláta v I. stupni dezintegrace uvolnilo v průměru o 3,09 dm<sup>3</sup>/kg<sub>sušM</sub> více bioplynu, což odpovídá nárůstu produkce o 8,65 %.

$$\eta_{II.st} = \frac{V_{II.st}}{V_{sur}} \cdot 100 \quad (30)$$

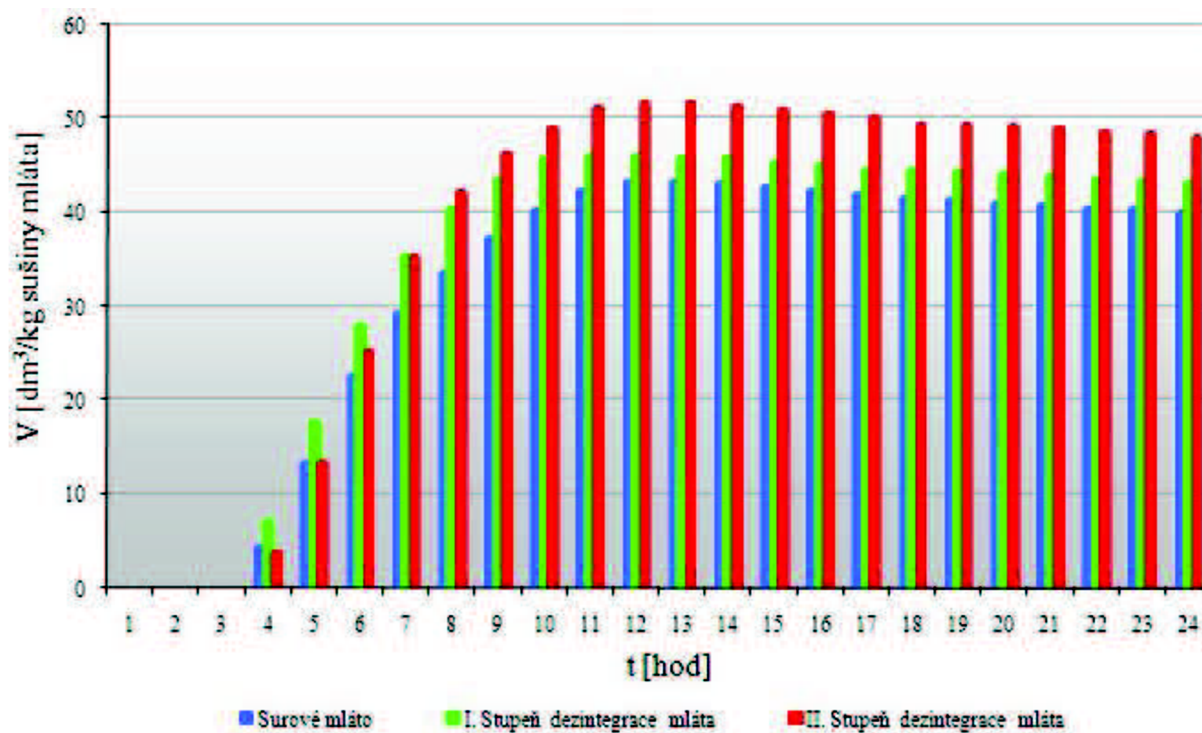
$$\eta_{II.st} = \frac{43,5}{35,7} \cdot 100 = 121,71\%$$

Při II. stupni dezintegrace mláta je průměrný nárůst produkce o 7,76 dm<sup>3</sup>/kg<sub>sušM</sub> a procentuálně tedy o 21,705 %.

Jelikož byl proveden pouze jeden pokus s fermentací samotného kalu, je tento výpočet pouze orientační, neboť při jiném pokusu by mohlo být množství uvolněného bioplynu jiné a tudíž by byly jiné i následné odpočty produkce bioplynu jen ze samotného čistírenského kalu a následně i jednotlivé účinnosti dezintegrace.

Jaká byla průměrná produkce bioplynu ze všech dezintegračních stupňů v čase je zobrazeno v grafu 15.

Graf 15: Srovnání průměrného množství uvolněného bioplynu na 1 kg sušiny mláta všech tří dezintegračních stupňů bez odečtení produkce bioplynu z kalu



## 5.9 Ekonomika dezintegrace

Pro účely výpočtu ekonomiky dezintegrace uvažujeme, že průměrné uvolněné množství bioplynu v přepočtu na 1 kg sušiny mláta spalujeme v kogenerační jednotce s kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla. Účinnost výroby elektrické energie je zvolena 41,5 % a výroby tepla 44,3 %. Podobné hodnoty jsou běžné u dnešních moderních kogeneračních jednotek. Všechnu elektrickou energii i teplo budeme prodávat. Cenu za prodej 1 MWh elektriny uvažujeme 4120 Kč [33]. Jedná se o částku, kterou garantuje Energetický regulační úřad v cenovém rozhodnutí č. 7/2011 při spalování bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF1 uvedených do provozu před 1. lednem 2012. Cenu za prodej 1 GJ tepla uvažujeme 550 Kč. Tato částka byla zvolena na základě běžných prodejních cen tepla jednotlivých teplárenských společností v České republice. Cena za prodej tepla z kogenerační jednotky totiž závisí vždy na dohodě mezi dvěma subjekty.

Jelikož bioplyn z mých pokusů neobsahoval skoro žádný metan, bylo by zbytečné počítat ekonomiku na jeho složení. Z tohoto důvodu ve výpočtech uvažujeme, že bioplyn obsahoval 65 % metanu, což je podle tab. 3 průměrný obsah při fermentaci agroindustriálních odpadů.

Složení bioplynu uvažujeme stejné pro všechny stupně dezintegrace mláta, i když z výsledků analýzy složení plynů popsané v kap. 5.5 vyplývá, že tomu tak být nemusí.

### 5.9.1 Výpočet výnosů z prodeje energií

Obsah metanu v bioplynu:

Výhřevnost metanu [34]:

Účinnost výroby elektrické energie:

Účinnost výroby tepla:

Výkupní cena elektrické energie:

Výkupní cena tepla:

$$x_{CH_4} = 65 \% = 0,65$$

$$LHV_{CH_4} = 35,8 \text{ MJ/m}^3_N$$

$$\eta_E = 41,5 \% = 0,415$$

$$\eta_T = 44,3 \% = 0,443$$

$$Cena_E = 4120 \text{ Kč/MWh}$$

$$Cena_T = 550 \text{ Kč/GJ}$$

Výpočet výhřevnosti bioplynu:

$$LHV_{Biop} = \frac{x_{CH_4} \cdot LHV_{CH_4}}{x_{Biop}} \quad (31)$$

$$LHV_{Biop} = \frac{0,65 \cdot 35,8}{1} = 23,27 \text{ MJ} / m^3_N$$

Výnosy z prodeje energií z bioplynu

Ukázkový výpočet je proveden pro surové mláto.

Z vypočítané výhřevnosti bioplynu a produkce bioplynu určíme energetický obsah paliva (rov. 32).

$$V = 35,7 \text{ dm}^3 / \text{kg}_{sušM} = 0,0357 \text{ m}^3 / \text{kg}_{sušM}$$

$$Q = LHV_{Biop} \cdot V \quad (32)$$

$$Q = 23,27 \cdot 0,0357 = 0,8317 \text{ MJ} / \text{kg}_{sušM}$$

Elektrický výkon dostaneme vynásobením energetického obsahu paliva a účinností výroby elektrické energie (rov. 34).

$$P_E^{KJ} = Q \cdot \eta_E \quad (34)$$

$$P_E^{KJ} = 0,8317 \cdot 0,415 = 0,3448 MJ / kg_{sušM}$$

Převedeme na jednotku  $Wh / kg_{sušM}$  na základě úvahy, že  $1 Wh = 3600 kJ$ .

$$P_E^{KJ} = \frac{0,3448 \cdot 10^6}{3600} = 95,8 Wh / kg_{sušM}$$

Obdobně také pro tepelný výkon. (rov. 35).

$$P_T^{KJ} = Q \cdot \eta_T \quad (35)$$

$$P_T^{KJ} = 0,8317 \cdot 0,443 = 0,36844 MJ / kg_{sušM} = 368,44 kJ / kg_{sušM}$$

Výnosy z prodeje energií získáme vynásobením daných výkonů a cenou za prodej energií (rov. 36, 37).

$$Cena_E = 4120 K\check{c} / MWh = 0,004120 K\check{c} / Wh$$

$$Výnos_E = Cena_E \cdot P_E^{KJ} \quad (36)$$

$$Výnos_E = 0,004120 \cdot 95,8 = 0,395 K\check{c} / kg_{sušM}$$

$$Cena_T = 550 K\check{c} / GJ = 5,5 \cdot 10^{-4} K\check{c} / kJ$$

$$Výnos_T = Cena_T \cdot P_T^{KJ} \quad (37)$$

$$Výnos_T = 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot 368,44 = 0,202 K\check{c} / kg_{sušM}$$

Celkový výnos získáme jako sumu výnosů za prodej elektřiny a za prodej tepla.

$$Výnos_\Sigma = Výnos_E + Výnos_T \quad (38)$$

$$Výnos_\Sigma = 0,395 + 0,202 = 0,597 K\check{c} / kg_{sušM}$$

### 5.9.2 Výpočet nákladů na dezintegraci

Pokusíme se zjistit, zda by zvýšení produkce bioplynu pokrylo náklady na vlastní dezintegraci a jaký by byl případný zisk.

Vlastní dezintegrace probíhala v mixéru s příkonem 450 W a objemem mixovací nádoby 1,25 l.

Jelikož neznáme hustotu pivovarského mláta, byla použita průměrná hodnota pro ječmen, který je výchozí surovinou mláta. Chyba která takto vznikne nebude nijak velká. Za obsah sušiny v mlátu dosazujeme hodnotu 19,898 %, což je průměrná hodnota ze všech mlát použitých při zde uvedených pokusech.

Cena elektrické energie bude vždy závislá na typu odběratele. Pro tento výpočet uvažujeme za 1 kWh cenu 5 Kč.

Vzorový výpočet je proveden pro mláto v I. stupni dezintegrace.

Příkon mixéru:	$P_{mix} = 450 \text{ W}$
Cena elektrické energie:	$Cena_{Ee} = 5 \text{ Kč/kWh}$
Průměrná hustota mláta [35]:	$\rho_M = 1200 \text{ kg/m}^3$
Objem mixovací nádoby:	$V_{mix} = 0,00125 \text{ m}^3$
Průměrný obsah sušiny v mlátu:	$Suš_M = 19,898 \%$
Doba mixování:	$t_{mix} = 10 \text{ s}$

Nejdříve z rov. 39 vypočítáme, jaké jsou náklady na jedno mixování.

$$P_{mix} = 450 \text{ W} = 0,45 \text{ kW}$$

$$t_{mix} = 10 \text{ s} = 0,00278 \text{ Hod}$$

$$Náklady_{mix} = P_{mix} \cdot t_{mix} \cdot Cena_{Ee} \quad (39)$$

$$Náklady_{mix} = 0,45 \cdot 0,00278 \cdot 5 = 0,00626 \text{ Kč}$$

Jelikož ovšem počítáme ekonomiku dezintegrace na produkce bioplynu z 1 kg sušiny mláta, musíme vzhledem k objemu mixovací nádoby vypočítat, kolikrát bychom museli mláto mixovat, abychom dezintegrovali hmotnost mláta, která naplní jeden fermentor.

Nejdříve vypočítáme hmotnost mláta v naplněném mixéru (rov. 40).

$$m_{mix} = \rho_M \cdot V_{mix} \quad (40)$$

$$m_{mix} = 1200 \cdot 0,00125 = 1,5 \text{ kg}$$

Poté určíme hmotnost jedné náplně fermentoru, která bude obsahovat 1 kg sušiny mláta (rov. 41).

$$m_{náplně} = \frac{100 \cdot 1000}{Suš_M} \quad (41)$$

$$m_{\text{náplně}} = \frac{100 \cdot 1000}{19,898} = 5025,63 \text{ g} / \text{kg}_{\text{sušM}} = 5,026 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{sušM}}$$

Nyní určíme, kolikrát bude potřeba mláto mixovat (rov. 42). Zaokrouhlíme na celé číslo směrem nahoru.

$$n_{\text{mix}} = \frac{m_{\text{náplně}}}{m_{\text{mix}}} \quad (42)$$

$$n_{\text{mix}} = \frac{5,026}{1,5} = 3,35 \Rightarrow 4x / \text{kg}_{\text{sušM}}$$

Známe-li počet mixování na jednu náplň fermentoru, můžeme vypočítat celkové náklady na dezintegraci (rov. 43).

$$\text{Náklady}_{\text{celk}} = \text{Náklady}_{\text{mix}} \cdot n_{\text{mix}} \quad (43)$$

$$\text{Náklady}_{\text{celk}} = 0,00626 \cdot 4 = 0,025 \text{ Kč} / \text{kg}_{\text{sušM}}$$

Případný zisk při fermentaci mláta v I. stupni dezintegrace získáme odečtením nákladů na dezintegraci od rozdílu výnosů z prodeje energií surového a dezintegrováného mláta.

$$\text{Zisk} = \text{Rozdíl} - \text{Náklady}_{\text{celk}} \quad (44)$$

$$\text{Zisk} = 0,052 - 0,025 = 0,027 \text{ Kč} / \text{kg}_{\text{sušM}}$$

Celkové zhodnocení ekonomiky dezintegrace pro všechny stupně dezintegrace mláta je uvedeno v tab. 17.

Tab. 17: Porovnání zisků při fermentaci jednotlivých stupňů dezintegrace mláta

Mláto	V	Výnos <sub>E</sub>	Výnos <sub>T</sub>	Výnos <sub>Σ</sub>	Rozdíl	Náklady <sub>celk</sub>	Zisk
	[dm <sup>3</sup> /kg <sub>sušM</sub> ]		[Kč/kg <sub>sušM</sub> ]			[Kč/kg <sub>sušM</sub> ]	
Surové	35,7	0,395	0,202	0,597	–	–	–
I. stupeň dez.	38,8	0,429	0,22	0,649	0,052	0,025	<b>0,027</b>
II. stupeň dez.	43,5	0,481	0,247	0,728	0,131	0,075	<b>0,056</b>

Při takto nastavených podmínkách na základě vypočteného zisku vidíme, že při prodeji energií z dezintegrováného mláta vyděláme více, než jaké jsou náklady na vlastní dezintegraci. Alespoň v laboratorních podmínkách by se tedy dezintegrace vyplatila.

Ve větších provozech s o mnoho větší produkcí bioplynu by vždy záleželo na typu dezintegrační jednotky, a také na dalších technologických zařízeních, např. dopravnících, které by dopravovaly mláto mezi dezintegrační jednotkou a fermentorem. Tyto náklady nejsou v tomto výpočtu uvažovány.

## 6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala anaerobní fermentací biologicky rozložitelných odpadů a vlivem dezintegrace vstupního materiálu na tento proces. Byly zde popsány jak biologicky rozložitelné odpady, samotná anaerobní fermentace, tak i její produkt, bioplyn. Je zde uvedeno několik dezintegračních metod jak těch v praxi již používaných a ověřených, tak i těch nových a ne úplně rozšířených.

Hlavním těžištěm práce však bylo posouzení dezintegrace na vlastních experimentech. K tomuto účelu byla sestavena vhodná aparatura a provedeno šest hlavních pokusů, na kterých byla sledována produkce bioplynu v závislosti na dezintegračním stupni substrátu, jímž bylo pivovarské mláto s inokulem (čistírenský kal) a dva doplňkové pokusy, na nichž byla sledována produkce bioplynu, ale především posouzen úbytek organických látek v substrátu po fermentaci.

Mláto bylo posuzováno ve třech typech (surové, I. stupeň dezintegrace, II. stupeň dezintegrace). Změna granulometrického složení byla ověřena formou síťové analýzy.

Bohužel pokusy neprobíhaly úplně ideálně. Produkce bioplynu ani zdaleka nedosahovaly teoretických hodnot vypočítaných taktéž v této práci. Produkce bioplynu se vždy zastavila již po jednom dni a z analýzy složení plynů provedené na několika vzorcích vyplynulo, že uvolněný bioplyn neobsahoval skoro žádný metan. Přesněji tedy obsahoval ho maximálně do 4,5 %. Naproti tomu byl v bioplynu zaznamenán značný obsah vodíku. Při anaerobní fermentaci tak nejspíše vůbec nenastala fáze metanogeneze, při které je produkován metan a proces se zastavil, Tomu by odpovídala i krátká doba produkce bioplynu. Jelikož byly fermentory vyrobeny z PET lahví, nebylo možné v nich během pokusu měřit pH, ani jiné hodnoty, které by mohly mít vliv na ukončení procesu. Analýza plynů proběhla z důvodů popsaných v práci až v době, kdy byla provedena většina experimentů a na jejich opakování například za jiných podmínek již nezbýval dostatek času.

Z provedeného posouzení změny množství organických látek na výstupu z fermentoru při 7. a 8. pokusu vyplynulo, že skoro ve všech vzorcích došlo k přírůstku množství organických látek v sušině na výstupu z fermentoru. Nejeví se zde však žádná závislost změny množství organických látek na stupni dezintegrace materiálu. Při standardním průběhu anaerobní fermentace by se měl podíl organických látek v sušině spíše snižovat, jelikož se uvolňují ve formě plynů.

I přes tyto problémy však bylo možné pozorovat nárůst produkce bioplynu v závislosti na dezintegraci mláta. Ten lze dobře vidět na pokusu č. 7, při kterém byly ve fermentorech všechny tři typy úpravy mláta. Průměrné navýšení produkce bioplynu při fermentaci mláta v I. stupni dezintegrace bylo o 8,65 % a ve II. stupni o 21,705 %.

Pro výpočet ekonomické bilance dezintegrace byla vzhledem k minimálnímu množství metanu v bioplynu uvolněném při těchto pokusech použita hodnota obsahu metanu z literární rešerše. Hodnoty přírůstků bioplynu však již pocházejí z těchto měření. Z výpočtu vyplynulo, že při zařazení dezintegrace před anaerobní fermentaci zvýšené výnosy bioplynu pokryjí bezpečně náklady na vlastní dezintegraci a dojde ke zlepšení profitu. Výpočet je však proveden pouze pro vlastní laboratorní podmínky. Ve velkém provozu by se musely vzít v úvahu ještě možné další dodatečné náklady spojené s dezintegrací.

V případě opakování měření by bylo vhodné provádět experimenty na větších fermentorech, u kterých by bylo možné sledovat pH, tlak, popřípadě další pomocné údaje. Při nestandardním chování procesu by tak bylo možné snáze odhalit, kde se může ukrývat problém. Také lze pro další případné práce na toto téma doporučit odzkoušení jiných

materiálů, než jen pivovarské mláto, které se standardně v bioplynových stanicích nezpracovává. V této diplomové práci však bylo použito pro snadnou dostupnost.

Výsledky této diplomové práce přispívají k řešení projektu NVP II 2B08048 „Odpady jako surovina a zdroje energie“.



## Seznam použité literatury

- [1] ZEMÁNEK, Pavel et al. *Biologicky rozložitelné odpady a kompostování* [online]. Praha: VÚZT, v.v.i., 2010 [cit. 2011-12-26]. ISBN 978-80-86884-52-3. Dostupné z: <http://svt.pi.gin.cz/vuzt/novinky/17.pdf>.
- [2] ALTMANN, Vlastimil: Nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. *Biom.cz* [online]. 2010-08-18 [cit. 2012-12-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-biologicky-rozlozitelnymi-odpady>. ISSN: 1801-2655.
- [3] Bioodpady a legislativa. *EnviWeb* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/74108/bioodpady-a-legislativa>
- [4] SIROTKOVÁ, Dagmar: Legislativa biologicky rozložitelných odpadů. *Biom.cz* [online]. 2006-04-28 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z : <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/legislativa-biologicky-rozlozitelnych-odpadu>. ISSN: 1801-2655.
- [5] JINDRA, David. Studie nakládání s biologicky rozložitelnými odpady v Královéhradeckém kraji. In: [online]. Praha, 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://www.cistykraj.cz/pool/files/Studie\\_BRO\\_KHK\\_2009.pdf](http://www.cistykraj.cz/pool/files/Studie_BRO_KHK_2009.pdf)
- [6] STRAKA, František: Komunální odpady - anaerobní fermentace versus skládkování. *Biom.cz* [online]. 2005-08-24 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/komunalni-odpady-anaerobni-fermentace-versus-skladkovan>. ISSN: 1801-2655.
- [7] Oblast biologicky rozložitelných odpadů. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2012-01-15]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/cz/oblast\\_rozlozitelne\\_odpady](http://www.mzp.cz/cz/oblast_rozlozitelne_odpady).
- [8] SLEJŠKA, Antonín, HABART, Jan: Zařízení využívající biodegradabilní odpady. *Biom.cz* [online]. 2002-04-30 [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zarizeni-vyuzivajici-biodegradabilni-odpady>. ISSN: 1801-2655.
- [9] SIROTKOVÁ, Dagmar. *Nakládání s biologicky rozložitelnými odpady (BRO) včetně kalů z ČOV-změny v legislative odpadů v ČR* [online]. Praha: VÚV T.G.M. v.v.i., 2008 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://kchbi.chtf.stuba.sk/cevoze/doc/Prednasky%20KaO%202008.pdf>.
- [10] VÁŇA, Jaroslav: Koncepce nakládání s komunálními bioodpady v České republice. *Biom.cz* [online]. 2002-01-09 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/koncepce-nakladani-s-komunalnimi-bioodpady-v-ceske-republice>. ISSN: 1801-2655.
- [11] MOŇOK, Branislav: EÚ naznačila jasné smerovanie v nakladaní s biologicky rozložitelným odpadom. *Biom.cz* [online]. 2003-02-10 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/eu-naznacila-jasne-smerovanie-v-nakladani-s-biologicky-rozlozitelnym-odpadom>. ISSN: 1801-2655.
- [12] MATULOVÁ, Dragica: Strategie a nástroje pro nakládání s biodegradabilními komunálními odpady v Evropě. *Biom.cz* [online]. 2002-11-29 [cit. 2012-03-03].

- Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/strategie-a-nastroje-pro-nakladani-s-biodegradabilnimi-komunalnimi-odpady-v-evrope>. ISSN: 1801-2655.
- [13] DOHÁNYOS, Michal et al. *Anaerobní čistírenské technologie*. Brno: NOEL 2000 s.r.o., 1998. ISBN 80-86020-19-3.
- [14] Anaerobní digesce. *Cs.wikipedia.org* [online]. [cit. 2011-12-05]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Anaerobn%C3%AD\\_digesce](http://cs.wikipedia.org/wiki/Anaerobn%C3%AD_digesce)
- [15] DOHÁNYOS, Michal. Teoretické základy anaerobní fermentace. *Czba.cz* [online]. [cit. 2011-12-05]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/index.php?art=page&parent=vse-o-bioplynu&nid=teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace>
- [16] DOHÁNYOS, Michal a Pavla ŠMEJKALOVÁ. *Biotechnologie v ochraně životního prostředí* [online]. Praha, 2006 [cit. 2011-12-16]. Dostupné z: [www.vscht.cz/document.php?docId=5747](http://www.vscht.cz/document.php?docId=5747)
- [17] KAJAN, Miroslav a Richard LHOTSKÝ. *Možnosti zvýšení výroby bioplynu na stávajících zařízeních* [online]. Třeboň, 2006 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/30.pdf>
- [18] STRAKA, František et al.: *Bioplyn*. Říčany: GAS, 2003. ISBN 80-7328-029-9.
- [19] ŽÍDEK, Michal. Anaerobní digesce zvolených substrátů na laboratorním fermentoru. [online]. Brno, 2004 [cit. 2011-12-13]. Dostupné z: [http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa\\_iii/papers/08-Zidek.pdf](http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iii/papers/08-Zidek.pdf)
- [20] MUŽÍK, Oldřich, KÁRA, Jaroslav: Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR. *Biom.cz* [online]. 2009-03-04 [cit. 2011-12-13]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>. ISSN: 1801-2655.
- [21] *Bioplyn*. [online]. [cit. 2011-12-14]. Dostupné z: [http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD\\_Biomasa\\_nove/Pdf/Bioplyn.pdf](http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/Bioplyn.pdf)
- [22] DOHÁNYOS, Michal: Zvyšování efektivity fermentace - nejnovější poznatky ve výzkumu a praxi. *Biom.cz* [online]. 2009-02-25 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zvysovani-efektivita-fermentace-nejnovejsi-poznatky-ve-vyzkumu-a-praxi>. ISSN: 1801-2655.
- [23] DOHÁNYOS, Michal. Závislost výtěžku metanu na složení a předúpravě suroviny. *Czba.cz* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/zavislost-vytezku-metanu-na-slozeni-a-preduprave-suroviny.html>
- [24] MAROUŠEK, J. Produkci bioplynu lze zvýšit dezintegrací vstupní fytomasy. *Energie 21* [online]. 2011, č. 1 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z: [http://www.energie21.cz/archiv-novinek/Produkci-bioplynu-lze-zvysit-dezintegraci-vstupni-fytomasy\\_\\_s303x55084.html](http://www.energie21.cz/archiv-novinek/Produkci-bioplynu-lze-zvysit-dezintegraci-vstupni-fytomasy__s303x55084.html)
- [25] DOHÁNYOS, Michal. Vliv dezintegrace na produkci bioplynu. *SOVAK* [online]. 2005, roč. 14, č. 11 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z: [http://www.sovak.cz/sites/File/casopis\\_cela\\_cisla\\_2005/11\\_05.pdf](http://www.sovak.cz/sites/File/casopis_cela_cisla_2005/11_05.pdf)

- [26] DOHÁNYOS, Michal. Bioplyn-zdroj energie na ČOV. [online]. [cit. 2012-02-09]. Dostupné z: [http://www.sovak.cz/sites/File/odborne\\_akce/uskutecnene/2010/Prof\\_Ing\\_Michal\\_Dohanyos.ppt](http://www.sovak.cz/sites/File/odborne_akce/uskutecnene/2010/Prof_Ing_Michal_Dohanyos.ppt)
- [27] DOHÁNYOS, Michal et al. Závěrečná zpráva 2004. In: [online]. [cit. 2012-02-19]. Dostupné z: <http://www.mze-vyzkum-infobanka.cz/DownloadFile/5219.aspx>
- [28] IKA® T-25 Digital High-Speed Homogenizer Systems - IKA® T-25 ULTRA-TURRAX® Digital Homogenizer Kit, 115VAC. *Coleparmer.com* [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: [http://www.coleparmer.com/Product/IKA\\_small\\_sup\\_reg\\_sup\\_small\\_T\\_25\\_ULTRA\\_TURRAX\\_small\\_sup\\_reg\\_sup\\_small\\_Digital\\_Homogenizer\\_Kit\\_115VAC/EW-04739-03](http://www.coleparmer.com/Product/IKA_small_sup_reg_sup_small_T_25_ULTRA_TURRAX_small_sup_reg_sup_small_Digital_Homogenizer_Kit_115VAC/EW-04739-03)
- [29] ZÁBRANSKÁ, Jana: Intenzifikace výroby bioplynu z rostlinných materiálů. *Biom.cz* [online]. 2010-10-18 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/intenzifikace-vyroby-bioplynu-z-rostlinnych-materialu>. ISSN: 1801-2655.
- [30] Mláto. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ml%C3%A1to>
- [31] Mletí - stanovení parametrů sypkých materiálů. In: MASARYKOVA STŘEDNÍ ŠKOLA CHEMICKÁ. [online]. Praha [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: [http://www.mssch.cz/sites/default/files/\\_uzivatele/valentova/Mleti09.pdf](http://www.mssch.cz/sites/default/files/_uzivatele/valentova/Mleti09.pdf)
- [32] MEDEK, Jaroslav. *Mechanické pochody*. 3. přep. vyd. Brno, 1998.
- [33] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2011 ze dne 23. listopadu 2011* [online]. 2011 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/user\\_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/2011/ER%20CR%207\\_2011OZEKVETDZ.pdf](http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/2011/ER%20CR%207_2011OZEKVETDZ.pdf)
- [34] MACÁK, Jan. VŠCHT. *Energetika-návody k výpočtům* [online]. 2001 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: [http://web.vscht.cz/mistovae/en\\_tabulky.pdf](http://web.vscht.cz/mistovae/en_tabulky.pdf)
- [35] HRUBÝ, J. Čerpání pivovarského mláta. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň, PhD.
- [36] Skládkování odpadů. *Evo Komořany* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.evokomorany.cz/index.php/ochrana-zp/skladkovani-odpadu>

## Seznam příloh

- Příloha 1 Parametry jednotlivých použitých materiálů  
Příloha 2 Naměřené hodnoty množství uvolněného bioplynu při jednotlivých pokusech  
Příloha 3 Podíl sušiny a organických látek v sušině na vstupu a na výstupu z fermentoru

## Příloha 1

### Materiál č. 1 (24. 1. 2012)

Mláto	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vz</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	33,029	62,662	39,413	33,368	29,633	6,384	0,339	21,544	94,69
2	32,658	63,803	39,462	32,974	31,145	6,804	0,316	21,846	95,356
							Průměr	21,695	95,023

Kal	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vz</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	34,053	62,477	34,987	34,462	28,424	0,934	0,409	3,286	56,21
2	31,233	61,578	32,236	31,663	30,345	1,003	0,43	3,305	57,129
							Průměr	3,296	56,67

### Materiál č. 2 (1. 2. 2012)

Mláto	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vz</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	36,561	74,711	42,988	36,871	38,15	6,427	0,31	16,847	95,177
2	39,367	71,795	44,848	39,644	32,428	5,481	0,277	16,902	94,946
							Průměr	16,875	95,062

Kal	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vz</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	31,864	62,739	32,844	32,283	30,875	0,98	0,419	3,174	57,245
2	33,539	61,868	34,435	33,925	28,329	0,896	0,386	3,163	56,92
							Průměr	3,169	57,083

### Materiál č. 3 (29. 2. 2012)

Mláto	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vz</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	34,054	62,995	39,895	34,291	28,941	5,841	0,237	20,182	95,942
2	31,234	59,821	36,957	31,468	28,587	5,723	0,234	20,02	95,911
							Průměr	20,101	95,927

Kal	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vz</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	33,03	53,033	33,653	33,292	20,003	0,623	0,262	3,115	57,945
2	32,658	55,048	33,354	32,951	22,39	0,696	0,293	3,109	57,902
							Průměr	3,112	57,924

Materiál č. 4 (14. 3. 2012)

Mláto	m <sub>m</sub>	m <sub>m+VZ</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>VZ</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	34,054	62,365	39,311	34,331	28,311	5,257	0,277	18,569	94,731
2	31,234	58,856	36,375	31,495	27,622	5,141	0,261	18,612	94,923
	Průměr							18,591	94,827

Kal	m <sub>m</sub>	m <sub>m+VZ</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>VZ</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	33,030	52,160	33,633	33,289	19,130	0,603	0,259	3,152	57,048
2	32,658	53,872	33,331	32,947	21,214	0,673	0,289	3,172	57,058
	Průměr							3,162	57,053

Materiál č. 5 (21. 3. 2012)

Mláto	m <sub>m</sub>	m <sub>m+VZ</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>VZ</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	32,66	52,435	37,016	32,883	19,775	4,356	0,223	22,028	94,881
2	31,992	48,386	35,559	32,206	16,394	3,567	0,214	21,758	94,001
	Průměr							21,893	94,441

Kal	m <sub>m</sub>	m <sub>m+VZ</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>VZ</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	33,054	53,013	34,029	33,388	19,959	0,975	0,334	4,885	65,744
2	31,239	48,633	32,047	31,52	17,394	0,808	0,281	4,645	65,223
	Průměr							4,765	65,484

Materiál č. 6 (28. 3. 2012)

Mláto	m <sub>m</sub>	m <sub>m+VZ</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>VZ</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	31,242	44,073	33,832	31,353	12,831	2,59	0,111	20,185	95,714
2	30,557	46,359	33,762	30,742	15,802	3,205	0,185	20,282	94,228
	Průměr							20,234	94,971

Kal	m <sub>m</sub>	m <sub>m+VZ</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>VZ</sub>	m <sub>suš</sub>	m <sub>anorg</sub>	P <sub>suš</sub>	P <sub>org</sub>
Vzorek	[g]							[%]	[% suš]
1	31,964	56,09	32,703	32,267	24,126	0,739	0,303	3,063	58,999
2	30,605	52,04	31,261	30,876	21,435	0,656	0,271	3,06	58,689
	Průměr							3,062	58,844

## Příloha 2

### Pokus č. 1

t [hod]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V [ml]	F 1	0	0	0	100	340	550	670	740	810	870	900
	F 2	0	0	0	90	320	510	610	670	730	790	830
	F 3	0	0	0	70	240	390	470	520	570	620	650
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
930	930	920	920	920	910	900	900	880	880	870	870	860
850	850	850	840	840	830	820	820	810	810	800	800	790
670	670	670	660	660	650	650	640	630	620	610	610	610

### Pokus č. 2

t [hod]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V [ml]	F 1	0	0	0	90	230	420	560	660	740	810	840
	F 2	0	0	0	70	200	370	520	610	690	740	790
	F 3	0	0	0	80	210	380	530	630	710	750	800
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
850	850	840	840	820	820	810	810	800	800	790	790	780
810	810	810	800	790	780	770	770	760	760	750	750	750
820	820	820	810	800	790	790	780	780	770	770	770	760

### Pokus č. 3

t [hod]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V [ml]	F 1	0	0	0	120	310	510	660	790	860	920	940
	F 2	0	0	0	120	300	500	640	770	840	910	920
	F 3	0	0	0	120	300	500	640	770	840	910	920
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
950	950	950	930	930	920	920	910	910	910	910	900	900
920	920	920	910	910	900	900	890	890	890	890	880	870
930	920	920	910	910	910	900	900	900	900	900	890	890

### Pokus č. 4

t [hod]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V [ml]	F 1	0	0	0	160	370	590	720	800	880	900	900
	F 2	0	0	0	130	340	530	660	710	750	760	760
	F 3	0	0	0	160	400	610	770	840	890	900	910
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
900	900	900	890	880	850	850	840	830	820	810	810	810
750	750	740	730	730	720	720	720	720	720	710	710	710
900	900	900	890	890	880	880	880	870	860	850	840	840

Pokus č. 5

t [hod]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V [ml]	F 1	0	0	0	0	170	390	610	750	830	920	990
	F 2	0	0	0	0	190	400	600	740	860	920	980
	F 3	0	0	0	0	190	430	620	790	890	980	1020
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1000	1000	990	980	970	950	940	930	920	910	910	900	900
1000	1000	990	980	970	960	950	940	940	930	920	910	900
1040	1040	1030	1030	1020	1020	1000	1000	1000	1000	990	990	980

Pokus č. 6

t [hod]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V [ml]	F 1	0	0	0	150	360	630	850	990	1060	1100	1130
	F 2	0	0	0	150	380	670	900	1040	1110	1150	1180
	F 3	0	0	0	150	360	630	850	990	1060	1100	1130
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1140	1140	1130	1130	1110	1100	1090	1090	1090	1080	1080	1070	1060
1190	1190	1190	1180	1170	1160	1150	1150	1140	1140	1140	1130	1130
1140	1140	1130	1120	1120	1110	1090	1090	1090	1090	1080	1080	1070

Dodatečný pokus č. 1

t [hod]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V [ml]	F 1	0	0	0	100	230	360	490	600	660	700	710
	F 2	0	0	0	100	290	450	580	700	780	820	860
	F 3	0	0	0	100	280	450	600	720	810	890	920
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	710
880	890	890	890	890	890	890	880	880	880	880	880	870
940	960	970	970	970	970	970	960	960	960	950	940	940



### Příloha 3

#### Dodatečný pokus č. 1

*Zastoupení sušiny a organických látek v sušině ve směsi na vstupu do jednotlivých fermentorů*

	m <sub>matIN</sub>	m <sub>sušM</sub>	m <sub>sušK</sub>	m <sub>sušIN</sub>	P <sub>sušIN</sub>	m <sub>orgM</sub>	m <sub>orgK</sub>	m <sub>orgIN</sub>	P <sub>orgIN</sub>
	[g]				[%]	[g]			[% suš]
F 1	255,347	21,911	4,771	26,682	10,449	20,693	3,124	23,817	89,263
F 2	255,949	21,907	4,769	26,676	10,422	20,689	3,122	23,812	89,264
F 3	255,996	21,923	4,776	26,699	10,429	20,705	3,128	23,832	89,260

*Podíl sušiny a organických látek v sušině ve směsi na výstupu z fermentorů*

	Vzorek	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vzOUT</sub>	m <sub>sušOUT</sub>	m <sub>orgOUT</sub>	P <sub>sušOUT</sub>	P <sub>orgOUT</sub>
		[g]							[%]	[% suš]
F 1	1	43,192	99,981	48,33	43,691	56,789	5,138	4,639	9,048	90,288
	2	42,848	90,475	47,371	43,273	47,627	4,523	4,098	9,497	90,604
F 2	3	46,71	112,34	52,798	47,277	65,633	6,088	5,521	9,276	90,687
	4	45,404	113,66	51,566	45,967	68,259	6,162	5,599	9,027	90,863
F 3	5	43,186	92,337	46,977	43,554	49,151	3,791	3,423	7,713	90,293
	6	41,716	85,016	45,553	42,076	43,3	3,837	3,477	8,861	90,618

#### Dodatečný pokus č.2

*Zastoupení sušiny a organických látek v sušině ve směsi na vstupu do jednotlivých fermentorů*

	m <sub>matIN</sub>	m <sub>sušM</sub>	m <sub>sušK</sub>	m <sub>sušIN</sub>	P <sub>sušIN</sub>	m <sub>orgM</sub>	m <sub>orgK</sub>	m <sub>orgIN</sub>	P <sub>orgIN</sub>
	[g]				[%]	[g]			[% suš]
F 1	255,244	20,253	3,064	23,317	9,135	19,234	1,803	21,037	90,224
F 2	255,75	20,271	3,065	23,336	9,125	19,251	1,804	21,055	90,226
F 3	255,609	20,242	3,064	23,306	9,118	19,224	1,803	21,027	90,221

*Podíl sušiny a organických látek v sušině ve směsi na výstupu z fermentorů*

	Vzorek	m <sub>m</sub>	m <sub>m+vz</sub>	m <sub>m+suš</sub>	m <sub>m+anorg</sub>	m <sub>vzOUT</sub>	m <sub>sušOUT</sub>	m <sub>orgOUT</sub>	P <sub>sušOUT</sub>	P <sub>orgOUT</sub>
		[g]							[%]	[% suš]
F 1	1	38,312	76,275	41,706	38,637	37,963	3,394	3,069	8,94	90,424
	2	33,929	78,339	37,965	34,315	44,41	4,036	3,65	9,088	90,436
F 2	3	34,055	76,656	38,101	34,421	42,601	4,046	3,68	9,497	90,954
	4	39,339	93,343	44,319	39,829	54,004	4,98	4,49	9,222	90,161
F 3	5	38,84	85,105	43,036	39,228	46,265	4,196	3,808	9,069	90,753
	6	31,976	90,601	37,339	32,495	58,625	5,363	4,844	9,148	90,323