

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

**Studijní program:** N4131 Zemědělství  
**Studijní obor:** Agroekologie  
**Katedra:** Katedra rostlinné výroby a agroekologie  
**Vedoucí katedry:** prof. Ing. Jan Moudrý, CSc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technologické a ekonomické posouzení využití extruze  
kukuřičné siláže pro výrobu bioplynu

Vedoucí diplomové práce:  
**Ing. Josef Maroušek, Ph. D., MBA.**

Autor diplomové práce:  
**Bc. Vladimír Malík**

České Budějovice, duben 2012

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Fakulta zemědělská

Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vladimír MALÍK**  
Osobní číslo: **Z10700**  
Studijní program: **N4101 Zemědělské inženýrství**  
Studijní obor: **Agroekologie**  
Název tématu: **Technologické a ekonomické posouzení využití extruze kukuřičné siláže pro výrobu bioplynu**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je technologické a ekonomické posouzení problematiky využití procesu extruze při zpracování kukuřičné siláže k výrobě bioplynu.

Proveďte literární, patentovou a legislativní rešerši problému.

Dále se pod vedením vedoucího diplomové práce seznamte s provozní problematikou přípravy extrudátů dané fytomasy.

V laboratorních podmínkách bude simulována produkce bioplynu z extrudátů kukuřičné siláže získaných za různých procesních parametrů.

Klíčovými parametry technologického posouzení bude dynamika kumulativní produkce bioplynu v návaznosti na extruzní tlak a době zdržení v extrudéru.

Z ekonomického hlediska budou hlavním srovnávacím faktorem náklady na produkci plynu, či elektrické energie a tepla.

Práci vypracujte dle Opatření děkana č. 13 ze dne 18. 12. 2009.

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy: cca 40 - 60 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. *Biogas from Waste and Renewable Resources : An Introduction*. Weinheit : WILEY HCH, 2011. 572 s. ISBN 978-3-527-32798-0.

DOSTÁL, Petr, et al. *Řízení technologických procesů*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Ústav aplikované informatiky, 2006. 98 s. ISBN 9788073184650.

GRASSI, G; COLLINA, A; ZIBETTA, H. *Biomass for energy, industry, and environment*. Athens, Greece : Elsevier Applied Science, 1992. 1430 s. ISBN 9781851667307.

MITAL, K. M. *Iogas Systems : Policies, Progress And Prospects*. India : New Age International, 1997. 278 s. ISBN 81-224-1104-5.

SAMIR K., Khanal, et al. *Bioenergy and Biofuel from Biowastes and Biomass*. Reston, Virginia, USA : American Society of Civil Engineers, 2010. 505 s. ISBN 978-0-7844-1089-9.

Organisation for Economic Co-operation and Development. *Biomass and agriculture : sustainability, markets and policies*. USA : OECD, 2004. 565 s. ISBN 92-64-10555-7.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Maroušek, Ph.D.  
Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií


Datum zadání diplomové práce: 15. března 2011

Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2012



prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.  
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA  
studijní oddělení  
Studentská 13  
370 05 České Budějovice



prof. Ing. Stanislav Kužel, CSc.  
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 15. března 2011

### **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

Datum: .....26. 4. 2012.....

.....Malík.....  
Podpis

## **Poděkování**

Touto cestou bych velice rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Marouškovi, Ph. D., MBA za poskytnutí cenných rad během tvorby diplomové práce. Dále také velmi děkuji ZD Soběšice, především Ing. Marii Hanzlové, za poskytnutí veškerých podkladů potřebných k vypracování diplomové práce.

## **Abstrakt**

Předkládaná práce posuzuje technologické využití extruze kukuřičné siláže pro výrobu bioplynu v závislosti na biologických projevech, technologických limitech, legislativě a finančních ukazatelích dané bioplynové stanice. Teoretická část této diplomové práce je zaměřena na proces extruze. Na základě robustních simulací v experimentální části lze usuzovat, že tlak 1,372 MPa se pravděpodobně pohybuje v blízkosti biotechnologického optima v návaznosti na kinetiku produkce CH<sub>4</sub> (teplota 38 °C, doba zdržení kukuřičné siláže ve vysokotlakém extrudéru UV CZ 21314 byla 600 s). Z ekonomického hlediska, bylo posuzování prováděno užitím čisté současné hodnoty (ČSH), která byla vybrána jako hlavní kritérium pro hodnocení výnosnosti investičních projektů. Daná technologie se zdá být jako velice zajímavá alternativa nejen z důvodů finanční rentability, ale i ve vztahu k životnímu prostředí.

### **Klíčová slova:**

Bioplyn, extruze, kukuřičná siláž, bioplynová stanice

### **Summary**

My work assesses the technology use of corn silage extrusion for biogas production based on biological proces, technological limits, legislation and financial indicators of the biogas station. The theoretical part of the thesis is focused on the extrusion process. Based on the robust simulation of the experimental part we can conclude, that the pressure of 1.372 MPa probably moves close to the biotechnological optimum in the relation to the kinetics production of CH<sub>4</sub> in certain conditions (the temperature of 38 °C, the delay time of the corn silage in the high pressure extruder CZ UV 21314 was 600 s). From the economic point of view, the assessment was carried out using the net present value (NPV), which serves as a criterion for evaluation of the profitability of investment projects. The technology seems to be a very interesting alternative not only for financial viability reasons, but also in relation to the environment.

### **Keywords:**

Biogas, extrusion, corn silage, biogas station

## **Obsah:**

<b>1. Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Cíl práce</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Literární rešerše</b> .....	<b>10</b>
3.1 Disponibilní zdroje fytomasy .....	10
3.2 Hlavní složky fytomasy.....	12
3.2.1 Lignocelulózové materiály.....	13
3.2.1.1 Celulóza.....	14
3.2.1.2 Hemicelulóza.....	17
3.2.1.3 Lignin .....	18
3.2.2 Škrob .....	19
3.2.3 Proteiny .....	20
3.2.4 Lipidy .....	20
3.3 Důležité faktory ovlivňující hloubku hydrolyzy .....	21
3.4 Anaerobní fermentace .....	22
3.5 Fyzikální úprava.....	25
3.5.1 Extruze .....	26
3.5.2 Steam explosion – exploze parou.....	36
3.5.3 Vodní macerace.....	38
3.6 Ekonomika bioplynových stanic .....	39
<b>4. Metodika</b> .....	<b>42</b>
4.1 Materiál .....	42
4.2 Použité zařízení .....	42
4.3 Použitý software.....	46
4.4 Vlastní postup.....	46
<b>5. Výsledky</b> .....	<b>49</b>
5.1 Mapování produkce CO <sub>2</sub> .....	49
5.2 Mapování produkce CH <sub>4</sub> .....	55
<b>6. Diskuze</b> .....	<b>62</b>
<b>7. Závěr</b> .....	<b>68</b>
<b>8. Použitá literatura</b> .....	<b>69</b>
<b>9. Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>81</b>
<b>10. Příloha</b> .....	<b>82</b>

## **1. Úvod**

Technologie výroby bioplynu (BP) dosahuje aktuálně velkého zájmu zejména díky dotovaným výkupním cenám. Představuje rentabilní způsob, jak využívat biologicky rozložitelný materiál. Důkazem toho je, že Česká republika má ke dni 15. 2. 2012 vybudováno 327 bioplynových stanic (BPS) s instalovaným výkonem 224,14 MW. Oproti ostatním obnovitelným zdrojům energie, disponují BPS minimálními výkyvy v produkci energie.

Prohloubení procesu, a tím i zvýšení výtěžnosti metanu ( $\text{CH}_4$ ), lze dosáhnout vhodnou úpravou suroviny. Je obecně známo, že zmenšením velikosti částic dezintegrací dochází k podstatnému zvětšení povrchu. U BPS znamená dezintegrace pletiv fytomasy zpřístupnění celulózových fibril, které jsou následně lépe dostupné pro hydrolytické enzymy, a prokazatelně vedou ke zvýšení produkce BP. Úpravu fytomasy lze provádět buď mechanickou, fyzikální nebo fyzikálně chemickou technologií. Avšak je třeba počítat s tím, že při úpravě dochází ke zvýšení energetických nároků.

Současná výroba BP v zemědělských BPS je založena převážně na využívání kukuřice, která se šlechtí na výkonné hybridy s vysokým energetickým potenciálem. Za dodržení doporučené agrotechniky a výživy na úrodné půdě se vyznačuje především velice vysokou a stabilní výnosností. Z jedné t kukuřičné siláže o sušině od 28,5 do 33 % lze za nejobvyklejších provozních podmínek standardně očekávat produkci mezi 160 a 280  $\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{t}^{-1}$ . V poslední době se ale začínají projevovat určité problémy, protože je pěstování kukuřice stále dražší, více dominuje v osevních postupech a nahrazuje tradiční plodiny pěstované na daném území, což způsobuje širokou škálu negativních dopadů. Nárůst nákladů na pěstování kukuřice je zapříčiněn neustálým zvyšováním cen pojištění, agrochemie, mezd, pohonných hmot, atd.

Pokud se podaří technologickými invencemi např., vhodnou úpravou fytomasy, zvýšit výtěžnost BP, sníží se kvantitativní požadavky na kukuřičnou siláž, což může představovat jak ekonomická, tak ekologická pozitiva.



## **2. Cíl práce**

Cílem práce je technologické a ekonomické posouzení problematiky využití procesu extruze horkou parou při zpracování kukuřičné siláže k výrobě BP. Posuzování probíhalo na první realizaci této technologie v ČR (UV 21314). Klíčovými parametry technologického posouzení je dynamika kumulativní produkce BP v návaznosti na extruzním tlaku a době zdržení ve vysokotlakém extrudéru. Jako hlavní srovnávací kritérium byla využita čistá současná hodnota (ČSH), která slouží jako kritérium pro hodnocení výnosnosti investičních projektů.

### **3. Literární řešerše**

#### **3.1 Disponibilní zdroje fytomasy**

Dle evropské směrnice 77/2001 ES je biomasa definována jako biologicky rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků ze zemědělství (včetně rostlinných a živočišných látek), lesnictví a souvisejících průmyslových odvětví, a rovněž biologicky rozložitelná část průmyslového a komunálního odpadu. Demirbas (2001) definoval biomasu jako veškerou organickou hmotu vznikající v organismech rostlin a živočichů. Twidell (1998) označil energii biomasy za obnovitelný zdroj energie, jelikož ji lze získat prostřednictvím slunečního záření a fotosyntézy. Gustavsson (1995) poukázal na to, že emise z biomasy jsou výrazně nižší než z fosilních paliv a označil biomasu za tzv. CO<sub>2</sub> neutrální.

Dle vyhlášky č. 482/2005 Sb., resp. novely č. 453/2008 o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy, rozdělujeme biomasu do dvou základních skupin. Biomasa podléhající termickým procesům a biomasa pro anaerobní fermentaci. Dle Donalda et al., (2004) spočívá anaerobní fermentace v mikrobiologické transformaci organických složek zvířecích exkrementů a jiné vhodné biomasy v podmínkách bez přístupu vzduchu při mírně zvýšené teplotě (30 až 40 °C) přičemž vznikne BP. Vyhláška č. 482/2005 Sb. určuje kategorie pro proces anaerobní fermentace, a to na kategorie AF1 a AF2. Kategorie AF1 zahrnuje biomasu s původem v cíleně pěstovaných energetických plodinách určenou k výrobě BP, pokud tato biomasa tvoří v daném kalendářním měsíci více než polovinu hmotnostního podílu v sušině vstupní suroviny do BPS. Všechna ostatní biomasa, včetně jejich směsí, je řazena do kategorie AF2. Zavedení těchto kategorií bylo vyvoláno potřebou odlišit a zohlednit provozní náklady pro přesné definování BPS, které mají nárok na vyšší podporu. Další rozdělení biomasy bereme dle původu a má tři základní skupiny (Khan et al., 2009). Rostlinná biomasa (fytomasa - byliny, dendromasa - dřeviny), živočišná biomasa (zoomasa) a zbytková biomasa (vedlejší produkty zemědělského a zpracovatelského průmyslu). Fytomasa je základem veškeré produkované biomasy (Epstein et al., 2012). Obsahuje dvě hlavní složky (polysacharid celulóza a derivát  $\alpha$ ). Z toho je zřejmé, že rostliny, (jako trávy a byliny) jsou materiály lignocelulózové, zatímco dřeviny jsou celulózo-ligninové, protože obsahují ligninu více.

Zpracování fytomasy je rozdílné, jedná-li se o surovinu převážně celulóзовou, škrobovou, cukernatou či surovinu víceméně ligninovou. Holtzaple et al., (1991) uvádějí, že materiály obsahující celulózu jsou obecně označovány jako lignocelulóзовé, obsahují totiž 40 až 60 % hmotnosti celulózy, 20 až 40 % hmotnosti hemicelulózy a 10 až 25 % hmotnosti ligninu. Biotechnologické zpracování ligninu je oproti celulóze obtížnější, avšak Pandey a Kim (2011) poukazují na možnosti zpracování ligninu v chemickém průmyslu zejména v oblasti barviv a paliv. Základem zpracování fytomasy je konverze základní suroviny. Suroviny cukernaté obsahují hlavně glukózu ( $C_6H_{12}O_6$ , známou jako hroznový, či krevní cukr), fruktózu ( $C_6H_{12}O_6$ , uváděn jako ovocný cukr) a sacharózu ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ , postaru třtinový cukr), případně jiný, přímo zkvasitelný cukr (Pelikán a Sáková, 2001). Celulóзовá fytomasa je sice energeticky nejbohatší, nicméně její zužitkování je tak náročné, že cukernaté a škrobnaté skupiny představují i přes vyšší náklady na zpracování stále lukrativnější alternativu. Mezi lignocelulóзовé materiály patří zejména dřevo a jeho odpady, sláma, kukuřičné palice, bagáza (zbytek po vylisování cukerné šťávy z cukrové třtiny). Nejvýznamnější lokální škrobnatou surovinou jsou označovány brambory (Pelikán a Sáková, 2001).

Způsob využití fytomasy k energetickým účelům je do značné míry předurčen fyzikálními a chemickými vlastnostmi biomasy (Abbasi, 2010). Velmi důležitým parametrem je přirozená vlhkost, resp. obsah sušiny ve fytomase (Kreuger et al., 2011). Hodnota 50 % sušiny je přibližná hranice mezi mokrymi procesy a suchými procesy v oblasti fermentace. Z energetického a ekonomického hlediska je také důležité, ve kterém termínu plodiny sklízet. Obecně největší nárůst fytomasy je u většiny plodin v době kvetení nebo těsně po odkvětu. Potom dochází k postupné ztrátě  $H_2O$ . V prvním termínu sklizně má obsah  $H_2O$  ve fytomase rozmezí 60-80 % (sušina 40-20 %). Přestože existuje více způsobů využití biomasy k energetickým účelům, v praxi převládá ze suchých procesů spalování biomasy, z mokrých procesů výroba BP anaerobní fermentací (LeGendre, 2009).

Nejobvyklejším vstupem s nejlepším poměrem ceny a produkce BP je lokálně, již dlouhodobě využívána kukuřičná siláž, u které se sušina nejčastěji pohybuje od 28,5 do 33 %. Z používaných substrátů pro BPS tvoří 34 % z celkového množství (Šnobl, 2005).

### 3.2 Hlavní složky fytomasy

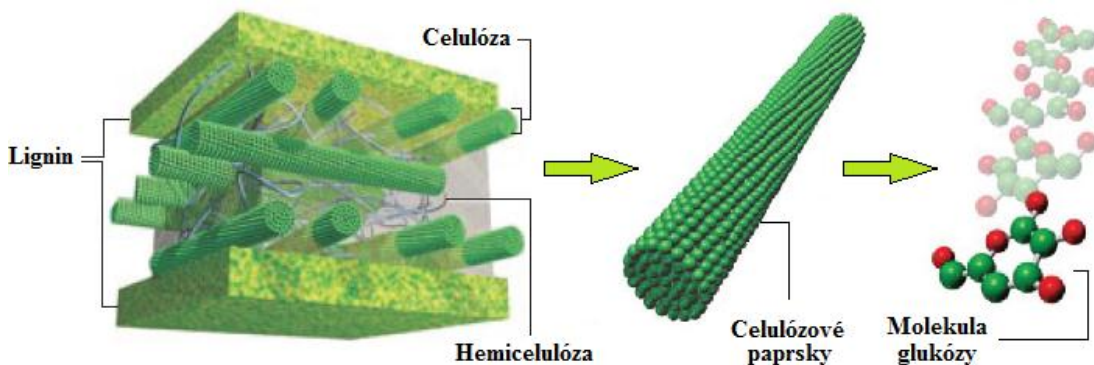
Fytomasa obsahuje široké spektrum základních komponentů, jejichž biodegradabilita je různá (Shirato a Yokozawa, 2006). Zahrnuje snadno rozložitelné polysacharidy, jako je např. škrob nebo hemicelulóza, a dále obtížněji rozložitelné makromolekuly. Nejvýznamnějšími reprezentanty této skupiny je celulóza, anaerobně rozložitelná zhruba z více než 80 %, a lignin (Ress et al., 1998). Lignin je látka ve fermentorech prakticky nerozložitelná (Odier a Monties, 1983). Obecně lze říci, že aromatické struktury jsou anaerobně velice obtížně degradovatelné (Dohányos, 1998). Polysacharidy patří mezi biologické polymery, které mají důležitou úlohu při stavbě rostlin, živočichů, hub a mikroorganismů (celulóza, chitin, pektin, hemicelulóza) a jsou zásobou energie pro různé biochemické reakce. Z tohoto pohledu vyplývá, jakými odlišnostmi se polysacharidy vyznačují, přičemž na jejich tvorbě se podílí pouze několik monosacharidů a jejich derivátů. Tyto monosacharidy se vyskytují jako  $\alpha$  nebo  $\beta$  anomery a jsou nejčastěji vázány (1 $\rightarrow$ 4) glykosidickými vazbami (Čopíková a Synytsya, 2004). Druh vazby ovlivňuje konfiguraci řetězce a výsledné vlastnosti polysacharidů. Pokud hydroxylová skupina směřuje dolů, jedná se o  $\alpha$ -glukózu, pokud směřuje nahoru, jde o  $\beta$ -glukózu.

Při vzájemném spojení dvou jednotek glukózy dojde ke vzniku disacharidů. Napojením  $\alpha$ -glukózy vznikne maltóza a spojením  $\beta$ -glukózy vznikne celobióza. Násobným propojením těchto disacharidových jednotek vznikají polysacharidy škrob a celulóza (Blažej a Michlík, 1975). Dle chemického složení dělíme polysacharidy na homopolysacharidy (složené z molekul jednoho druhu) a heteropolysacharidy (složené z molekul více druhů). Z polysacharidů má pro kvasné procesy největší význam škrob a celulóza, z produktů jejich hydrolýzy pak i dextriny (Krumphanzl et al., 1988). Převládající složkou u kukuřice jsou sacharidy (glycidy), hlavně škrob, na nějž připadá přibližně 60-70 % hmotnosti v sušině, na cukry 1,5-5 %, na dextriny 1-6 %, obsah vlákniny činí nejvýše 2 % (Zimolka, 2008). Obsahuje také až 5 % tuku. Tuk se skládá převážně z nenasycených mastných kyselin, jako je kyselina linolová ( $C_{18}H_{32}O_2$ ) a kyselina olejová ( $C_{18}H_{34}O_2$ ). V malém množství se v něm nachází také kyselina palmitová ( $C_{16}H_{32}O_2$ ) a stearová ( $C_{18}H_{36}O_2$ ). Kukuřice má nízký obsah dusíkatých látek (asi 9-9,5 %). Převažují zásobní bílkoviny zein (prolamin) a gluteliny, které mají nízkou biologickou hodnotu, obsahují málo lysinu a tryptofanu.

### 3.2.1 Lignocelulózové materiály

Dle Straky (2006) lze pohlížet na strukturu lignocelulózových materiálů (LCM) jako na vyztužený betonový pilíř, kde celulózná vlákna představují železné pruty a lignin cement jako pojivo.

Grafika 1: *Struktura lignocelulózového materiálu*



Zdroj: Huber, Dale, 2009

Celulózná vlákna jsou pevně svázána s ligninem vodíkovými a kovalentními vazbami (Mussatto a Teixeira, 2010). Vzájemně propletené struktury celulózy, hemicelulózy a ligninu jsou příčinou různé biologické rozložitelnosti.

Hemicelulózy jsou nejnádhěji hydrolyzovány na své cukerné složky, nicméně obalení celulózy ligninem má za následek zpomalení jejího rozkladu (Straka, 2006). Celulóza, hemicelulózy a lignin jsou skupiny, které ve vláknině nalezneme ve velmi různých zastoupeních. Hemicelulózy většinou výrazně převažují nad celulózu (Straka, 2003). Existují vazby i mezi celulózu, hemicelulózu a ligninem (Taherzadeh, 1999). Vodíkové vazby spojující řetězce celulózy vytváří takzvané mikrofibrily, které jsou propojeny navzájem s hemicelulózu a jako pojivo funguje lignin (Taherzadeh a Karimi, 2008). Dle Mantanise, Younga, Rowella, (1995) bylo zjištěno, že vodíkové vazby a velikost molekul patří mezi nejdůležitější parametry v bobtnání různých celulózných vláken v organických rozpouštědlech. K bobtnání celulózy dochází poutáním molekul  $H_2O$  volnými alkoholickými skupinami v amorfních oblastech vlákna (Boluk, 2005). Bylo také zjištěno, že teplota má velký vliv na rychlost bobtnání ze čtyř typů komprimovaných vláken v různých rozpouštědlech. Hlavní vlastnost, kterou od rozpouštědla požadujeme, je vyrušení vodíkové vazby a nadmolekulové struktury celulózy. Celulóza při účinku rozpouštědel nejdříve nabobtná a po té vznikají viskózní koloidní roztoky.

Schroeder et al., (1985) uvedl jako vhodné rozpouštědla např. roztoky anorganických solí, anorganických kyselin či organické amoniové zásady. Dle Remyho (1972) má však největší význam ohledně rozpustnosti celulózy tzv. Schweizerovo činidlo. Jedná se o krystalický hydroxid tetraammin-měďnatý  $[(\text{Cu}(\text{NH}_3)_4)(\text{OH})_2]$ , který nelze připravit z vodného roztoku, neboť se při stání na vzduchu roztok samovolně rozkládá. Celulóza je odolná vůči biologickému i chemickému působení.

### 3.2.1.1 Celulóza

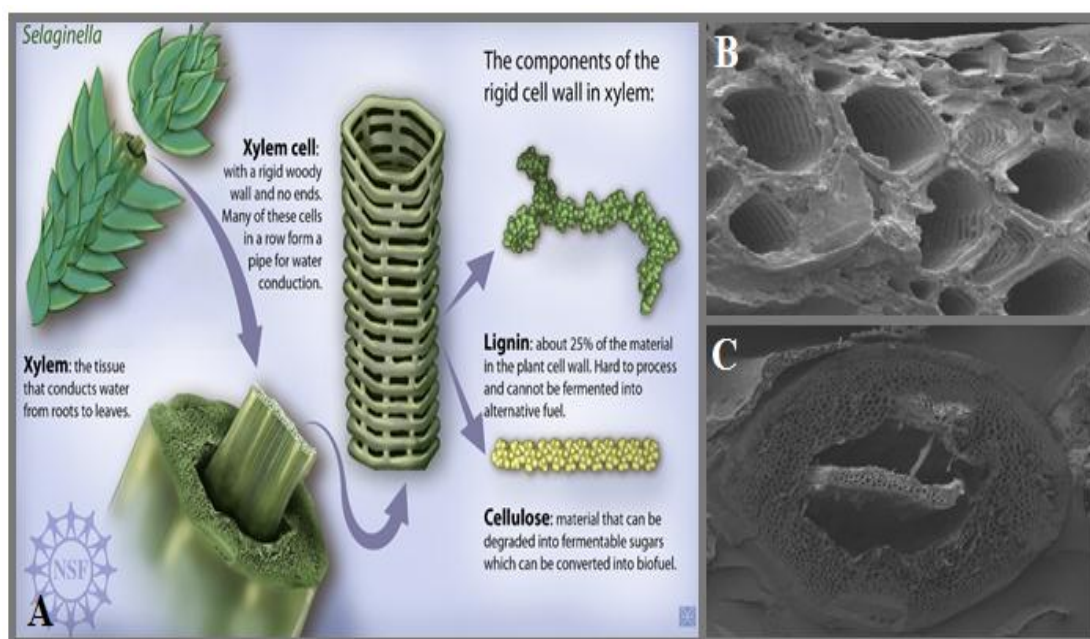
Celulóza je syntetizovaná enzymem celulosasyntasa, který je lokalizovaný v plazmatické membráně, šest jednotek enzymu je uspořádáno do kruhu, šest takových kruhů pak tvoří rosetu, která se tedy skládá z 36 enzymů (6x6, roseta). Každý enzym katalyzuje polymerizační reakci za vzniku jednoho vlákna (makromolekuly) celulózy, 36 vláken celulózy vzniklé z jedné rosety vytváří micelu, základní krystalinní strukturní jednotku buněčné stěny (Delmer a Amor, 1995). Pravděpodobně neexistuje žádný biochemický proces v rostlinách, který je tak důležitý a špatně srozumitelný na molekulární úrovni, jako je syntéza celulózy.

Je to překvapivé, jelikož základní syntetika je jednoduchá polymerace glukózy, jako je UDP-glukóza (uridindifosfát glukóza), která je donorem glukózy pro reakci katalyzovanou glykogen syntézou. (Kuga a Brown, 1991). Ve struktuře rostlin je možno rozlišit několik vrstev buněčných stěn. Nejsvrchnější vrstvu tvoří střední lamela, která tvoří pektinovou mezivrstvu mezi buňkami (Buchanan, 2000). Primární buněčná stěna je tvořena celulózou (krystaloidní organizace do mikrofibril). Mikrofibrily jsou v ploše buněčné stěny uspořádány nepravidelně a tvoří síťovitou strukturu. Velikost mikrofibril se může mezi organismy lišit od tzv. základních fibril (36 řetězců) až po velké, které mohou dosahovat více než 200 řetězců (Kuga a Brown, 1991).

Sekundární buněčná stěna je tvořena hlavně celulózou (větší podíl než u primární buněčné stěny, téměř chybí pektiny a glykoproteiny kromě extenzinu) a je vrstevnatá, mikrofibrily celulózy leží paralelně vedle sebe v rámci jedné vrstvy (McNeil et al., 1984). Sekundární stěna se ukládá na stěnu primární opět směrem do středu buňky (Buchanan, 2000).

Celulózové řetězce spojené vodíkovými můstky vytváří mikrofibrilu o tloušťce 20-30  $\mu\text{m}$ , která je základní stavební jednotkou celulózní buněčné stěny (Delmer a Amor, 1995). Typická buněčná stěna dvouděložné rostliny je v průměru tvořena z 30% celulózou, 25 % hemicelulózou, 35 % pektinem a z 5 % proteiny. Buněčná stěna je tvořena makromolekulami glykanů, hlavně celulózy (Brown, 1985).

Grafika 2: *Struktura lignocelulózové fytomasy*

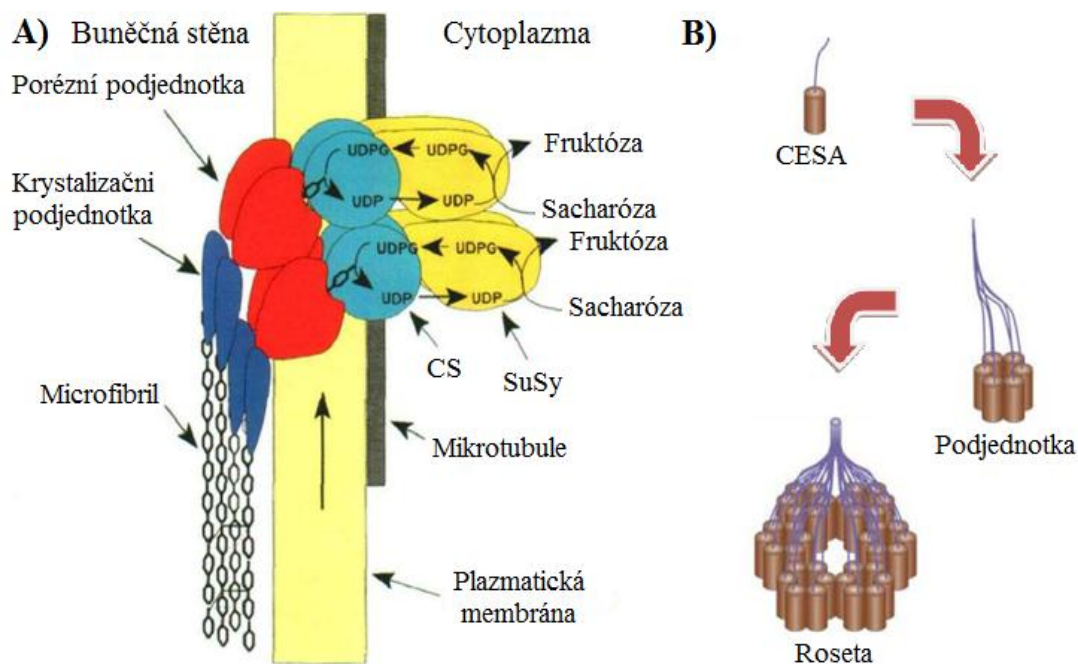


B,C) Pohled na tkáň buňky *lycophyte Selaginella moellendorffii*

Zdroj: National Science Foundation, 2009

Polysacharidy jsou syntetizovány ve vezikulách, zatímco extenzin je tvořen na endoplazmatickém retikulu. Naproti tomu syntéza celulózy a utváření jejich mikrofibril se uskutečňuje na tzv. rosetě, což je komplex šesti molekul enzymu (Geigenberger a Stitt, 1993). Složení a funkce celulozo-syntézového komplexu jsou pletivově specifické a tudíž rozhodující pro tak odlišné stavby buněčných stěn, jaké se v rostlinách vyskytují. Dynamický charakter syntézy celulózy je důležitý pro modifikaci buněčné stěny během ontogeneze rostliny i adaptaci k měnícím se podmínkám prostředí (Valla et al., 1989). Proces syntézy celulózy nezahrnuje jen řetězec polymerace, ale i mechanismy, které určují, jak a do jaké míry tyto řetězce spojit (Bolwell, 1993).

Grafika 3: A) Hypotetický model komplexní syntézy celulózy v plazmatické membráně B) Struktura vzniku rosety



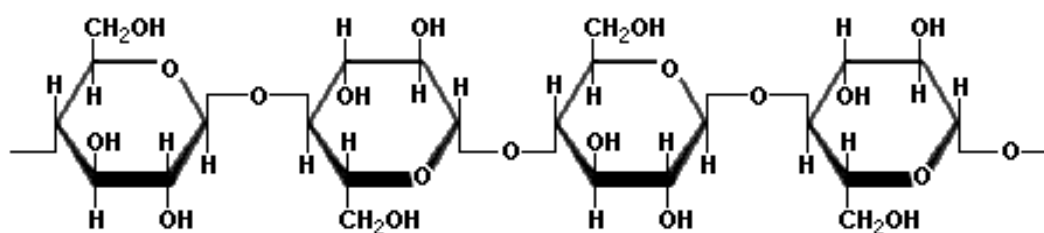
Zdroj: Delmer a Amor, 1995 (úprava - autor)

Celulóza je schopna vytvářet krystalické formy a její řetězce jsou různě prostorově orientovány (spirální a lineární struktury). Základní složkou celulózy je D-glukóza. Při enzymatické hydrolýze odštěpují exoglukanázy konce řetězců celulózy a endoglukanázy rozbíjejí řetězce uprostřed. Meziprodukt hydrolýzy se nazývá celobióza a teprve jejím rozpadem pomocí enzymu  $\beta$ -glykosidázy vzniká glukóza (Alvira, 2010). V průměru se v celulózovém řetězci může vázat za sebou až 1000 molekul glukózy (Jarvis, 2000). Celulóza má krystalické vlastnosti, jenž určují uspořádání molekul celulózy v tzv. micelách tvořících microfibrily.

Samotná celulóza je v buněčné stěně prostoupena necelulóзовými molekulami, zpravidla se jedná o hemicelulózy a pektinové látky. Celulóza je nerozpustná ve  $H_2O$ , působením silných minerálních kyselin ( $H_2SO_4$ , vínan sodno-železitý  $[(NaFe(C_4H_4O_6)_2)]$  dochází k hydrolýze na D-glukózu. Další důležitou složkou struktury rostlinných buněčných stěn jsou rozvětvené polysacharidy hemicelulózy, které ovíjejí lineárně vláknitou strukturou celulózy (Turner a Somerville, 1997).



Grafika 4: *Struktura celulóvého řetězce*

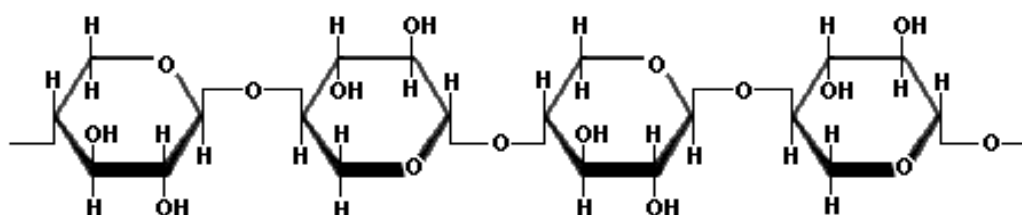


Zdroj: Canga, 2004

### 3.2.1.2 Hemicelulóza

Oproti celulóze jde o mnohem složitější heteropolysacharid, většinou amorfní obsahující rozvětvené řetězce. Hemicelulózy však snáze podléhají enzymatické hydrolýze než celulóza. Nejvíce zastoupeným polysacharidem v hemicelulózách je xylan, známý též jako dřevná klovatina. Xylan je složený z molekul D-xylózy.

Grafika 5: *Struktura xylanového řetězce*



Zdroj: Canga, 2004

Hemicelulóza je fyzickou bariérou, která obklopuje celulózová vlákna a může je chránit proti enzymickému rozkladu. Mnoho úprav fyto-masy je schopno odstranit hemicelulózu a tím zintenzivnit enzymatickou hydrolýzu, avšak většina těchto procesů odstraňuje částečně lignin, a tím pádem k velkému zlepšení nedochází. Nicméně vhodnou úpravou je odstraněna hemicelulóza a dochází k omezení potřeby použití hydrolytických činidel (Taherzadeh a Karimi, 2008). Hydrolýzou hemicelulózy je narušen balastní komplex obklopující krystal celulózy a tím je umožněno následujícím hydrolyzačním činidlům hlouběji a efektivněji proniknout do struktury celulózy. Rozpustnost dílčích sloučenin hemicelulózy je v sestupném pořadí: manóza, xylóza, glukóza, arabinóza a galaktóza; s rostoucí teplotou se zvyšuje. Při teplotě 180 °C dochází k převodu obtížně rozpustných hemicelulóz do vodného roztoku za neutrálních podmínek (Bobleter, 1994).

Garrote et al. (1999) však uvádí, že k tomu dochází již od 150 °C. Stupeň polymerizace hemicelulóz je obvykle 200 a dělí je na 3 skupiny: xylany, manany a galaktanty (Holtzaple et al., 1991).

### 3.2.1.3 Lignin

Lignin je zodpovědný za integritu a strukturální pevnost ve stěnách rostlinných buněk. Jeho obsah a distribuce jsou považovány za významný faktor, který je zodpovědný za odolnost přírodního lignocelulózového materiálu tím, že omezí přístup enzymu k celulóze (Hendriks, 2009). Lignin je hydrofobní, čímž brání ztrátám vody ze systému cév. Dává rostlině pevnost obepínáním celulózových vláken a jeho odolnost proti enzymům slouží rostlině jako evoluční obrana proti hmyzu, či mikrobům (Holtzaple et al., 1991). Z chemického hlediska je lignin heterogenní, opticky aktivní polymer skládající se z phenylpropanoidů, které jsou spojeny několika kovalentními vazbami např. aryl-ether, aryl-aryl (Hofrichter, 2002). Na rozdíl od některých jiných polymerů vyskytujících se v přírodě, v makromolekulách ligninu se strukturní jednotky pravidelně neopakují a výsledný polymer je složitější a více heterogenní než jiné přírodní polymery. Hlavní a významnou složkou sekundární stěny je lignin, který tvoří až 35 % suché hmotnosti sekundární stěny. Lignin je umístěn v matrixu a přispívá ke zvýšení mechanické odolnosti stěny. Lignin je přítomen ve většině rostlin s tzv. vaskulárním systémem, který umožňuje transport vodných roztoků od kořenů (Zuman, 1999). Lignin lze rozpouštět stejně jako hemicelulózu ve H<sub>2</sub>O při 180 °C v neutrálním prostředí. Rozpustnost ligninu závisí na prostředí (kyselé, neutrální, alkalické) a obsahu jednotlivých složek (p-kumaryl, konyferyl, sinapyl atd.). Rozpuštěný v médiu působí inhibičně na celulózy a β-glukozidázy (Holtzaple et al., 1991). Hlavní a významnou složkou sekundární stěny je lignin, který tvoří až 35 % suché hmotnosti sekundární stěny.

Tab. 1: Zastoupení jednotlivých složek v produktech (bezvodý stav % hm)

Produkt	Hemicelulóza	Celulóza	Lignin
Pšeničné otruby	30,2	14,0	4,0
Kukuřičné otruby	33,8	13,2	5,3
Brambory	2,5	2,1	0,8
Kukuřice	3,3	1,3	0,9

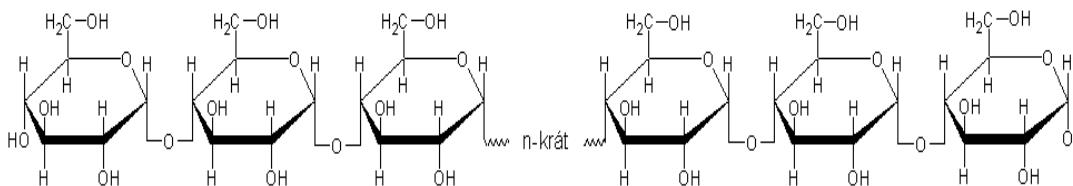
Zdroj: Straka, 2003

### 3.2.2 Škrob

Van Soest et al., (1991) uvádí, že obsah škrobu v kukuřičné siláži závisí na stádiu fenofáze, ve které byla rostlina sklížena. V období sucha se obsah škrobu u kukuřičné siláže pohybuje okolo 15-30 % v sušině dle jednotlivých oblastí. Za normálních klimatických podmínek může obsah škrobu dosahovat až 40 %. Cooke a Bernard (2005) pozorovali, že na obsah škrobu má vliv i zpracování siláže, kdy u drticích válců s mezerou 8 mm byl naměřen o 12 % nižší obsah škrobu než ve válci s mezerou 2 mm. Všechny faktory snižující intenzitu fotosyntézy, jsou příčinou menšího nalévání zrna, a tím nižšího hromadění škrobu. Na začátku nalévání zrna je vyšší zastoupení rozpustných cukrů a méně škrobu, naopak ve zralém zrně převažuje objem škrobu. Dle Debeta a Gidleyho (2007) působí lipidové a proteinové povrchové složky škrobových zrn na bobtnavost škrobu u kukuřice. Přítomnost amylo-lipidových komplexů ve škrobových zrnech hraje klíčovou roli v redukci pronikání H<sub>2</sub>O do vnitřních struktur, bobtnavosti a rozpouštění ve studené H<sub>2</sub>O (Becker, Hill a Mitchell, 2001). Škrob vzniká jako hlavní metabolický produkt v chloroplastech listů zelených rostlin. Poté bývá degradován na rozpustné sacharidy, z nichž je v jiných částech rostlin syntetizován zásobní škrob, který se ukládá v podobě škrobových zrn ve zvláštních organelách, amyloplastech (Li a Yeh, 2001). Škrob je vysokomolekulární polymer D-glukózy, v němž jsou monomerní jednotky spojeny  $\alpha$  (1→4) glykosidovými vazbami a větvení je zajištěno  $\alpha$  (1→6) glykosidovými vazbami. Skládá se ze dvou typů molekul, amyulózy (obvykle 20-30 %) a amylopektinu (obvykle 70-80 %).

Amylóza je v horké H<sub>2</sub>O rozpustnější a méně viskózní než amylopektin. Molekula amyulózy je tvořena lineárními řetězci stovek molekul glukózy. Má šroubovicovou sekundární strukturu, kde na jednu otočku závitu připadá 6 molekul glukózy (Hoover, 2001).

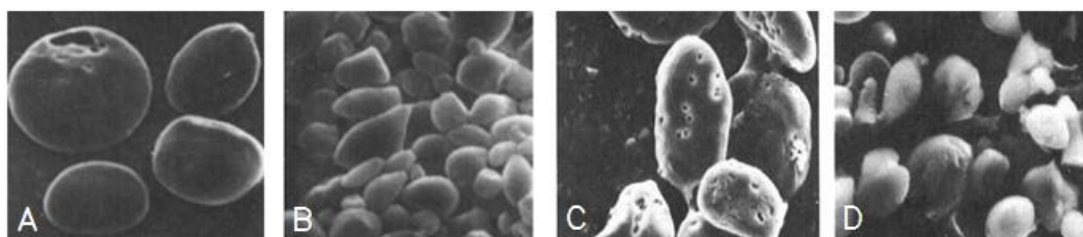
Grafika 6: *Struktura amyulózy*



Zdroj: Straka, 2003

Amylopektin se skládá z D-glukózových zbytků vázaných vazbami  $\alpha$  (1→4). Na rozdíl od amylozy se vždy po 24 až 30 glukózových zbytcích amylopektin větví prostřednictvím vazeb  $\alpha$  (1→6). Makromolekula amylopektinu obsahuje až milion glukózových zbytků, což amylopektin řadí mezi největší molekuly vyskytující se v přírodě (Bertoft et al., 2008). Macgregor a Ballance (1980) provedli studii, při které mapovali proces hydrolyzy škrobových zrn vzhledem k jejich velikosti. Proces byl prováděn na vzorku sladového ječmene. Tato studie ukazuje, že při 35 °C jsou malá škrobová zrna hydrolyzována rychleji než zrna velká.

Grafika 7: *Intaktní zrna ječmene po 5 hodinách hydrolyzy*



A) velká normální zrna degradována  $\alpha$ -amylázou II, B) malá normální zrna degradována  $\alpha$ -amylázou, C) velka vosková zrna degradována  $\alpha$ -amylázou II, D) malá vosková zrna degradována  $\alpha$ -amylázou II

Zdroj: Macgregor a Ballance, 1980

### 3.2.3 Proteiny

Bílkoviny, odborně proteiny, patří mezi biopolymery. Základními proteiny všech obilovin jsou albuminy, globuliny, gliadiny (dříve nazývané prolaminy) a gluteliny (Holgersson et al., 2005). Kukuřice cukrová obsahuje 9-12 % proteinů. Kukuřičné proteiny tvoří asi z 50 % zein, který patří mezi gliadiny a 45 % zeinin, který se řadí mezi gluteliny. Limitními aminokyselinami jsou tryptofan a lysin. Proteiny obsažené v kukuřičné siláži obsahují jak rozložitelné a nerozložitelné části. Rozložitelný podíl proteinů lze rozdělit do proteinů, které degradují rychle, a ty, které degradují pomalu (Baah et al., 2011). Dle Tamminga et al., (1991) proteiny představují možná nejvýznamnější faktor z hlediska nutriční hodnoty siláže.

### 3.2.4 Lipidy

Lipidy jsou rozsáhlou a významnou skupinou organických sloučenin běžně se vyskytujících v živé přírodě. Jejich společnou vlastností je nerozpustnost nebo omezená rozpustnost ve H<sub>2</sub>O. Rozpustné jsou naopak v organických rozpouštědlech např. v CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>CH<sub>3</sub> (Johnson, 2000).

Z chemického hlediska jsou lipidy estery vyšších karboxylových (mastných) kyselin. Podle složení je dělíme na jednoduché a složité. V jednoduchých i složitých lipidech jsou karboxylové kyseliny se sudým počtem uhlíku, s přímým nerozvětveným řetězcem. Mastné kyseliny jsou podstatnou a nejvýznamnější složkou všech lipidů. Dělí se na nasycené a nenasyčené mastné kyseliny (Příhoda, 2003).

Kukuřičné zrno obsahuje cca 5 % lipidů. Největší zastoupení mají především mastné kyseliny jako kyselina linolová ( $C_{18}H_{32}O_2$ , 60 %), kyselina olejová ( $C_{18}H_{34}O_2$ , 25 %), podíl kyseliny palmitové ( $C_{16}H_{32}O_2$ ) je 12 % a kyseliny stearové ( $C_{18}H_{36}O_2$ ) 2 % (Špaldon, 1982). Mastné kyseliny poskytují velmi vysoký podíl  $CH_4$  v BP. Boone et al., (1993) považuje mastné kyseliny, zejména kyselinu propionovou ( $C_3H_6O_2$ ), za nejdůležitější meziprodukt anaerobní digesce. Kukuřičná siláž obsahuje především nižší mastné kyseliny, zejména kyselinu mléčnou ( $C_3H_6O_3$ ). Ahring et al., (1995) poukázal na to, že pomocí mastných kyselin lze získat vhodný ukazatel výkonnosti anaerobního procesu. Pro udržení dynamické rovnováhy celého procesu je rozklad kyseliny propionové ( $C_3H_6O_2$ ) a máselné ( $C_4H_8O_2$ ) velice důležitý.

### 3.3 Důležité faktory ovlivňující hloubku hydrolýzy

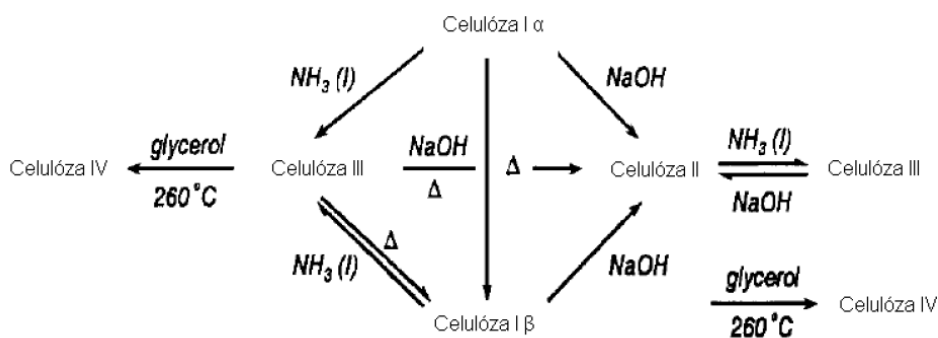
Přirozené vlastnosti LCM je činí odolnými vůči intenzivnímu nabourávání mikroorganismů. Cílem jakékoli úpravy je změnění vlastnosti lignocelulóзовých materiálů takovým způsobem, aby byl jejich mikrobiální rozklad maximálně účinný (Taherzadeh a Karimi, 2008). Důležitým faktorem je krystaličnost, která nemůže být ovlivněna úpravou suroviny (Himmel et al., 2008). Krystalinita je určena jako podíl relativního množství krystalické a amorfni oblasti. Hlavní část celulózy (asi 2/3) z celého obsahu je v krystalické formě (Taherzadeh a Karimi, 2008).

Ukázalo se, že enzymy celulózy snadno štěpí amorfni část, kdežto štěpení krystalické celulózy těmito enzymy není zdaleka tak účinné. Plodiny s vysokým obsahem krystalické celulózy budou více odolné vůči enzymatické hydrolýze a snížením krystalinity se zvýší efektivita hydrolýzy. Proto je velice důležité narušit krystalickou strukturu celulózy, čímž dojde ke snížení její odolnosti a k účinnějšímu rozkladu na její monomery, tedy glukózu (Fan a Lee, 1980). Obecně je známo, že krystalická oblast je nositelem pevnosti a nízké chemické reaktivity a amorfni oblast je nositelem ohebnosti, elasticity, a chemické aktivity (Zhang a Lyndl, 2004).

I když měření indexu krystalinity (CI) má dlouhou historii, bylo zjištěno, že CI se výrazně liší v souvislosti na vhodném výběru metody měření. Park et al., (2010) provedli studii, kde zkoumali čtyři různé metody měření Cross-polarization (CP), magic angle spinning (MAS), nuclear magnetic resonance (NMR), X-ray diffraction (XRD). Tyto metody se běžně používají pro hodnocení indexu krystalinity celulózy. I když výsledky těchto různých metod vykazují dobrou koloraci (Teeäär et al., 1987, Evans et al., 1995), mohou se získané hodnoty výrazně lišit v závislosti na volbě nástroje a techniky analýzy dat (Park et al., 2010). Nejčastější metodou, která se používá je metoda XRD, jelikož vykazuje vysoký CI oproti ostatním metodám. Metody XRD a NMR jsou závislé na několika parametrech, jako je tvar a počet vrcholů ve spektru (Atalla a Vanderhart, 1999). Zajímavé zjištění bylo, že hydratace celulózy měla za následek asi 5% nárůst hodnoty CI, což naznačuje, že se amorfní složky stávají více spořádané po přidání H<sub>2</sub>O. Z hlediska struktury je výhodné považovat celulózu za krystalickou látku. Z tohoto pohledu se může vyskytovat ve čtyřech krystalových modifikacích (Klem, Schmauder, Heinze, 2002).

Stupeň polymerizace celulózy se spojuje s ostatními charakteristikami materiálu jako je třeba krystalinita. Stupeň polymerace lze definovat jako počet glykosilových zbytků na jeden řetězec celulózy. Během hydrolýzy dochází ke štěpení interních vazeb a tím její degradaci na oligosacharid (Taherzadeh a Karimi, 2008).

Grafika 8: Transformační proces celulózy do čtyř krystalových modifikací



Zdroj: Klem, Schmauder, Heinze, 2002

### 3.4 Anaerobní fermentace

Kvalitní BP obsahuje jen zlomky procenta N, prakticky žádný H<sub>2</sub> (méně než desetiny %) a žádný kyslík. Bioplyn se svou výhřevností (20-26 MJ.m<sup>-3</sup>) přibližuje zemnímu plynu (34 MJ.m<sup>-3</sup>).

Má asi 70 % jeho výhřevnosti s ohledem na podíl CO<sub>2</sub> a vodní páry. Technologicky je možno BP upravit až na čistý CH<sub>4</sub>, ale není to v praxi zatím využíváno (Straka, 2003). Typické produkce PB a obsahy CH<sub>4</sub> v něm uvádí následující tabulka číslo 2.

Tab. 2: Produktivita různých substrátů v procesu

Zdroje	Produkce BP [m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> rozložené sušiny]	Obsah CH <sub>4</sub> [%]
Polysacharidy a jednoduché cukry	0,75-0,90	50-60
Proteiny	0,55-0,75	70-85
Lipidy	1,10-1,55	60-70

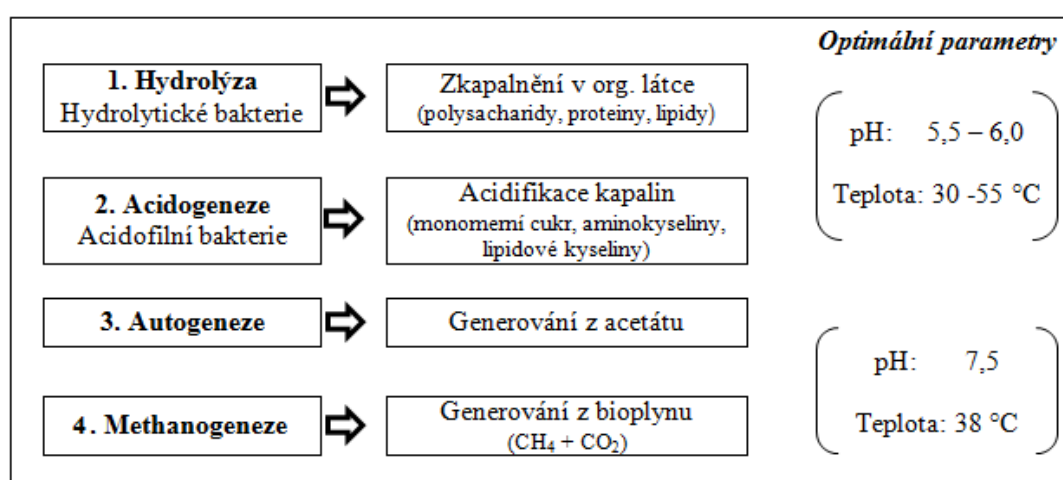
Zdroj: Štindl, 2004

Lze konstatovat, že anaerobní fermentace je soubor několika dílčích, na sebe navazujících procesů, na kterých se podílí několik základních skupin anaerobních mikroorganismů (Angelidaki et al., 2002). V první fázi dochází k hydrolytickému štěpení složitých polymerních řetězců na monomery, víceuhlíkaté organické kyseliny a alkoholy pomocí extracelulárních enzymů produkovaných mikroorganismy (celuláza, amyláza, proteázy, lipáza). Fermentační bakterie produkují především hydrolytické enzymy, které nemohou adsorbovat složité organické polymery přímo do svých buněk (Yadvika, 2004). Samotný proces zahrnuje několik kroků, jako jsou difúze, adsorpce, reakce a deaktivace enzymů (Batstone et al., 2002). Elefsiniotis a Oldham (1994) uvádějí, že hemicelulóza je degradována pomocí řady enzymů na monosacharidy, jako je např. glukóza, galaktóza, arabinóza a další. Lipidy se štěpí na glycerol a mastné kyseliny, jejichž řetězce se dále zkracují. Jedná se o fázi, kdy ještě mikroorganismy nevyžadují anaerobní prostředí. Celková rychlost hydrolyzy závisí na velikosti organických materiálů, tvaru, povrchu, koncentraci biomasy, produkci enzymů a adsorpci (Chyi a Dague, 1994).

Ve druhém kroku nazývaném acidogeneze probíhá další rozklad na jednodušší organické látky, jako jsou těkavé organické kyseliny, alkoholy, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> (Stams et al., 2005). Jako mezní faktor se ukázala hodnota parciálního tlaku H<sub>2</sub>, kdy při nízkém tlaku jsou produkovány H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> a při vyšším parciálním tlaku se tvoří organické kyseliny, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>, atd. (Ahring, 2003). V dalším stadiu rozkladu, acetogeneze probíhá oxidace těchto látek na H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> a C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>. Poslední fází anaerobní fermentace je tzv. metanogeneze, kde z C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vzniká CH<sub>4</sub> (Schink, 1997).

Dle Solera et al., (2002) patří metanogenní mikroorganismy k jedněm z nejstarších organismů na naší planetě. Metanogenní autotrofní bakterie rozkládají především  $C_2H_4O_2$  a  $CH_4$  a  $CO_2$  hydrogenotrofní bakterie produkují  $CH_4$  z  $H_2$  a  $CO_2$ . Určité kmeny metanogenních bakterií se chovají jako obojetné. Metanogenní fáze probíhá přibližně 5\* pomaleji než předchozí fáze, tomu je třeba přizpůsobit konstrukci bioplynových systémů. Vzhledem k tomu, že mikroorganismy jednotlivých skupin mají různé rychlosti růstu a rychlosti metabolismu, musí být celý soubor procesů v dynamické rovnováze. Tím pádem nastane-li porucha v jedné skupině, může způsobit celkové zhroucení v celém systému (Pastorek et al., 1992).

Grafika 9: Průběh čtyřfázové anaerobní fermentace



Zdroj: Busch et al., 2007

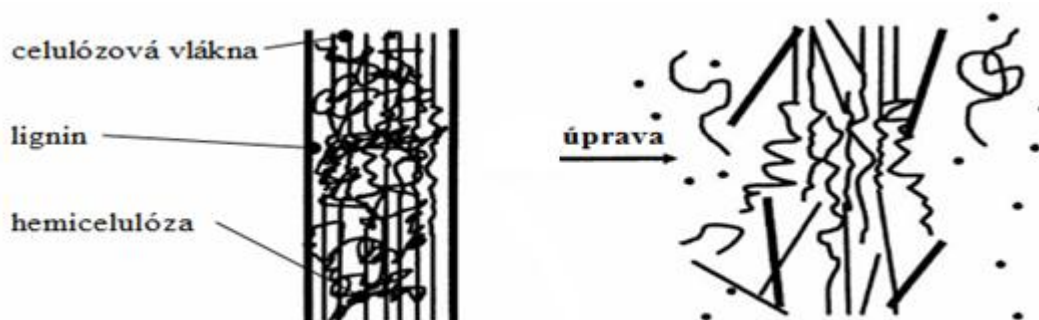
Díky vhodné úpravě lze zvýšit biologickou rozložitelnost a tím i výtěžnost BP, jelikož mikrobiální rozklad neupravených lignocelulózových plodin je příliš pomalý (Taherzadeh a Karimi, 2008). Lignocelulózové složky tvoří velkou část tuhého komunálního odpadu, zbytků živočišných hnojiv, lesního odpadu nebo zvláštních energetických plodin (Sims, 2003). Jsou složeny z celulózy, hemicelulózy, ligninu a dalšího anorganického materiálu (Sjöström, 1993). Tyto složky jsou mezi sebou vzájemně a pevně provázány a tvoří komplexní rigidní matici. Cílem úpravy je změnit tyto vlastnosti materiálu, aby byl připraven pro maximálně účinný mikrobiální rozklad (Palmqvist a Hahn-Hägerdal, 2000).

Lignocelulózové materiály se skládají ze dvou různých typů povrchů (vnější, vnitřní). Vnější se vztahuje k velikosti a tvaru, zatímco vnitřní pak závisí na kapilární struktuře vláken (Kim a Holtzapple, 2006). Velký rozdíl bereme mezi suchými materiály a matriály, kde se vyskytuje  $H_2O$ .



Přítomnost H<sub>2</sub>O má vliv na specifický povrch v oblasti celulózy, je známo, že zvyšuje krystalinitu celulózy. Oproti suchým vláknům, která mohou vyústit v zhroucení a zmenšení kapilár a tím omezit přístupnost plochy (Taherzadeh a Karimi, 2008).

Grafika 10: Schéma úpravy materiálu



Zdroj: Mosier, 2005

Procesy mohou být zařazeny do biologických, fyzikálních, chemických a fyzikálně-chemických úprav. Hlavní úloha úpravy je rozbít ligninový obal a narušit strukturu celulózy (grafika 10). Narušením struktury dochází k tomu, že se zvětší plocha potřebná k intenzivnímu přenosu tepla a hmoty. Výběr vhodné úpravy musí být co nejefektivnější vzhledem k dané vstupní surovině (Alvira, 2010).

### 3.5 Fyzikální úprava

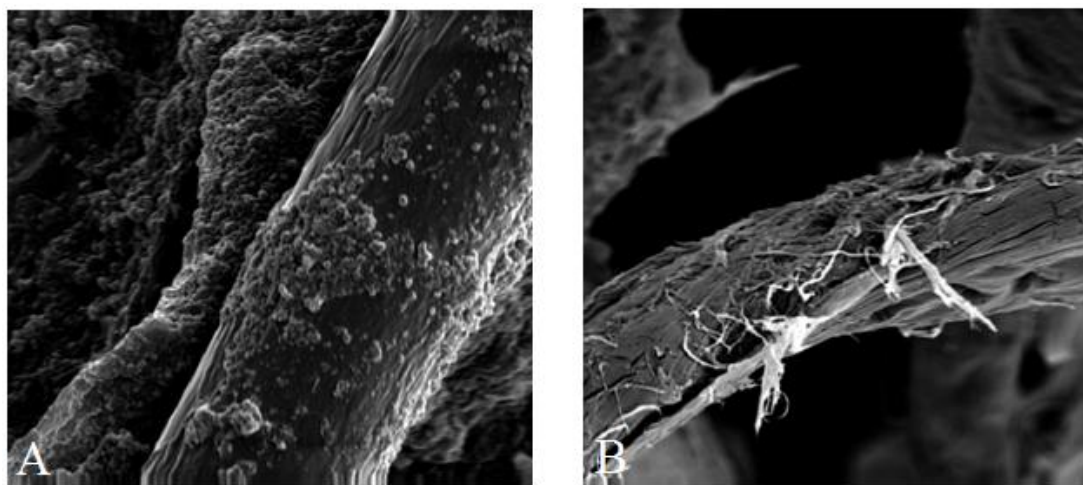
Jednou z fyzikálních metod, kterou lze využít je tzv. mechanická úprava. Považuje se za jednu z nejjednodušších metod, avšak také z nejvíce energeticky náročných. Dezintegraci rostlinné hmoty lze provádět konvenčními způsoby, mezi které lze zařadit různé drtiče a mlýny (Stuart, 1994). Mletí může být použito pro změnu vlastní struktury lignocelulóзовých materiálů, tím by došlo ke snadnějšímu přístupu k celulóze (Mais, 2002). Mezi nejčastější stroje, které lze využít jsou např. mlýny, válcovací stolice, úderové mlýny, koloidní mlýny, vibrační kulové mlýny. Kombinací rozmělnování, drcení a mletí lze dosáhnout výsledné velikosti částic 10-30 mm při lámání a 0,2-2 mm při mletí (Sun a Cheng, 2002). Nevýhodou u mletí je neschopnost odstranit lignin, který značně omezuje přístup enzymů a tím brání kvalitě procesu. Nicméně dle Hendrikse a Zeemana (2009) bylo zjištěno, že rozmělněním biomasy lze dosáhnout zvýšení účinnosti hydrolýzy o 5 až 25 %. S ohledem na vysokou energetickou náročnost mletí a růstem ceny za energii je pravděpodobné, že tento proces je ekonomicky problematický.

### 3.5.1 Extruze

Jako zajímavá a velice účinná alternativa dezintegrace se jeví tzv. extruze. Extruze je dobře zavedená metoda v potravinářském průmyslu pro úpravu krmiv. Maroušek (2011) se domnívá, že v případě užití extruze lze dezintegraci fytomasy chápat jako rychlý vysokoteplotní proces HTST (high temperature, short time proces), při kterém je materiálu dodáno teplo a mechanická energie, což v okamžiku expanze z reaktoru vyústí ve fyzikálně-chemické proměny v jeho hlubší struktuře.

Oproti mechanickým způsobům, které snižují velikost částic, extruze výrazně nemění vnější rozměry částic (Taherzadeh a Karimi, 2008). Naopak při správném nalezení optimálních parametrů na kvalitním zařízení působí extruze na dezintegraci rostlinných vláken tzv. zevnitř, ideálně až na úroveň buněk. Tento jev lze externě detekovat například snížením viskozity. Když jsou parametry nastaveny opravdu optimálně (pro každý druh fytomasy je optimální nejen jiný tlak a doba zdržení, ale i hydromodul), může dojít až k buněčné kavitaci (Maroušek, 2011). Tu lze uvnitř rostlinné buňky popsat vytvořením bublinek vakua, či plynu z okolního prostředí a následnou implozí způsobenou náhlým poklesem tlaku. Síla vakua způsobí, že do prostoru difundují ve formě par plyny z okolní kapalné fáze. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, bublina plynů imploduje za vzniku tlakové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Maroušek (2012) doplňuje, že mezi klíčové parametry patří i dynamika tlakového pádu související s technickým provedením expanzního turniketu extrudéru.

Grafika 11: *Rostlinná hmota*



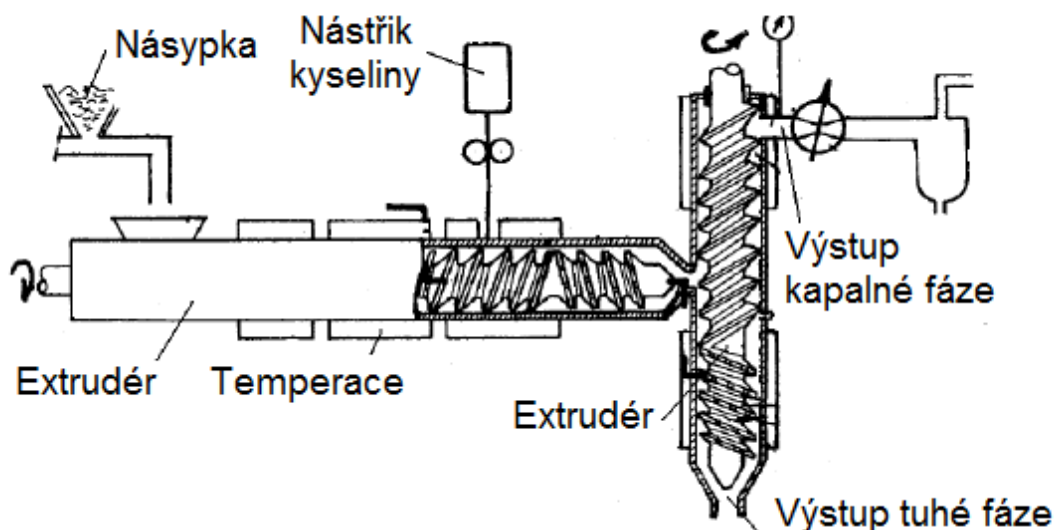
A) Rostlinná hmota v surovém stavu, B) Rostlinná hmota po extruzi

Zdroj: Maroušek, 2011

Kolektiv Alviry (2010) považuje za klíčové parametry u extrudéru pracujícího na principu otáčejícího se šroubu frekvenci otáčení a teplotu pláště. Bitra et al., (2008) tyto parametry ještě rozšířil o poměr šířky a délky extrudéru. Zvolené parametry extruze výrazně zvyšují přístupnost celulózových vláken pro enzymy a tím zlepšují možnost rozkladu polysacharidů na monosacharidy. Zvolením vhodných parametrů lze ovlivnit přítomnost inhibitorů, které by působily negativně na pochody ve fermentoru.

Konvenční šroubový extrudér se skládá ze třech hlavních částí – šneku, extruzního pouzdra a matrice. Podle geometrie a počtu pracovních elementů se používají jednošnekové, dvoušnekové a speciální vícešnekové. Pouzdro extrudéru má temperovaný plášť, který umožňuje úpravu teploty zpracovávaných surovin. K příslušenství extrudéru patří kromě elektromotoru hnacích a převodových součástí, zejména dávkovací a zvlhčovací zařízení, zařízení na předběžné míchání surovin a matrice (Kannadhasan et al., 2008). Prostor mezi šnekem a pouzdrem musí být zcela zaplněný, aby se materiál mírně stlačil a neposouval do další sekce. V této zóně má šnek hluboké drážky. V další zóně, kde se hloubka drážek šneku zmenšuje a tlak se zvyšuje. Na konci extruzního pouzdra se materiál usměrňuje do tvarovací matrice, protlačuje a expanduje (Muchová, 2007).

Grafika 12: Schéma konvenční úpravy extruzí

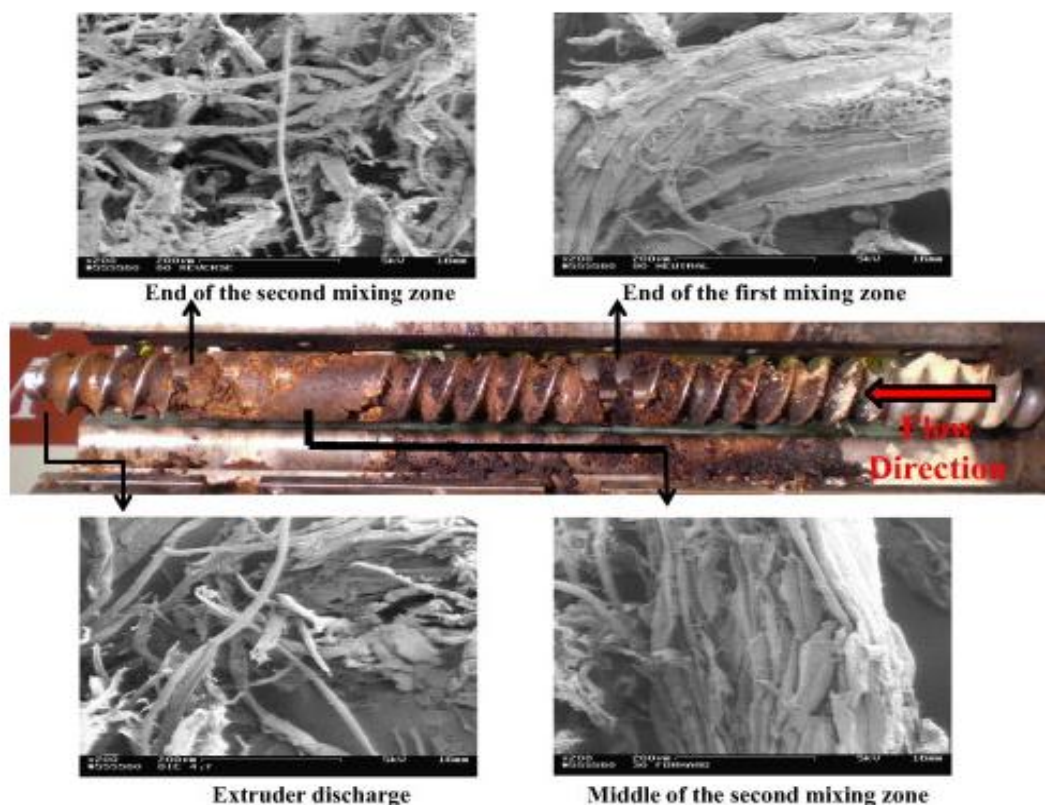


Zdroj: Berger a Gelus, 1984

Maleř (1994) rozdělil extruzi do několika základních procesů v závislosti na teplotě. Studená extruze (35-45 °C) probíhá za nízké teploty a relativně nižšího tlaku bez přívodu tepelné energie.

U nízkoteplotní extruze se vhodné komponenty smíchají s vodou, tepelně se zpracují v přední části extrudéru a před přechodem přes tvarovací trysku se materiál ochladí na teplotu pod 100 °C. Vysokoteplotní extruze (HTST) dochází k roztavení hmoty, která při průchodu přes matrici do prostředí normálního tlaku expanduje za současného vytvrzení. Jak již bylo uvedeno, rychlost otáčení šneku je důležitým faktorem pro proces extruze. Karunanithy a Muthukumarappan (2010) provedli studii, kde zkoumali vliv kompresního poměru šneku na ostatní parametry podléhající procesu (teplota, rychlost šneku, vlhkost). Extruze byla provedena pomocí jedno šroubového extrudéru, kde poměr délky a průměru byl 20:1. Při studii byly použity šrouby s kompresním poměrem 2:1 a druhý s poměrem 3:1. Otáčky šroubu se pohybovaly v intervalech 50, 100 a 150 ot.min<sup>-1</sup> při teplotě 50, 100, a 150 °C (Sluiter et al., 2008). Za zkoumané suroviny byly zvoleny proso, trávy a kukuřice s vlhkostí (15, 25, 35 a 45 %). Výsledek ukázal na to, že z uvedených surovin je nejcitlivější proso, následuje kukuřice a trávy. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při teplotě 50 °C, 150 ot.min<sup>-1</sup> a vlhkostí 15 %. Senturk-Ozer (2011) provedl studii, kde zkoumal narušení biomasy v závislosti na daném úseku šneku.

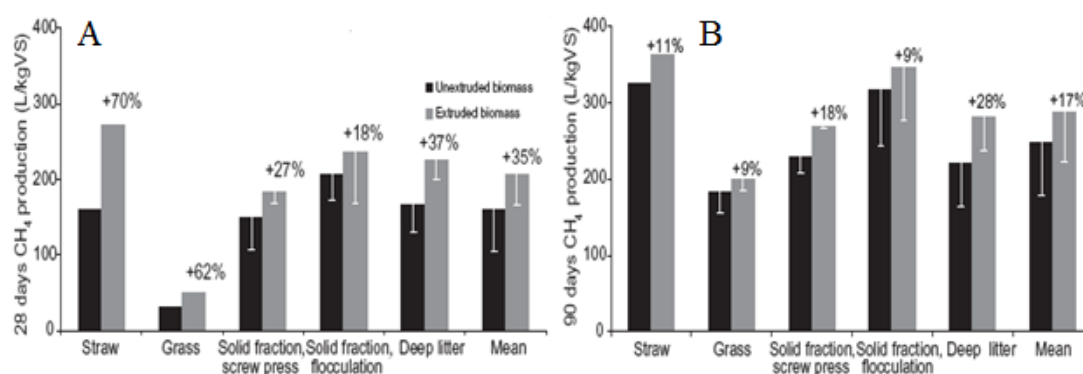
Grafika 13: Mikrofotografie vzorků biomasy odebraných z různých míst extrudéru ukazující postupné narušení materiálu



Zdroj: Senturk-Ozer, 2011

Celý pokus byl zkoumán pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Délka a průměr jednotlivých vláken se značně lišily závislosti na měřeném místě. Studií bylo zjištěno, že ve výstupní části extrudéru je struktura lignocelulózových vláken narušena až 20\* více než ve vstupní části. Hjorth et al., (2011) provedli studii, kde zkoumali vliv extruze na různé druhy biomasy. K pokusu byl využit extrudér s dvěma protiběžnými šneky (model MSZ B55e) s motorem o výkonu 55 kW. Zkoumaný vzorek byl uložen ve vzduchotěsných lahvích, kde poměr biomasy a inokula byl 2,5:1. Lahve byly uskladněny 90-110 dnů při 35 °C (mezofilní teplotě). Objem BP a koncentrace CH<sub>4</sub> se měřila asi 10\* průběžně během inkubace. Již předběžné výsledky ukázaly na to, že proces extruze způsobil nárůst produkce CH<sub>4</sub> ve všech testovaných druhů biomasy (grafika 14). Výsledky dané studie ukázali, že při použití extruze se zvýšila produkce CH<sub>4</sub> o 18-70 % po 28 dnech a 9-28 % po 90 dnech. Extruze výrazně urychlila rozklad pomalu rozložitelných látek a tím zvýšila výtěžnost BP.

Grafika 14: Vliv extruze na výnos CH<sub>4</sub> v závislosti na druhu biomasy



A) Produkce CH<sub>4</sub> po 28 dnech, B) po 90 dnech

Zdroj: Hjorth et al., 2011

Podobným výsledkům jako Hjorth (2011) došel i Karunanithy et al., (2011) při zkoumání vlivu extruze na energetické trávy. Zjistil, že díky vhodně nastaveným parametrům lze zvýšit výnos bioplynu až o 10 %. Celý pokus prováděl na travách rodu Gerardi (*Antropogon gerardi*), které mají velký potenciál pro výrobu BP. Parametry byly nastaveny na rychlost šneku od 20-200 ot.min<sup>-1</sup>, teplota na 45-225 °C, vlhkost 10-50 % a velikost částic biomasy od 2 do 10 mm. Analýza potvrdila, že všechny proměnné v této studii měly významný vliv na výsledný obsah cukrů.



Maximální výnos glukózy, xylózy a kombinace ostatních cukrů vykazovali hodnoty při teplotě 180 °C, rychlosti šneku 150 ot.min<sup>-1</sup>, vlhkosti 20 % a velikost částic 8 mm.

Grafika 15: *Vliv extruze na trávy rodu Gerardi*



A) Vstupní biomasa, B) Extruze při 180 °C, 150 ot.min<sup>-1</sup>, 20 %, 4 mm,

C) 180 °C, 150 ot.min<sup>-1</sup>, 20 %, 8 mm

Zdroj: Karunanithy et al., 2011

Yoo (2011) provedl obdobnou studii, kdy zjišťoval nejlepší podmínky extruze u sóje. Neoptimalnější podmínky sejevily při teplotě 80 °C, rychlosti šneku 350 ot.min<sup>-1</sup> a vlhkosti 40 %. Naměřené výsledky ukazovali až 13% zvýšení cukrů.

Thomasen (2005) popisuje nejběžnější zemědělské produkty, které mohou být použity jako surovina pro výrobu etanolu a Weiland (2006) popisuje plodiny vhodné na výrobu BP. Kukuřice (*Zea L.*) je široce využívána v procesech výroby BP a bioetanolu (siláž). Silážování probíhá anaerobně za pomoci kyseliny mléčné (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>). Nejlepší čas na sklizeň je, když se obsah sušiny pohybuje mezi 30-33 % sušiny. Kukuřičná siláž se skládá z tvrdého rozkladatelného lignocelulózového materiálu (list, stonek) a menšího množství škrobu (zrno). Velké rozdíly se vyskytují v obsahu škrobu a sušiny v závislosti na počasí, půdní strukturu, čas sklizně, klimatu a druhu použité kukuřice. Oproti pšeničné slámě obsahuje kukuřičná siláž více cenné organické sloučeniny na 1 kg sušiny, a proto se dá očekávat vyšší výnos etanolu.

Právě druh použité kukuřice byl náplní studie, kterou provedl Procházka et al., (2009). Studie porovnává produkci BP ze vzorků dvou hybridů kukuřice: tradiční *Limagrain LG2280* a „energetický hybrid“ *Atletico* (fy KWS). Anaerobní fermentace probíhala v sériové uzavřených lahví při teplotě 35 °C.

Tab. 3 : Výnos BP daných druhů

Parametr	LG 2280			Atletico		
	Výnos [t.ha <sup>-1</sup> ]	Obsah sušiny [%]	Produkce BP [m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	Výnos [t.ha <sup>-1</sup> ]	Obsah sušiny [%]	Produkce BP [m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> ]
<b>Lokalita</b>						
<b>I</b>	29,8	30,5	3640	37,2	31,9	6010
<b>II</b>	64,4	26,8	6880	76,3	25	8030
<b>III</b>	9,5	21,9	840	30,8	23,8	3450

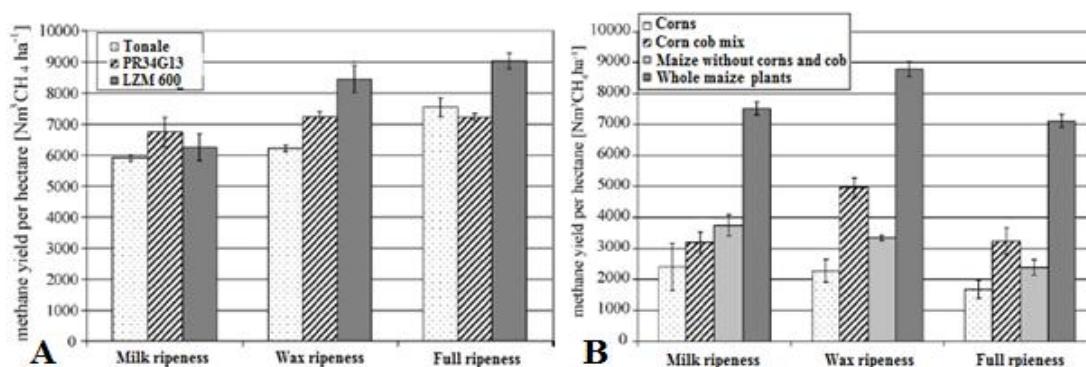
Zdroj: Procházka et al., 2009

Výsledek studie ukázal, že kukuřičná siláž je substrát s velkým potenciálem pro výrobu BP, avšak rozdíly mezi výtěžky v různých lokalitách a mezi různými hybridy mohou být značné. Větší výtěžek biomasy spolu s lepší anaerobní rozložitelností jsou faktory, které z těchto hybridů dělají velmi dobrý substrát pro bioplynové stanice (Procházka et al., 2009). Ekonomická efektivnost anaerobního rozkladu závisí na investičních nákladech provozu a na co nejlepší produkci CH<sub>4</sub> (Chynoweth, 2004).

Obsah a dostupnost látek, které jsou schopny produkovat CH<sub>4</sub>, jsou značně ovlivněny odrůdou a zralostí v době sklizně. Amon et al., (2007) provedl experiment s kukuřicí, zaměřený na hledání možností jak nejvíce zefektivnit proces výroby CH<sub>4</sub>. Poukazuje na to, že vliv na výnos má již samotná pěstební technologie. Ve studii uvádí tři různé faktory ovlivňující výnos CH<sub>4</sub>. Jako velice zásadní faktor se jeví to, jestli kukuřice prošla konzervačním procesem. Silážování je konzervační proces, při kterém je píče za stálého dusání ukládána do prostoru, který je vzduchotěsně uzavřen. Konzervace probíhá působením mléčného kvašení cukrů, obsažených v silážní surovině bez přístupu vzduchu. Cílem je co nejdříve vytvořit dostatečné množství kyseliny mléčné (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>), která je základním konzervačním činidlem, čímž se dosáhne kyselosti hmoty kolem pH 4 a tak se zamezí vzniku nežádoucích hnilobných procesů (Zimolka, 2008). Buchgraber et al., (1994) zjistil, že včasným vytvořením kyseliny mléčné dojde jen k minimálním energetickým ztrátám (3 %). Výsledkem studie bylo, že silážováním kukuřice lze zvýšit výnos CH<sub>4</sub> až o 25 %. Tomuto tvrzení oponuje Porter a Murray (2001), kteří tvrdí že výnos CH<sub>4</sub> u kukuřičné siláže není tak významný a rozdíly mezi siláží a neupravené kukuřice nejsou tak razantní. Ovšem velice příznivých výsledků bylo zjištěno u silážované řepy, která vykazovala až 51 % nárůstu výnosu CH<sub>4</sub>.

Při špatné konzervaci siláže dochází k aerobní degradaci a vzniku kyseliny máselné, octové ( $C_2H_4O_2$ ) nebo mravenčí ( $CH_2O_2$ ). Dle Madigana et al., (2000) tyto látky velice ovlivňují tvorbu  $CH_4$ . Jako příčina pro zvyšování výnosu může být rozklad vlákniny během silážování, který zvyšuje dostupnost živin. Mezi další faktor, který by mohl potenciálně ovlivnit výnos  $CH_4$  je správná doba sklizně. Dle Zscheischlera et al., (1984) je optimální doba sklizně při obsahu sušiny 30-35 %, tím dosáhneme kvalitní siláže s maximálním výnosem  $CH_4$ . Výsledky ukázali, že největší výnos  $CH_4$  u kukuřice je v plné zralosti, ovšem největší nárůst byl pozorován z přechodu z mléčné na voskovou zralost.

Grafika 16: Výnos  $CH_4$  různých odrůd kukuřice



A) Výnos  $CH_4$  v závislosti na typu zralosti,

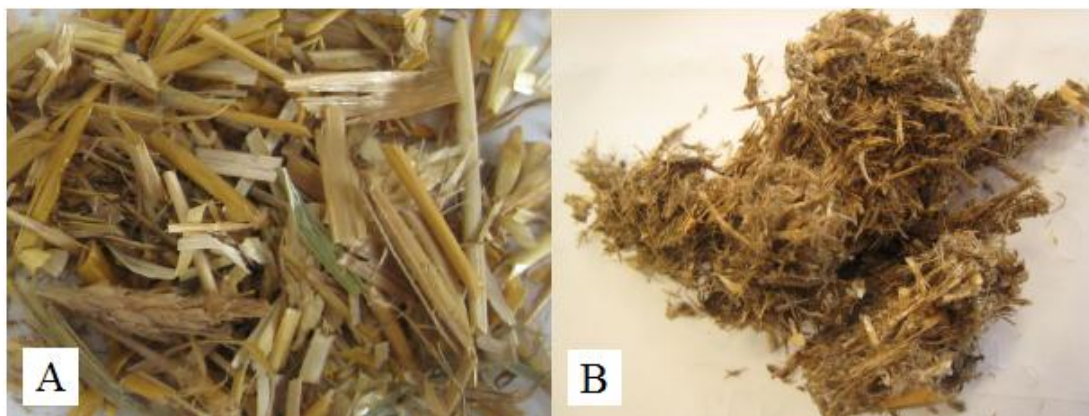
B) Výnos  $CH_4$  v závislosti na technologii zpracování

Zdroj: Amon et al., 2007

Gunaseelan (1997) zkoumal výnos  $CH_4$  u čiroku cukrového (*Sorghum saccharatum*) a zjistil, že nejen kukuřice, ale i ostatní plodiny jako čirok poskytuje odlišné výnosy  $CH_4$  v závislosti na době sklizně, technologii zpracování, odrůdě atd. Amon et al., (2005) ve své studii uvedl, že nejen uvedené faktory ovlivňují výnos  $CH_4$ , ale i vlastní technologie zpracování má vliv na vlastní produkci. Daná technologie zpracování ovlivňuje nejen výnos  $CH_4$ , ale i produkci biomasy z hektaru. Celkové výsledky ukázaly na to, že sklizní celých plodin kukuřice dosáhneme jak nejvyšších hodnot výnosu  $CH_4$ , tak i největších výnosů biomasy na hektar (grafika 16B). Borgström (2011) zkoumal vliv na kukuřičnou siláž a slámu. Již na první pohled byla vidět změna extrudovaného materiálu v barvě, velikosti částic a vyšší homogenitě (grafika 17, 18).



Grafika 17: *Extrudovaná sláma*



A) Neupravená sláma pH 7,4

B) Extrudovaná sláma: obsah sušiny 85 %, 100 °C, pH 6,1

Zdroj: Borgström, 2011

Grafika 18: *Extrudovaná kukuřičná siláž*



A) Neupravená kukuřičná siláž pH 4

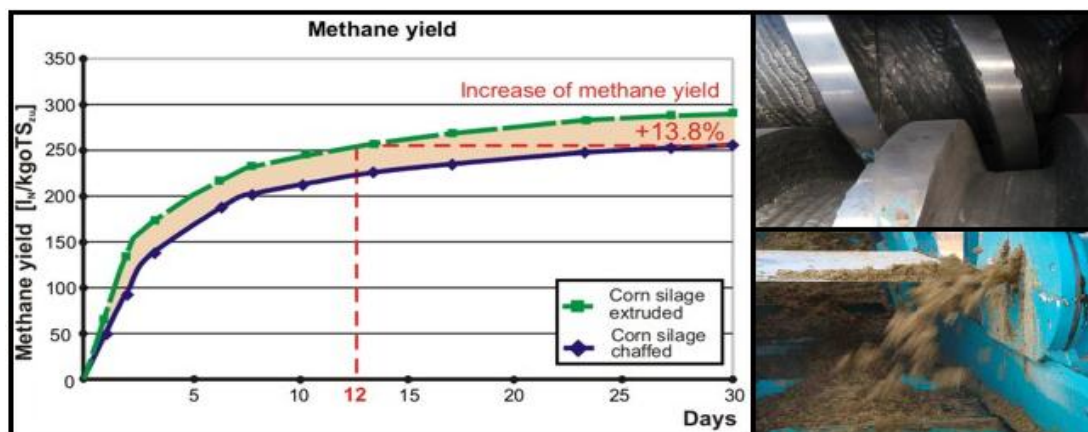
B) Extrudovaná kukuřičná siláž: obsah sušiny 38 %, 60 °C, pH 3,9

Zdroj: Borgström, 2011

Jako materiál byla použita sláma s obsahem sušiny 85 % o maximální teplotě 100 °C a kukuřičná siláž s obsahem sušiny 38 % při teplotě do 60 °C. Kukuřičná siláž byla extrudována při nižší teplotě než sláma. Vlastnosti upravené a neupravené siláže a slámy se značně lišily. Zatímco u kukuřičné siláže se obsah sušiny po extruzi zvýšil, u slámy došlo k mírnému poklesu. Již po třech dnech měla extrudovaná siláž při teplotě 60 °C vyšší výnos  $\text{CH}_4$  a to o 63 % oproti neupravené. Kdežto u siláže ošetřené teplotou 40 °C byl výnos metanu vyšší pouze o 12 %. Tento pokus opět utvrzuje v tom, že teplota během extruze hraje velice důležitou roli v produkci  $\text{CH}_4$ . Sluiter et al., (2008) provedl studii, kde využil kukuřičnou siláž o vlhkosti 21 %. Úprava byla provedena pomocí jednošroubového extrudéru (model PL 2000).

Extrudér byl opatřen motorem výkonem 55 kW, který měl upravené otáčky od 0-210 ot.min<sup>-1</sup>. Při samotné extruzi byla rychlost udržována na 25, 50, 75, 100 a 125 ot.min<sup>-1</sup>. Teplota byla udržována na 25, 50, 75, 100 a 125 °C pro různé rychlosti šneku. Test ukázal, že kombinace teploty a rychlosti šneku hraje důležitou roli v procesu extruze. Nejlepších parametrů (glukóza 75 %, xylóza 49 %) bylo dosaženo při rychlosti šneku 75 ot.min<sup>-1</sup> a teplotě 125 °C. Německá firma LEHMANN zabývající se konstruováním extruderů zkoumala efektivitu svých strojů pomocí kukuřičné siláže a došla k závěru, že použitím extruze lze zvýšit výnos CH<sub>4</sub> o 13,8%.

Grafika 19: Zvýšená produkce bioplynu pomocí extruze

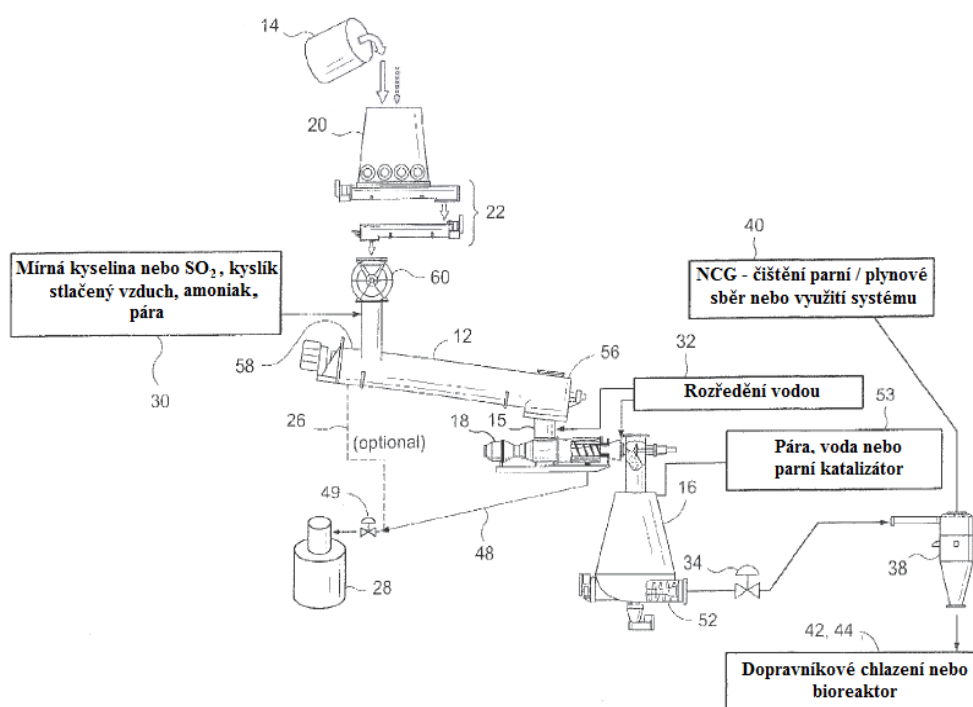


Zdroj: Biogas technology LEHMANN, 2011

Sabourin (2008) patentoval kombinující jednošroubový extrudér a kotoučový drtič. V zásadě platí, že biomasa je dávkována do šnekového extruderu a po průchodu šnekem vchází na drtící kotouč. Je dokázáno, že se míra fibrilace může zvýšit o 40-90 % v závislosti na druhu biomasy. Pokud jde o nastavení proměnných Sabourin doporučuje extrudér s kompresním poměrem 2:1 až 4:1, rychlost šneku 70-100 ot.min<sup>-1</sup>, rychlost kotouče 800-1800 ot.min<sup>-1</sup> a tlak nejméně 34,5 kPa. Energetické požadavky tohoto stroje jsou v rozmezí 100-200 kWh.t<sup>-1</sup>. V jiné formě může být vynález snadno použit v kombinaci s jinými metodami úpravy, zejména chemickými. Z následujících poznatků je zřejmé že zvolením správných parametrů desintegrace lze změnit vlastnosti materiálu takovým způsobem, aby vnitřní pevnost (krystalinita) rostlinných vláken byla co nejvíce narušena a navazující hydrolýza mohla probíhat co možná nejrychleji a nehlouběji, uvolňujíc při tom energeticky bohatou glukózu. Dle Hendrikse (2009) se dezintegrací biomasy zvýší účinnost hydrolýzy o 5 až 25 % a zároveň lze očekávat snížení doby zdržení ve fermentoru o 23 až 59 %.

Jakákoli metoda dezintegrace musí být z principu velmi efektivní, protože z podstaty věci představuje dodatečné náklady. Užitá metoda musí být však nejen investičně a provozně (zejména energeticky) nenáročná, ale nesmí způsobit degradaci či jiné znehodnocení materiálu, například tvorbou inhibitorů (Maroušek, 2011). Pschorn (2009) vyvinul systém pro úpravu lignocelulózové biomasy, složený ze dvou po sobě jdoucích tlakových reaktorů. První z reaktorů přijímá vstupní surovinu, kde podstupuje hydrolýzu. Mezi oběma rektory je uzávěr, kterým jsou vzájemně propojeny. Druhý tlakový reaktor přijímá materiál z uzávěru a vyvíjí na něj tlak podstatně vyšší, než v prvním reaktoru. Rychlým vypouštěním suroviny z reaktoru způsobí exploze, a dochází k rafinaci. Oba reaktory jsou vybaveny systémy pro regulaci ohřevu a dávkování suroviny.

Grafika 20: Technologický systém pro úpravu biomasy



Zdroj: Pschorn, 2009

První fáze reaktoru zajišťuje tepelnou energii a podporuje hydrolýzu. Pára do reaktoru musí být aplikována okamžitě při vstupu suroviny. Vstříkáváním páry proti proudu toku dosáhneme zlepšení míchacího efektu. Obecně používaná teplota se v prvním reaktoru pohybuje v rozmezí 110-175 °C při přetlaku 0,15-0,6 MPa po dobu 20-30 minut. Vstupující suroviny mohou být v mokřém či suchém stavu, avšak přidáním vody dochází k zvýšení množství cukrů.

Přes extrudér se dostává biomasa do druhého reaktoru, kde je vystavena teplotě 170-230 °C, tlaku 0,8-2,5 MPa po dobu 5-10 minut. Prostřednictvím výfukového ventilu dosáhneme snížení tlaku na hodnotu 0,1-0,2 MPa. Rychlý pokles tlaku je přeměněn na páru, při které dochází k masivní explozi. Narušením dojde tím, že pára má mnohem větší objem než obsažená voda v buňkách. Výsledkem tohoto procesu je úprava biomasy (Pschorn, 2009).

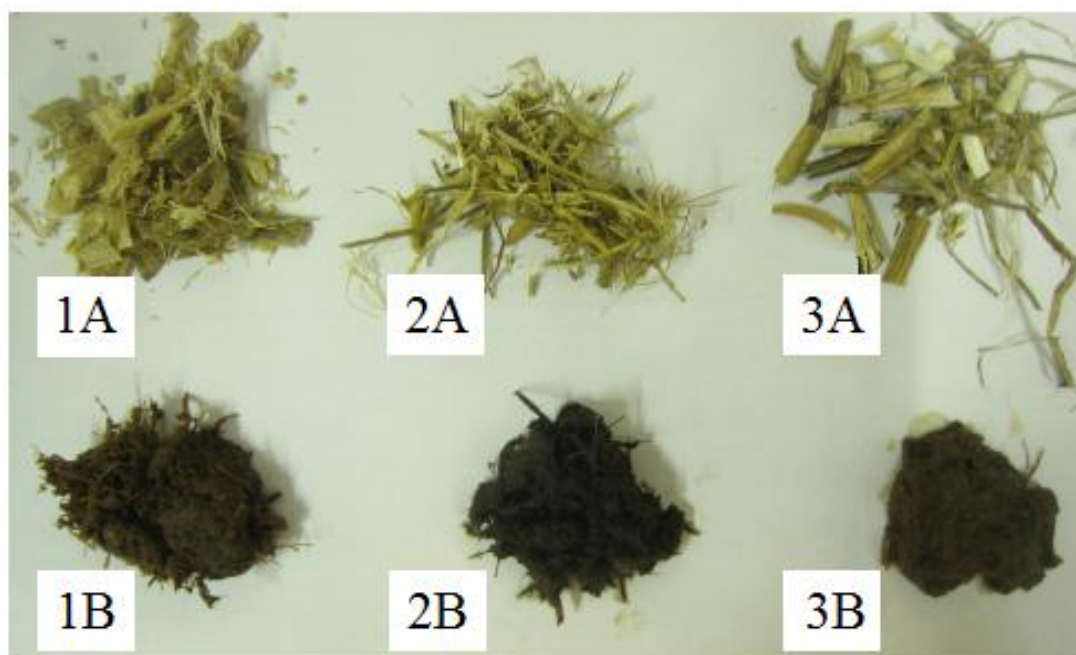
### **3.5.2 Steam explosion – exploze parou**

Mezi nejčastěji používané fyzikálně-chemické metody úprav lze zařadit úpravu vodní parou bez nebo s následnou expanzí. Exploze vodní parou je založena na principu využití vysokého tlaku (0,7-4,8 MPa) a vysoké teploty (160-260 °C) po dobu několika sekund až minut. Poté dochází k rychlému snížení tlaku a materiál projde explozivní dekompresí (Li a Antizar Ladislao, 2007). Steam explosion odstraňuje většinu hemicelulózy a tím výrazně zlepšuje dostupnost a účinnost enzymů. Efektivita rozkladu hemicelulózy závisí na velikosti částic, teplotě a na době zdržení v reaktoru, resp. na závislosti teploty páry na době zdržení. Metoda exploze vodní parou je relativně nenáročná na energii, avšak splňuje veškeré požadavky na proces úpravy. Steam explosion (SE) je široce využívána pro zlepšení produkce BP z různých materiálů, například lesních zbytků a odpadů (Hopper a Li, 1996). Ruiz et al., (2008) provedli studii na zbytkovou biomasu (slunečnice) pomocí parní exploze s cílem optimalizace teploty v rozmezí 180-230 °C. Volba teploty je založena na přístupnosti hydrolýzy. Po 96 hodinách enzymické činnosti byla největší výnosnost 72 % při teplotě 220 °C. I maximální hodnota glukózy byla zpozorována při 220 °C a to 16,7 g ze 100 g suroviny. Ballesteros et al., (2004) dosáhl podobných výsledku na pilinách topolu, kde výsledky ukazují výnos v rozmezí 50-72 %. Dle Masona (1928) je tlak 1,9 MPa hraniční hodnotou a podotýká, že tlak nižší než tato hodnota výrazně snižuje účinnost procesu úpravy.

Norská společnost CAMBI zabývající se dodáním a konstrukcí reaktorů na parní explozi udává nárůst výnosu CH<sub>4</sub> po úpravě až o 20-30 %. Karunanithy et al., (2011) provedl parní explozi na kukuřičné siláži, pšeničné siláži a pšeničné slámě, kde zkoumal vliv na produkci CH<sub>4</sub>. Parní exploze zvýšila homogenitu, snížila velikost částic a zvýšila hustotu. Veškerý zkoumaný materiál pocházel z oblasti Falkenberg ve Švédsku.

Prarmetry byly nastaveny dle doporučení společnosti CAMBI. Vzorky byly skladovány v chladících boxech o teplotě 4 °C, 26 hodin do začátku studie.

Grafika 21: Zkoumané vzorky



- 1A) Neupravená kukuřičná siláž, 1B) Upravená při 200 °C, 10 minut, 1,45 MPa  
2A) Neupravená pšeničná siláž, 2B) Upravená při 200 °C, 10 minut, 1,45 MPa  
3A) Neupravená pšeničná sláma, 3B) Upravená při 180 °C, 10 minut, 0,9 MPa

Zdroj: Karunanithy et al., 2011

Daná studie ukázala, že u kukuřičné siláže došlo ke zvýšení produkce CH<sub>4</sub> již po třech dnech a to o 14 %. Avšak na konci inkubace po 44 dnech vyhazuje produkce CH<sub>4</sub> vyšší výnos u neupravené kukuřičné siláže. Oproti tomu upravená pšeničná siláž měla po třech dnech vyšší výnos CH<sub>4</sub> o 20 % a po 44 dnech si udržela vyšší výnos CH<sub>4</sub> oproti neupravené siláži o 11 %. Bauer et al., (2009) zjistil optimální podmínky parní exploze u pšeničné slámy. Došel k závěru, že při teplotě 200 °C a době zdržení 10 minut dojde k nárůstu produkce CH<sub>4</sub> až o 20 %. Oproti tomu Luo a Liu (2005) poukazují na to, že nejvyšší nárůst produkce CH<sub>4</sub> je při teplotě 210°C a době zdržení 8 minut. Parní exploze je proces, který nabízí několik atraktivních funkcí ve srovnání s jinými technologiemi pro úpravu biomasy. Mezi ně patří možnost výrazně snížit dopady na životní prostředí, nižší kapitálové investice, větší potenciál pro energetickou účinnost, méně nebezpečných chemických látek (Avellar a Glasser, 1998).



### 3.5.3 Vodní macerace

Všechny postupy úprav LCM, o kterých bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jsou náročné z hlediska investičních nákladů, jako je používání vysokotlakých aparátů, korozivzdorných materiálů, nutnost instalace technologií pro odstranění vedlejších produktů atd. Metoda LHW (liquid hot water pretreatment) je jedna z možností jak snížit finanční nároky, protože při ní nevznikají žádné vedlejší produkty, které by musely být před vlastní fermentací odstraněny a zároveň se snižují požadavky na korozivzdornost používaných materiálů (Alvira et al., 2010). Úprava materiálu v horké vodě je jedna z hydrotermálních metod, které se používají pro přípravu lignocelulózového materiálu. Díky vysokému tlaku a teplotě kolem 160 až 190 °C proniká H<sub>2</sub>O do biomasy, kde rozpouští hemicelulózu a odstraňuje část ligninu (Hendriks a Zeeman, 2009). Při vyšších teplotách, např. 220 °C, může rozpustit LHW hemicelulózu a odstranit lignin částečně během 2 minut bez používaných chemických látek (Sreenath, 1999). Jako hlavní výhodu této metody bereme to, že snižuje požadavky na korozní odolnost (Taherzadeh a Karimi, 2008). Laser et al., (2002) studovali působení LHW na cukrové třtině. Ukázalo se, že při reakčních teplotách v rozmezí 170-230 °C a době mezi 15 až 46 minut, došlo k přeměně současného zcukření více než z 80 %. Taherzadeh a Karimi (2008) zjistily nejlepší podmínky pro LHW při předčištění obilí při teplotě 190 °C po dobu 15 minut. Výnos celulózy dosahoval až k 90 %.

U LHW bylo prokázáno, že odstraní až 80 % hemicelulózy a zvýší enzymatickou stravitelnost u materiálů, jako je kukuřice. Efektivita metody LHW závisí na pH substrátu, pracovní teplotě a době zádrže v aparátu. K zamezení tvorby inhibitorů je nutné udržovat pH substrátu mezi pH 4 a pH 7. Při dodržení tohoto intervalu dochází k minimální tvorbě monosacharidů a degradaci suroviny (Hendriks, 2009). Například při rozkladu kukuřičné siláže je doporučeno vystavit ji účinku horké tlakové vody o teplotě 190 °C po dobu 15 minut. Během této doby dochází k rozkladu přibližně 90 % obsahu celulózy. Naopak při zpracování kukuřičné siláže s pH 4 při teplotě 160 °C po dobu 20 minut dochází jen 50 % rozkladu obsahu celulóзовých vláken (Alvira, 2010). Rozdíl mezi LHW a parní explozí je v množství a koncentraci hydrolyzátu. Při použití LHW je množství rozpuštěných složek rostlinného svazku vyšší, zatímco jejich koncentrace je nižší.

To znamená, že při použití LHW je potřeba větší množství vody než je tomu u parní exploze. Díky tomu je koncentrace inhibitorů a toxických látek, což se příznivě podílí na zlepšení účinnosti hydrolýzy (Hendriks a Zeeman, 2009).

### 3.6 Ekonomika bioplynových stanic

Schulz (2004) uvádí, že investiční náklady na vybudování BPS jsou závislé na celé řadě faktorů. Odvíjí se nejen od velikosti zařízení a instalované technologie, ale také podle toho zda, je stavba realizována svépomocí nebo dodavatelským systémem. Co se týče ročních nákladů, ty se vypočítají z ročních odpisů investičních nákladů při zohlednění zúročení, z nákladů na opravy a údržbu, z běžných provozních nákladů a osobních nákladů. Výsledky z praxe ukazují, že roční náklady bioplynové stanice se pohybují někde mezi 12-20 % celkových investic (Máče, 2006).

Výnosy z výroby bioplynu jsou tvořeny zejména příjmy z prodeje elektrické energie. Garantovaná cena elektrické energie z bioplynu dodávané do sítě je podle cenového rozhodnutí ERÚ č. 10/2005. Výkupní ceny a zelené bonusy jsou podle vyhlášky č. 140/2009 Sb. uplatňovány po dobu životnosti BPS. Výkupní ceny se meziročně zvyšují s ohledem na index cen průmyslových výrobců minimálně o 2 % a maximálně o 4 %. V případě BPS a provozoven spalující biomasu nehrají významnou roli investiční, ale provozní náklady. Garance zelených bonusů je jeden rok, a to z toho důvodu, že jejich výše je závislá na ceně silové elektřiny a obecně klesá právě z důvodu růstu ceny silové elektřiny. Pro výpočet zelených bonusů je však použit vyšší diskont proti výpočtu výkupních cen, a to zejména z důvodu vyšší míry rizika uplatnění se na trhu.

Výkupní ceny elektřiny mohou pro nové zdroje meziročně poklesnout podle § 6 odst. 4 zákona č. 180/2005 Sb. maximálně o 5 % ročně. Mezi tyto kategorie patří především výroba elektřiny z biomasy, jejíž cena může v průběhu životnosti zařízení významně ovlivnit garantovanou výši výnosů.

Tab. 4: Výkupní ceny a zelené bonusy pro výrobu elektřiny (kWh)

Kategorie	Podpora [Kč]	2009	2010	2011
AF1	Výkupní cena	4,12	4,12	4,12
	Zelený bonus	2,58	3,15	3,15
AF2	Výkupní cena	3,55	3,55	3,55
	Zelený bonus	2,10	2,38	2,58

Zdroj: Vyhláška č. 140/2009 Sb.

Hlavní výhodou systému zelených bonusů je možnost výrobce přímo ovlivnit výši výnosů za vyrobenou elektřinu a dosáhnout tak vyššího výnosu než v případě režimu výkupních cen. Dalším zdrojem příjmů může být využití odpadního tepla. Pro hodnocení ekonomické efektivity investice do BPS můžeme využít výpočet doby návratnosti vložené investice. Doba návratnosti je počet let, za kterých se tok příjmů z projektu vyrovná výdaji na investici. Platí, že čím dříve dojde ke splacení, tím vyšší má investice likviditu. Uvažujeme, že cash-flow (CF) je v každém roce stejný (průměr CF). V případě, že by příjmy CF byly v každém roce rozdílné, se doba splacení určí postupným kumulováním těchto příjmů až do doby, kdy se jejich součet vyrovná investičním nákladům. V praxi se nedostatek tohoto ukazatele spočívající v nerespektování hlediska času řeší dosazením diskontovaných CF do výpočetního vzorce (pak hovoříme o diskontované době návratnosti). Doba návratnosti investice (DN) se vypočítá podle vzorce (1).

Vzorec:

$$DN = \frac{IN}{CF} \quad (1)$$

Kde:

*DN* – doba návratnosti .....(roky)

*IN* – náklady na pořízení investice .....(Kč)

*CF* – cash-flow .....(Kč)

Prostá návratnost nezohledňuje skutečnou časovou hodnotu peněz (ocenění toků hotovosti prostřednictvím diskontní míry), proto je její vypovídací schopnost omezená a slouží jen jako orientační kritérium (Valach, 2001). Ve vazbě na stanovení výnosové hodnoty se diskontní míra stává stěžejním problémem. Hlavním úskalím je stanovení diskontní míry tak, aby dostatečně popisovala faktory ovlivňující budoucí výnosovost ohodnocované nemovitosti. Prakticky to znamená vyhodnotit zejména tyto faktory (struktura kapitálu, tržní riziko, druh nemovitosti, životnost). Kritérium určuje, za jak dlouho pokryjí příjmy z projektu jeho investiční náklady (Maříková a Mařík, 2000). Obecně pro BPS platí, že doba návratnosti investice do 5 let je velmi dobrá a do 10 let přijatelná. Maroušek (2012) dodává, že ekonomie v daném segmentu je pokroucena dotačními tituly s tím, že dobu návratnosti do 6 let je možno považovat za excelentní.



Po 15 letech provozu dosáhne většina hlavních prvků (míchadla, kogenerační jednotky atd.) BPS své životnosti a je potřeba počítat s vyššími náklady na opravy a údržbu.

Vzorec:

$$\check{C}SH = SH - IN = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - IN \quad (2)$$

Kde:

$\check{C}SH$  – čistá současná hodnota .....(Kč)

$SH$  – současná hodnota CF .....(Kč)

$IN$  – celkové investiční náklady .....(Kč)

$n$  – doba životnosti zařízení .....(roky)

CF – očekávaná (odhadnutá) hodnota cash-flow projektu .....(Kč)

$t$  – počet období od 1 až do  $n$

$(1 + i)^t$  – odúročitel

Jádrem této metody je výpočet rozdílu mezi současnou hodnotou všech očekávaných příjmů (CF) a současnou hodnotou všech investičních výdajů projektu, které jsou generovány během jeho životnost (obvykle jsou to výdaje na investici a provozní výdaje). Před samotným výpočtem čisté současné hodnoty je však nutné přepočítat všechny budoucí CF (a pokud jsou vynakládány déle jak rok také investiční výdaje) k jednomu (stejnému) okamžiku, jímž obvykle bývá moment zahájení projektu.

Takové přepočtené (diskontované) hodnoty budoucích CF označujeme jako současné hodnoty CF. Všechny varianty projektu s kladnou hodnotou  $\check{C}SH$  jsou přijatelné (mají vyšší než požadovanou výnosnost), ale za nejvýhodnější je pochopitelně považována varianta s nejvyšší hodnotou  $\check{C}SH$  (představuje nejvyšší přírůstek zdrojů podniku). Předpokladem pro hodnocení na základě  $\check{C}SH$  je stejná doba životnosti jednotlivých variant projektu (Synek, 2002).

## **4. Metodika**

### **4.1 Materiál**

#### **Kukuřičná siláž**

Substrátem byla kukuřičná siláž (30 % sušiny (TS), 0,2 % těkavých látek, 44,05 % vlákniny (TS), 23,92 % ligninu (TS) získána ze zemědělského podniku VOŠ a SzeŠ Tábor v Měšicích (+49° 24' 37.44", +14° 42' 32.24"). Klimatické podmínky jsou obvyklé pro jihočeskou oblast. Průměrná roční teplota se pohybuje kolem 6,8 °C, roční srážky dosahují 580 mm, půdní typ je zde písčito-hlinitý s pH 5,6. Sklizeň kukuřice probíhala při běžných podmínkách, předchozí plodinou byl jetel plazivý (*Trifolium repens*). Na jaře proběhlo hnojení 120 kg močoviny (46 % N.ha<sup>-1</sup>), což představuje 20+55 kg.N.h<sup>-1</sup>, 125kg superfosfátu (20 %), což představuje 25 kg.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.ha<sup>-1</sup>, 150 kg draselné soli (60 %), což představuje 90 kg.K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>.

#### **Inokulát**

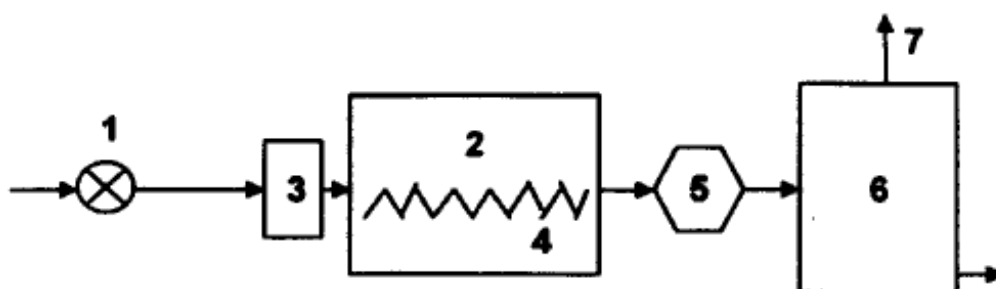
Inokulát (sušina= 1,2 %,  $\rho = 1157 \text{ kg.m}^{-3}$ , pH při 38 °C = 6,7) pochází z BPS Nedvědice (Česká republika). Fermentační dávka zahrnuje kukuřičnou siláž, čerstvý hnůj, suchý hnůj, který byl uložen po dobu 6 měsíců a zbytky z předchozí dávky v poměru 12:1:1:6. Inokulát byl skladován v plastových nádobách při 4 °C a po samovolném roztání při pokojové teplotě aplikován okamžiku potřeby. Potřebná voda byla využita z místního vodovodního řádu (pitná voda).

### **4.2 Použité zařízení**

#### **Vysokotlaký extrudér**

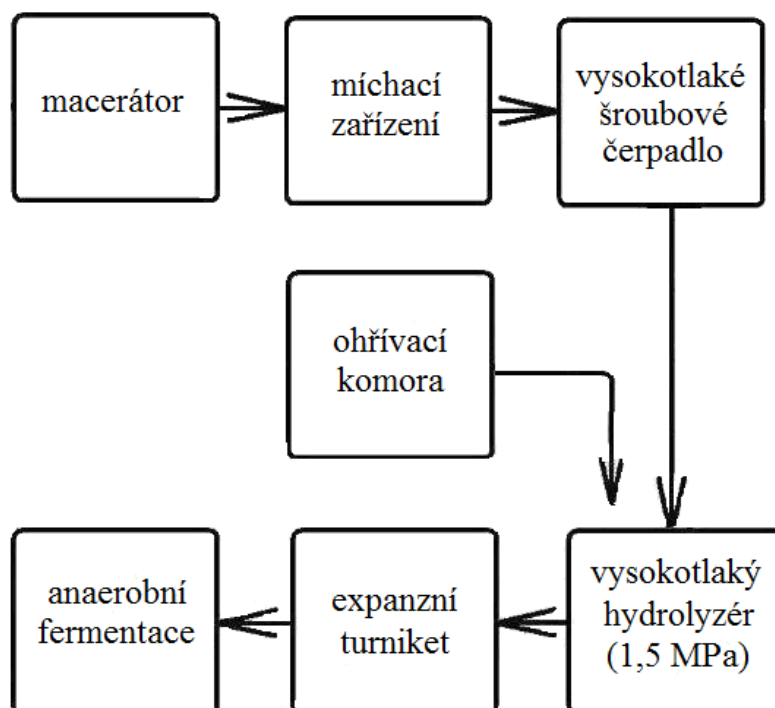
Zařízení podle (grafiky 22) ke kontinuálnímu zpracování materiálu obsahujícího významný podíl fytohmoty (UV CZ 21314) je tvořeno vysokotlakým šroubovým čerpadlem (1) dezintegrováním materiálu ústícím do vysokotlakého hydrolyzér (2) dimenzovaného na tlak maximálně 3,5 MPa, který má na vstupu ohřívač (3) materiálu a je opatřen vnitřním šnekem (4) pro řízenou dopravu materiálu. Přitom na hydrolyzér (2) navazuje expanzní turniket (5) ústící do expanzní nádoby (6) s odvodem brýdových par. Možné provedení je odvod (7) brýdových par napojením přímo na vstupní ohřívač (3).

Grafika 22 – Modifikovatelná extruzní-hydrolyzační jednotka



Zdroj: BiomassTechnology, 2010

Grafika 23 – Schéma komutativní parní exploze



Zdroj: Maroušek, 2012 (Elektronická komunikace)

Substrát se vkládá do míchacího zařízení, kde se smíchá s  $H_2O$  z důvodů dosažení optimálního hydromodulu. Takto upravený substrát je vysokotlakým šroubovým čerpadlem tlačěn do vysokotlakého reaktoru při daných podmínkách. Tlaku je dosahováno zvýšenou teplotou páry. Parní exploze nastává v důsledku poklesu na atmosférický tlak, k čemuž dochází v expanzním turniket. Získaný extrudát je podroben anaerobní fermentaci.

## **pH metr**

Dynamika pH v závislosti na teplotě byla měřena pomocí pH metru CyberScan 600 (Chromservis Ltd., Praha, Česká republika). Přístroj pH slouží ke stanovení aktivity oxoniových kationtů v roztoku na základě potenciometrického měření. Zařízení pracuje s přesností až  $\pm 0,01$  s rozsahem měření 0 až 14 pH. Zařízení obsahuje automatické rozpoznání 20-ti pufrů a bezdrátový přenos dat (IrDA).

Grafika 24 – pH metr CyberScan 600



Zdroj: Chromservis, 2012

## **Muflové pece**

Sušina byla stanovena pomocí muflových pecí LH 06/13 (Fisher Scientific Ltd., Pardubice, Česká republika) v souladu s metodou USEPA (2001). Zaručují rovnoměrně rozložení teploty (1200°C) v peci dle normy DIN 17052-1.

Grafika 25 – Muflová pec LH 06/13



Zdroj: Fisher Scientific Ltd, 2012

Elementární analýza inokula (N, P, K, Ca a C) byla provedena externě (ÚKZUZ, S.p.A., Brno, Česká republika), stejně jako měření vlákniny a ligninu (AGRO-LA, spol. s.r.o., Jindřichův Hradec, Česká republika).

## Anaerobní fermentor

Anaerobní monitorovací fermentor Stix 30L vyvinul Maroušek pro firmu Biomass Technology a.s., Tábor (Česká republika). Fermentor je složen z horní nádoby, která plní funkci hlavního reaktoru, který je temperován na danou teplotu. Teplota, pH, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>S jsou průběžně monitorovány systémem čidel a posílány přes Wi-Fi (802.11b/g) do laboratorního serveru. Potrubí, které je vedeno na levé straně spojuje horní a spodní fermentor, slouží k průchodu digestátu. Ve spodním fermentoru je sledována zbývající produkce CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub>. Teplota byla udržována pomocí čtyř termostatových snímačů. První byl umístěn v dolní části reaktoru, druhý v krytu reaktoru a třetí a čtvrtý snímač byl umístěn uvnitř reaktoru ve výšce 5 a 20 cm. Hodnota pH byla sledována čidly umístěné vedle vnitřních snímačů. Plynný CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, a H<sub>2</sub>S byly snímány analyzátozem GA 3000, který je vybaven osvědčenou technologií pracující s infračerveným detektorem a elektrochemickými senzory (Chromservis Ltd., Praha, Česká republika). Systém obsahuje integrovanou vzorkovací pumpu a výstup 4–20 mA pro každý plyn.

Grafika 26 – Automatický monitorovaný anaerobní fermentor Stix



Zdroj: Pharmix s.r.o., 2010

### **4.3 Použitý software**

#### **ZunZun.com**

Webová aplikace pracuje na operačním serveru, Linode Platform Manager (LPM), který pro dané účely využívá databázi Sequel Pro. Výstupní kód je na několika programovacích jazycích verze Python 3.3.0. Porovnání dat v databázi zajišťuje funkce SHA-1 (Secure Hash Algorithm), která je rozšířenou hašovací funkcí. SHA-1 vytváří 160 bitový obraz zprávy s maximální délkou  $2^{64} - 1$  bitů. Aplikace umožňuje generaci online grafů, buď ve 2D nebo 3D rozhraní.

#### **Matlab R2011b**

Matlab (MATrix LABoratory) je matematický program pracující v interaktivním programovém prostředí vyvíjen společností MathWorks. Matlab obsahuje grafický systém, Handle Graphics a programovací jazyk 4. generace vycházející z jazyka Fortrain. Považuje se za multiplatformní operační software, který je spustitelný pod více jak jednou platformou. Matlab umožňuje počítání s maticemi, vykreslování 2D i 3D grafů funkcí, implementaci algoritmů, počítačovou simulaci, analýzu a prezentaci dat i vytváření aplikací včetně uživatelského rozhraní.

### **4.4 Vlastní postup**

1) Kukuřičná siláž je pomocí pásového dopravníku automaticky vkládána do macerátoru, kde dojde k rozmělnění materiálu.

2) Materiál dále postupuje do míchacího zařízení, kde dojde ke smíchání s vodou kvůli dosažení optimálního hydromodulu 1:7 (kukuřičná siláž : voda).

3) Upravený řídký substrát je pod tlakem vháněn z míchacího zařízení do vysokotlakého šroubového čerpadla.

4) Z vysokotlakého šroubového čerpadla směřuje upravený substrát do vysokotlakého reaktoru.

5) Extruze kukuřičné siláže je provedena při zvolených parametrech (sušina: 5%, 11%, 19%; reakční čas 300s, 600s, 900s; tlak 0,553MPa, 1,372MPa, 2,421MPa).

6) Získaný extrudát po uvolnění z vysokotlakého reaktoru vylétá do expanzního turniketu.

7) Extrudát (vzorek 100 g) nasycený na maximální vodní retenční kapacitu (1) je umístěn do malé skleněné nádoby s rovným dnem o průměru 18 cm (2) (grafika 27).

8) Skleněná nádoba s rovným dnem (2) je vložena na větší nádobu (3), která je překlopena a umístěna do testovací nádoby (5).

9) Prostor kolem překlopené nádoby je (3) je vyplněn 1M NaOH (4)

10) Přidání roztoku BaCl<sub>2</sub> (z důvodu měření produkce CO<sub>2</sub>)

11) Pomocí titrační metody byla zjištěna spotřeba HCl (vyšší produkce CO<sub>2</sub> se při titraci projeví vyšší spotřebou HCl)

12) Doba měření produkce CO<sub>2</sub> trvala 7dní při pokojové teplotě.

13) Získané hodnoty byly zadány do operačního serveru, Linode Platform Manager (LPM), který pro dané účely využívá databázi Sequel Pro.

14) Po vygenerování dat v operačním serveru (LPM) byl získán seznam funkcí, které se pro danou oblast podařilo s nejmenší chybou vhodně aproximovat.

15) Pro nejvhodnější výběr byla zvolena metoda pro určení přesnosti virtuálního modelu Root Mean Square Error – RMSE (SSQABS), která měří rozptyl rozdělení četnosti odchylek mezi původními výškovými daty.

16) Nejlepší kritéria vykazovala polynomiální kvadratická funkce, do které byly vloženy aproximované data.

17) Do výsledného polynomu byly vloženy získané data a v matematickém programu Matlab (MATrix LABoratory) verze R2011b vypočítány ohniska lokálních extrémů.

18) V ohniscích lokálních extrémů byly provedeny extruze ve vytipovaných parametrech (viz. Tab. 8,10,12) pro ověřování na produkci CH<sub>4</sub>,

19) Získané extrudáty byly podrobeny anaerobní fermentaci v automatických anaerobních fermentorech Stix.

20) Bilance substrátu a inokulátu byla vybalancována v poměru sušiny 20:1 (substrát: inokulát), z důvodů snížení sušiny na 10 % došlo k zředění s vodou.

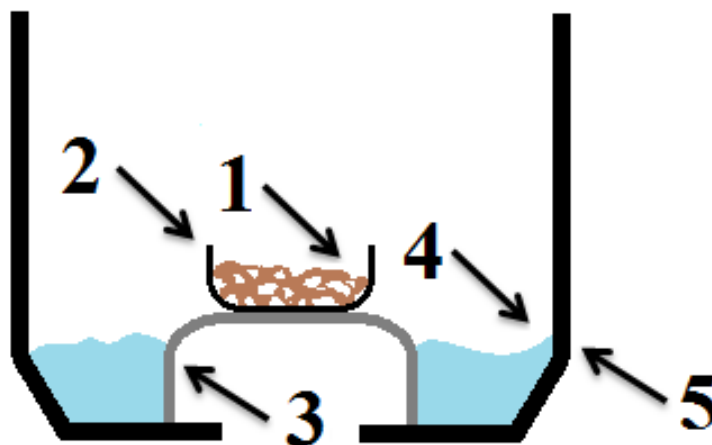
21) Simulace byla prováděna při parametrech (teplota 38°C, rychlost 2 ot.min<sup>-1</sup>).

22) Monitorování procesu probíhalo po dobu 35 dnů.

23) Kumulativní produkce  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$  je automaticky přepočítána na teplotu  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a tlak  $101\,325\text{ Pa}$ .

24) Výsledky zpracovány stejně jako v předchozím mapování produkce  $\text{CO}_2$  (viz body 13-17).

Grafika 27 – Schéma aparátu na produkci  $\text{CO}_2$



1 – extrudát nasycený na maximální vodní retenční kapacitu, 2 – skleněná nádoba s rovným dnem, 3 – velká nádoba, 4 – dno nádoby vyplněno 1M NaOH, 5 – nádoba



## 5. Výsledky

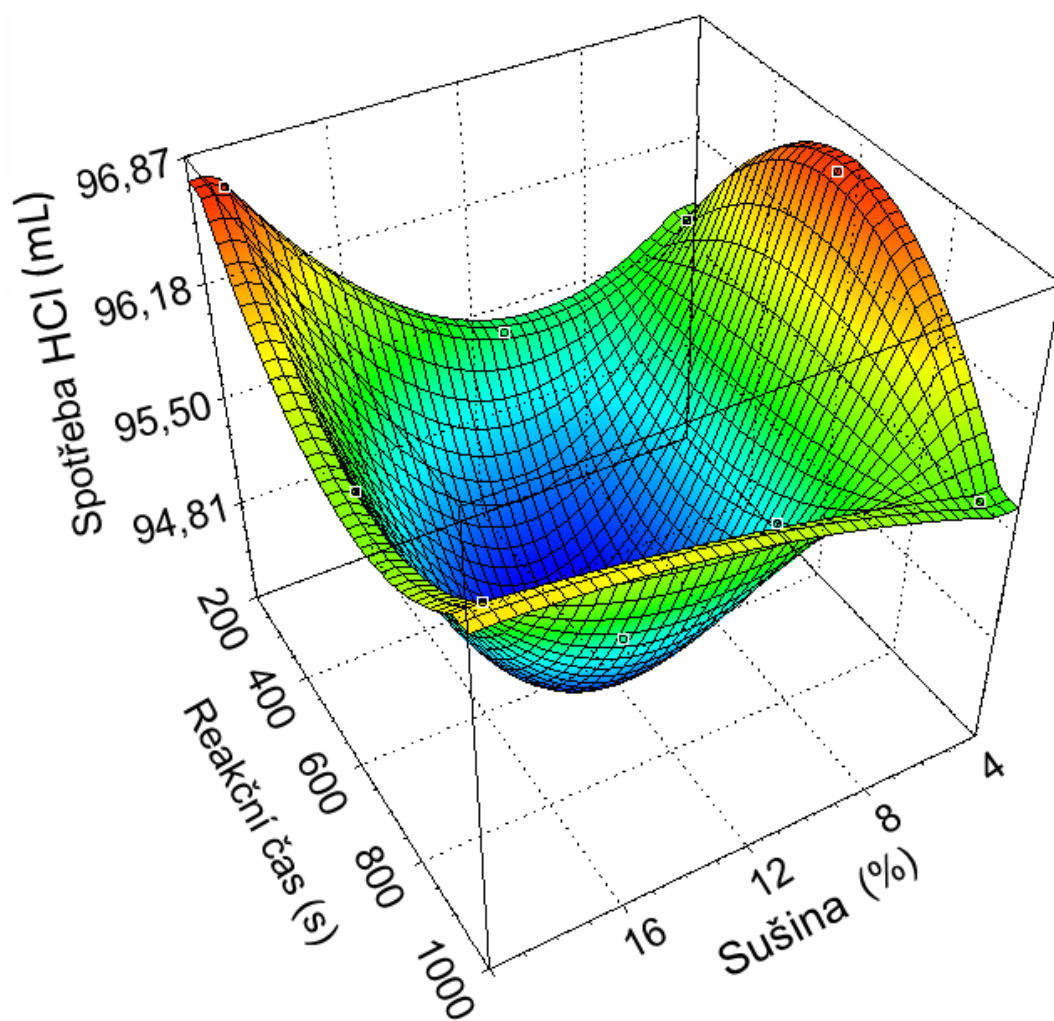
### 5.1 Mapování produkce CO<sub>2</sub>

Tlak **0,553 MPa**

Tab. 5: Hodnoty získané při mapování produkce CO<sub>2</sub>

Osa X	Osa Y	Osa Z
Sušina [%]	Reakční čas [s]	Spotřeba HCl [mL]
5,306	300	95,764
5,306	600	96,721
5,306	900	95,653
11,577	300	95,436
11,577	600	94,251
11,577	900	96,023
19,219	300	96,742
19,219	600	95,854
19,219	900	96,231

Graf č. 1 – Vygenerovaný 3D graf



**Použitý polynom:**

$$z = a + bx^0y^1 + cx^0y^2 + dx^1y^0 + fx^1y^1 + gx^1y^2 + hx^2y^0 + ix^2y^1 + jx^2y^2$$

Kde:

a = 8.1852441454924247e+01

b = 6.8457648659950091e-02

c = -5.9586071125367838e-05

d = 2.5072314440198213e+00

f = -1.2813221478260936e-02

g = 1.1262022527264506e-05

h = -8.4316338262367660e-02

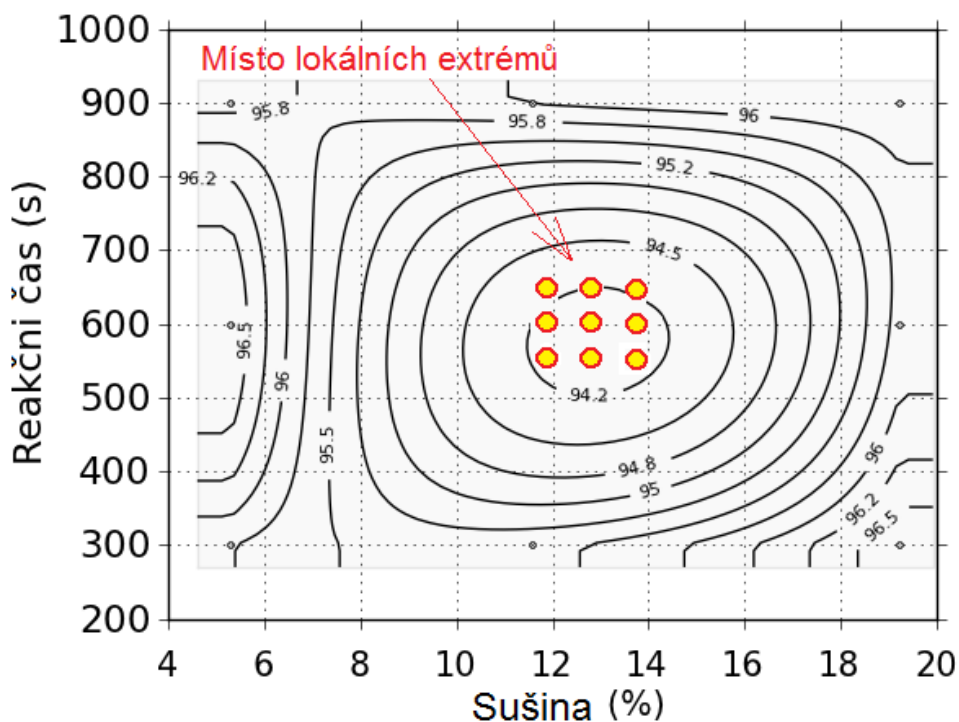
i = 4.5622187163714715e-04

j = -4.0563927193593141e-07

**SSQABS:** 2.26991934468e-17

**RMSE:** 1.58812235209e-09

Graf č. 2 – Vyznačení lokálních extrémů aproximací ve vrstevnicovém grafu



Tab. 6: Body lokálních extrémů

Bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Reakční čas [s]	550	550	550	600	600	600	650	650	650
Sušina [%]	11,5	12,6	13,7	11,5	12,6	13,7	11,5	12,6	13,7

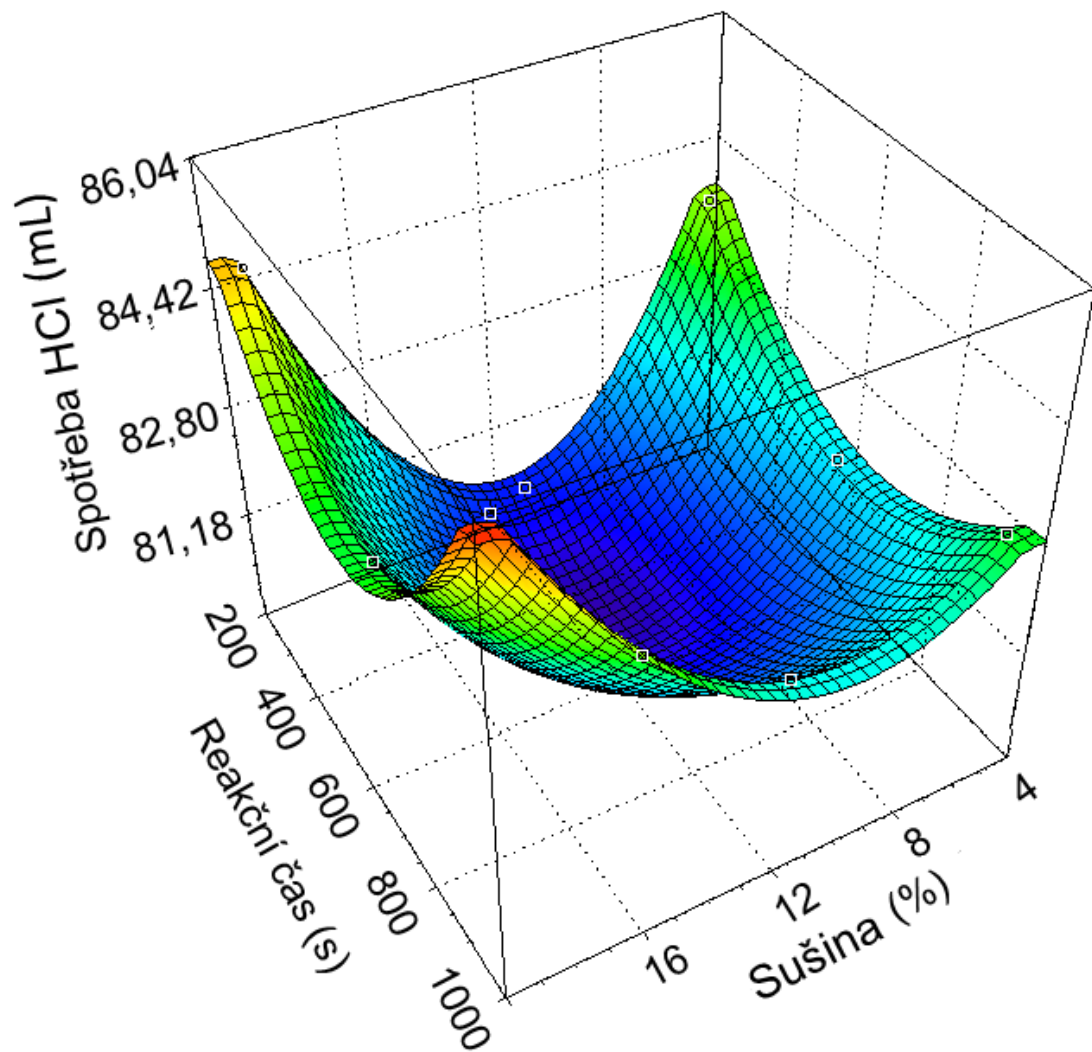
Lokální extrémů jsou vypisovány z grafu č. 2 zleva doprava, zhora dolů

Tlak 1,372 MPa

Tab. 7: Hodnoty získané při mapování produkce CO<sub>2</sub>

Osa X	Osa Y	Osa Z
Sušina [%]	Reakční čas [s]	Spotřeba HCl [mL]
5,306	300	83,752
5,306	600	81,784
5,306	900	82,872
11,577	300	80,298
11,577	600	79,852
11,577	900	82,082
19,219	300	84,761
19,219	600	82,852
19,219	900	85,742

Graf č. 3 – Vygenerovaný 3D graf



### Použitý polynom:

$$z = a + bx^0y^1 + cx^0y^2 + dx^1y^0 + fx^1y^1 + gx^1y^2 + hx^2y^0 + ix^2y^1 + jx^2y^2$$

Kde:

$$a = 1.0172897535133529e+02$$

$$b = -4.1600074110273035e-02$$

$$c = 2.7064529925256898e-05$$

$$d = -3.1685994092649077e+00$$

$$f = 4.9212855252382401e-03$$

$$g = -2.6179910794805333e-06$$

$$h = 1.3709110658878523e-01$$

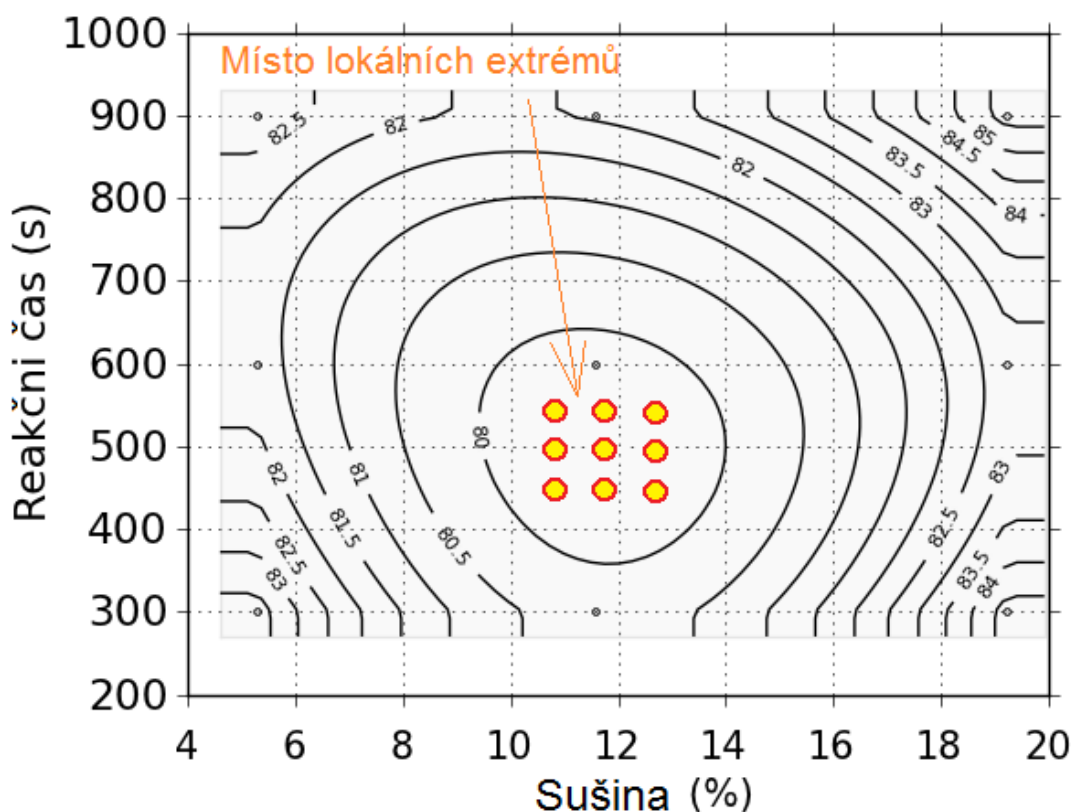
$$i = -2.2562865022574224e-04$$

$$j = 1.3512672121518410e-07$$

$$\text{SSQABS: } 1.02025709454e-17$$

$$\text{RMSE: } 1.0647154521e-09$$

Graf č. 4 – Vyznačení lokálních extrémů aproximací ve vrstevnicovém grafu



Tab. 8: Body lokálních extrémů

Bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Reakční čas [s]	450	450	450	500	500	500	550	550	550
Sušina [%]	10,8	11,6	12,4	10,8	11,6	12,4	10,8	11,6	12,4

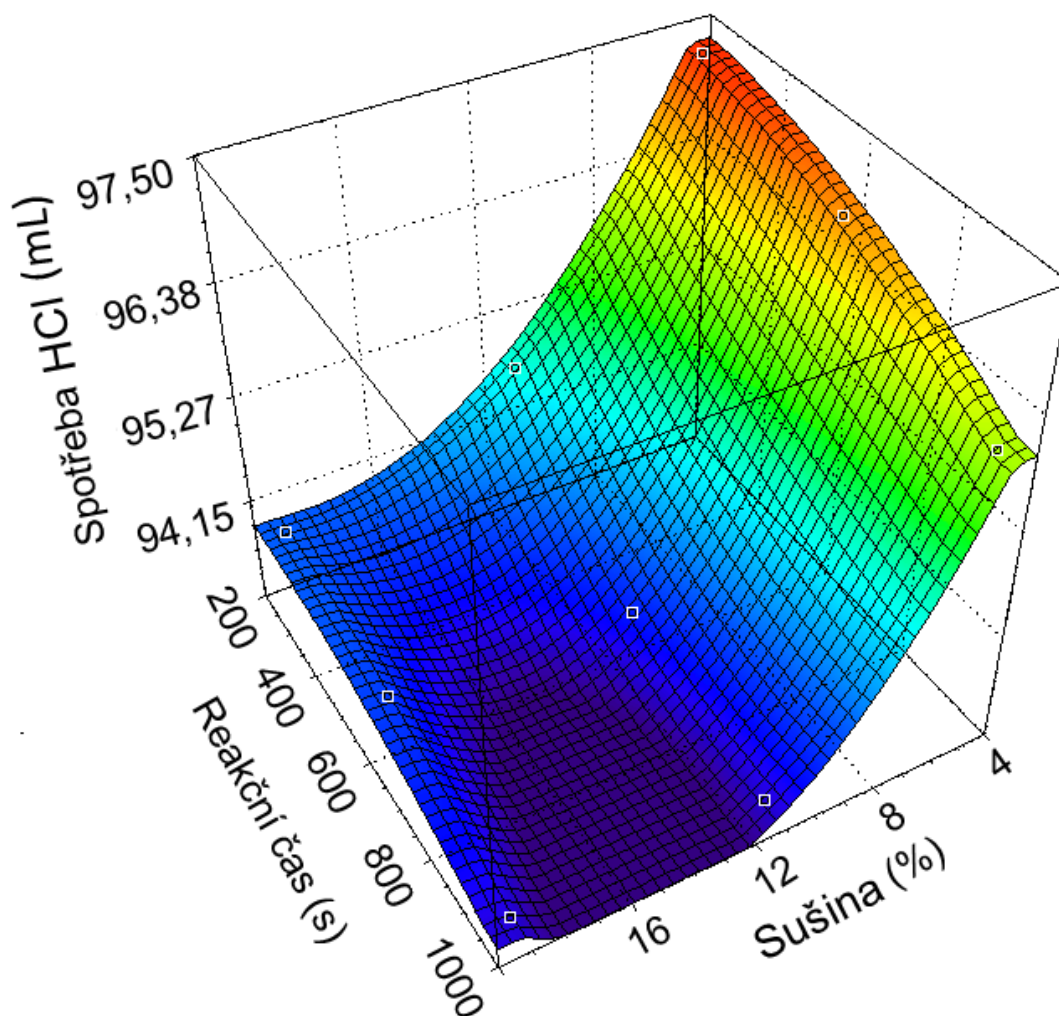
Lokální extrémů jsou vypisovány z grafu č. 4 zleva doprava, zhora dolů

Tlak 2,421MPa

Tab. 9: Hodnoty získané při mapování produkce CO<sub>2</sub>

Osa X	Osa Y	Osa Z
Sušina [%]	Reakční čas [s]	Spotřeba HCl [mL]
5,306	300	97,298
5,306	600	96,865
5,306	900	96,004
11,577	300	94,763
11,577	600	93,528
11,577	900	93,235
19,219	300	93,862
19,219	600	93,721
19,219	900	93,253

Graf č. 5 – Vygenerovaný 3D graf



**Použitý polynom:**

$$z = a + bx^0y^1 + cx^0y^2 + dx^1y^0 + fx^1y^1 + gx^1y^2 + hx^2y^0 + ix^2y^1 + jx^2y^2$$

Kde:

$$a = 9.5979955436177846e+01$$

$$b = 2.1232083685039441e-02$$

$$c = -1.8249393797546039e-05$$

$$d = 3.9016115903159776e-01$$

$$f = -4.9480145176365072e-03$$

$$g = 3.8059533005712493e-06$$

$$h = -2.6538332259058762e-02$$

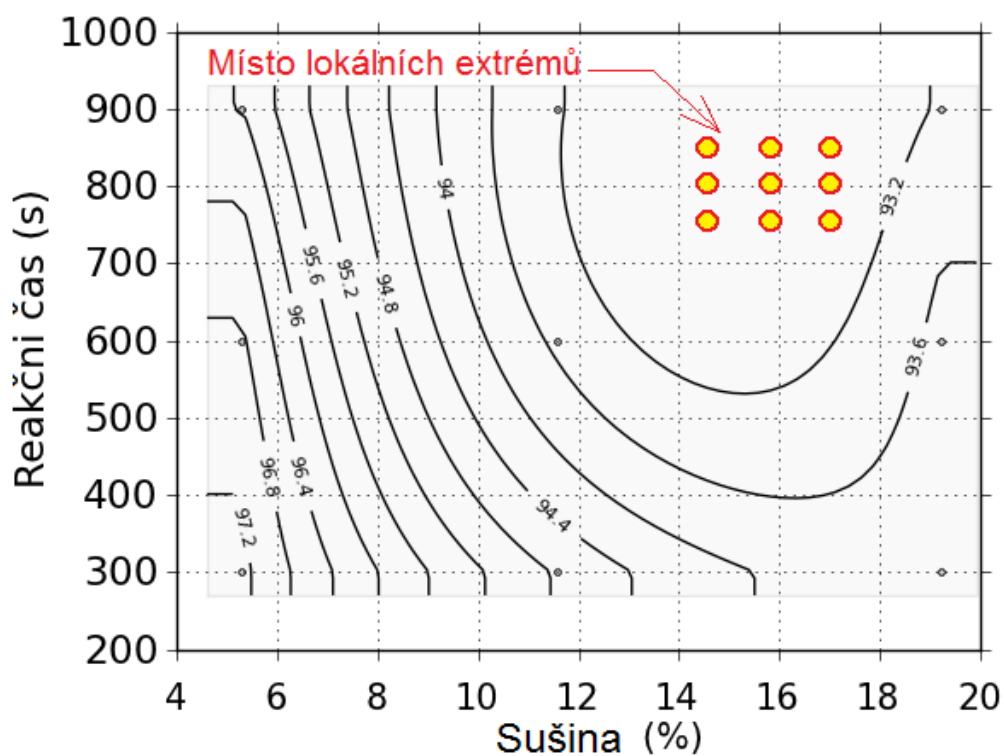
$$i = 2.0312644570835556e-04$$

$$j = -1.5354223499922104e-07$$

$$\text{SSQABS: } 5.53367150476e-19$$

$$\text{RMSE: } 2.47962172401e-10$$

Graf č. 6 – Vyznačení lokálních extrémů aproximací ve vrstevnicovém grafu



Tab. 10: Body lokálních extrémů

Bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Reakční čas [s]	750	750	750	800	800	800	850	850	850
Sušina [%]	14,5	15,8	17,1	14,5	15,8	17,1	14,5	15,8	17,1

Lokální extrémů jsou vypisovány z grafu č. 6 zleva doprava, zhora dolů



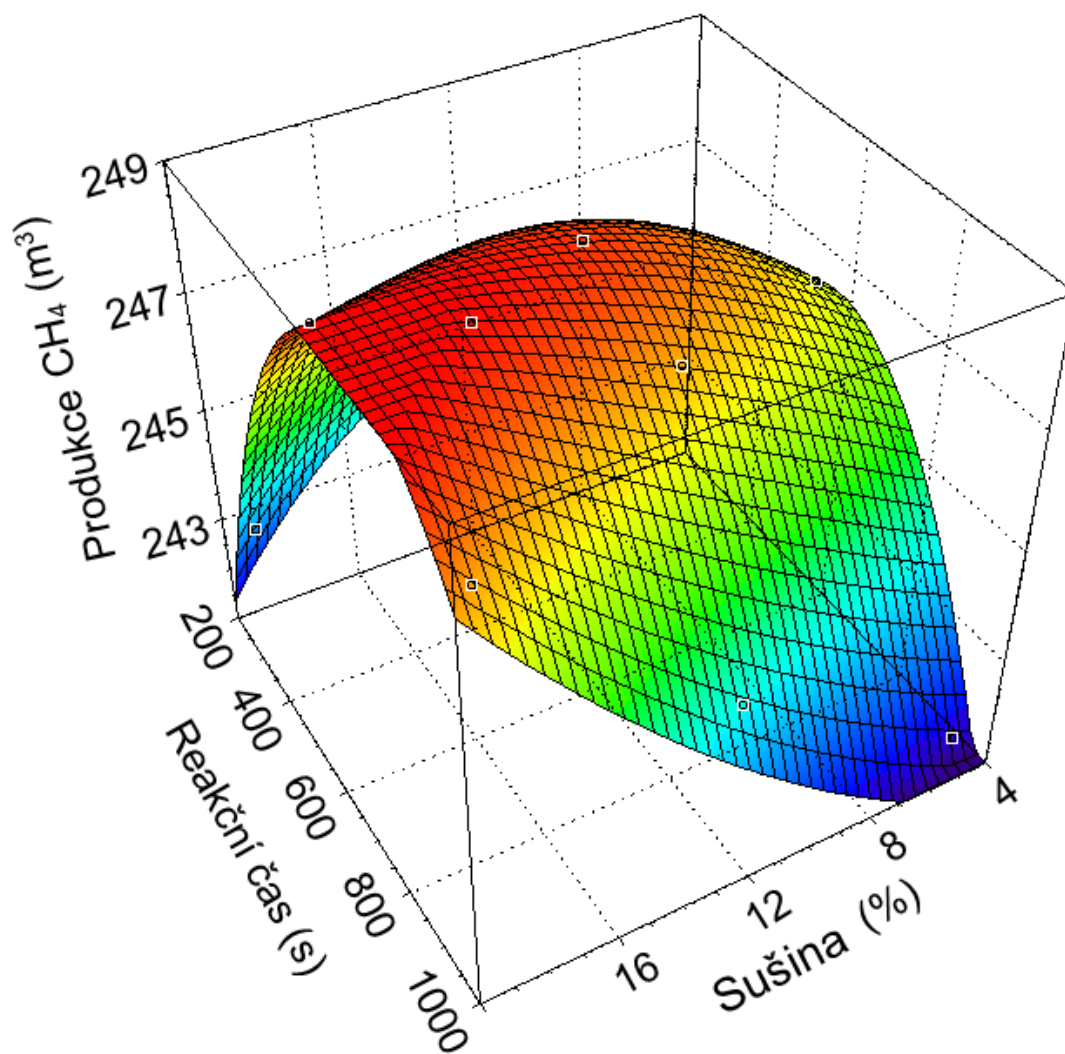
## 5.2 Mapování produkce CH<sub>4</sub>

Tlak 0,553 MPa

Tab. 11: Hodnoty získané při mapování produkce CH<sub>4</sub>

Osa X	Osa Y	Osa Z
Sušina [%]	Reakční čas [s]	Produkce CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> ]
5,306	300	244,87
5,306	600	246,37
5,306	900	245,03
11,577	300	248,42
11,577	600	248,38
11,577	900	247,24
19,219	300	247,85
19,219	600	245,52
19,219	900	243,91

Graf č. 7 – Vygenerovaný 3D graf



### Použitý polynom:

$$z = a + bx^0y^1 + cx^0y^2 + dx^1y^0 + fx^1y^1 + gx^1y^2 + hx^2y^0 + ix^2y^1 + jx^2y^2$$

Kde:

$$a = 2.3198754865806993e+02$$

$$b = 3.0976443296871381e-02$$

$$c = -2.4921126218331482e-05$$

$$d = 1.8486643043828257e+00$$

$$f = -2.2256618784617984e-03$$

$$g = 1.8064965736979896e-06$$

$$h = -4.4987491343998785e-02$$

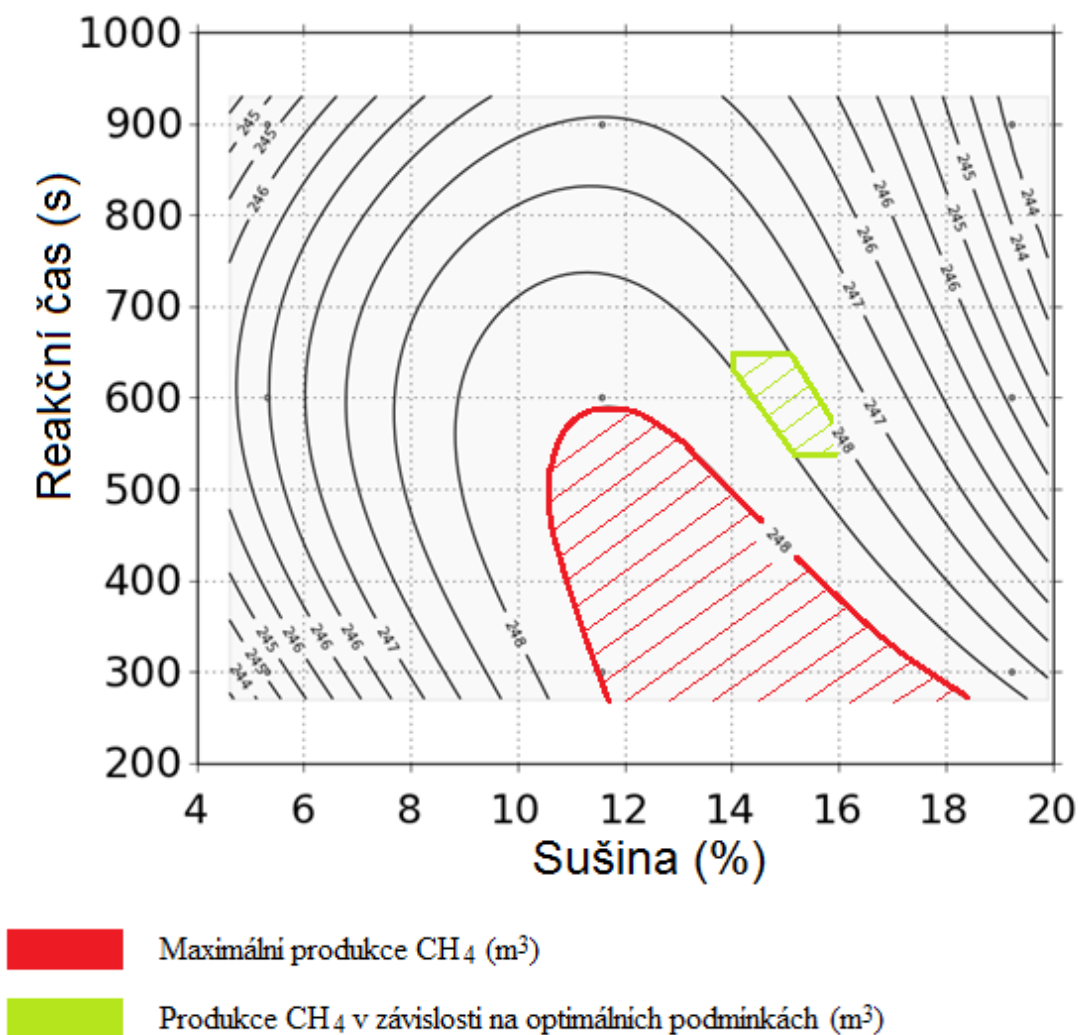
$$i = 1.1692495976919022e-06$$

$$j = -1.5696813609328286e-08$$

$$\text{SSQABS: } 6.54581005044e-18$$

$$\text{RMSE: } 8.52826024361e-10$$

Graf č. 8 – Vrstevnicový graf optimálních parametrů



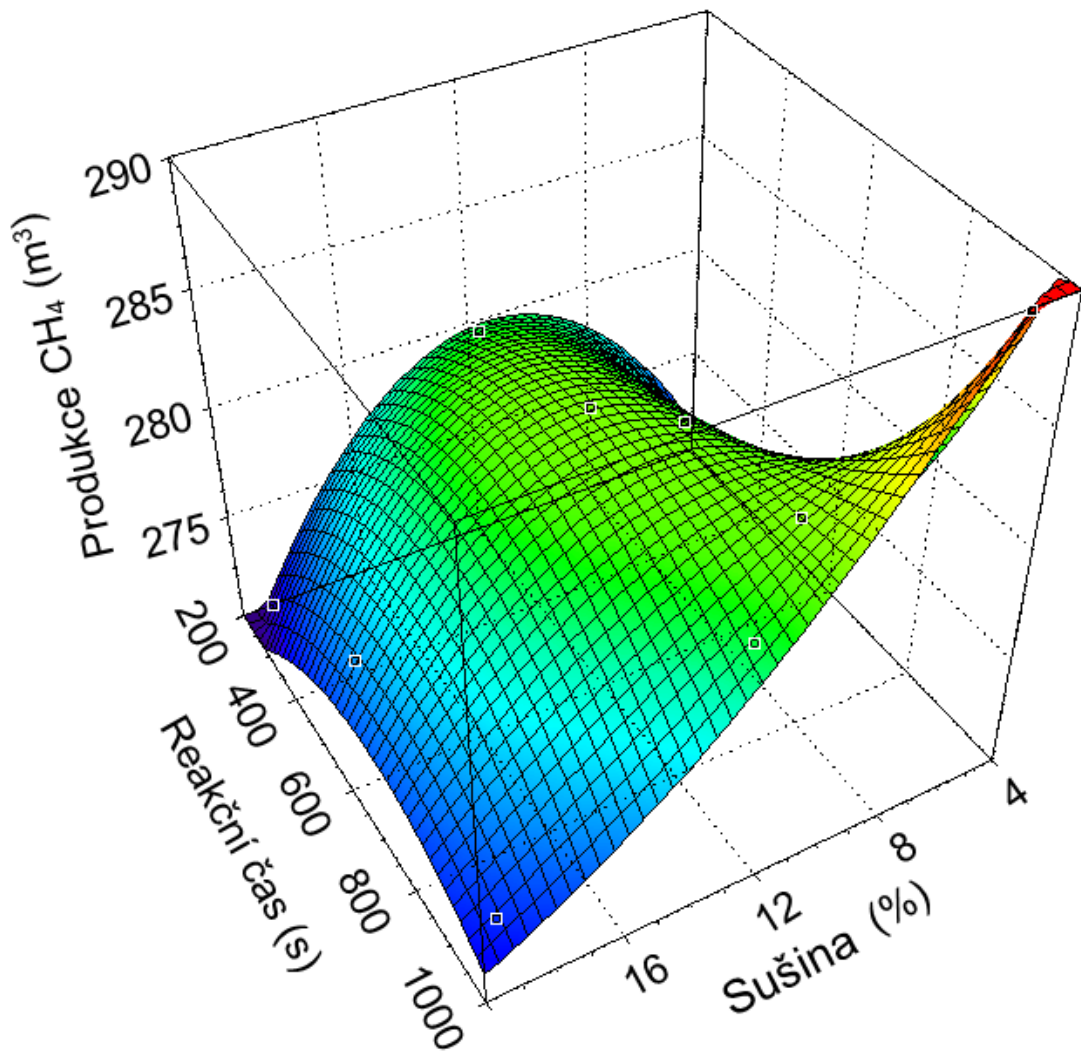


Tlak 1,372 MPa

Tab. 12: Hodnoty získané při mapování produkce CH<sub>4</sub>

Osa X	Osa Y	Osa Z
Sušina [%]	Reakční čas [s]	Produkce CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> ]
5,306	300	271,43
5,306	600	280,16
5,306	900	272,88
11,577	300	275,32
11,577	600	282,07
11,577	900	273,81
19,219	300	273,02
19,219	600	279,92
19,219	900	288,45

Graf č. 9 – Vygenerovaný 3D graf



### Použitý polynom:

$$z = a + bx^0y^1 + cx^0y^2 + dx^1y^0 + fx^1y^1 + gx^1y^2 + hx^2y^0 + ix^2y^1 + jx^2y^2$$

Kde:

$$a = 2.4423851567083094e+02$$

$$b = 7.9352548306015250e-02$$

$$c = -4.4147278171623129e-05$$

$$d = 1.7167481279998029e-01$$

$$f = 9.0374503670455318e-03$$

$$g = -1.2718268201514053e-05$$

$$h = 5.4720383998345466e-02$$

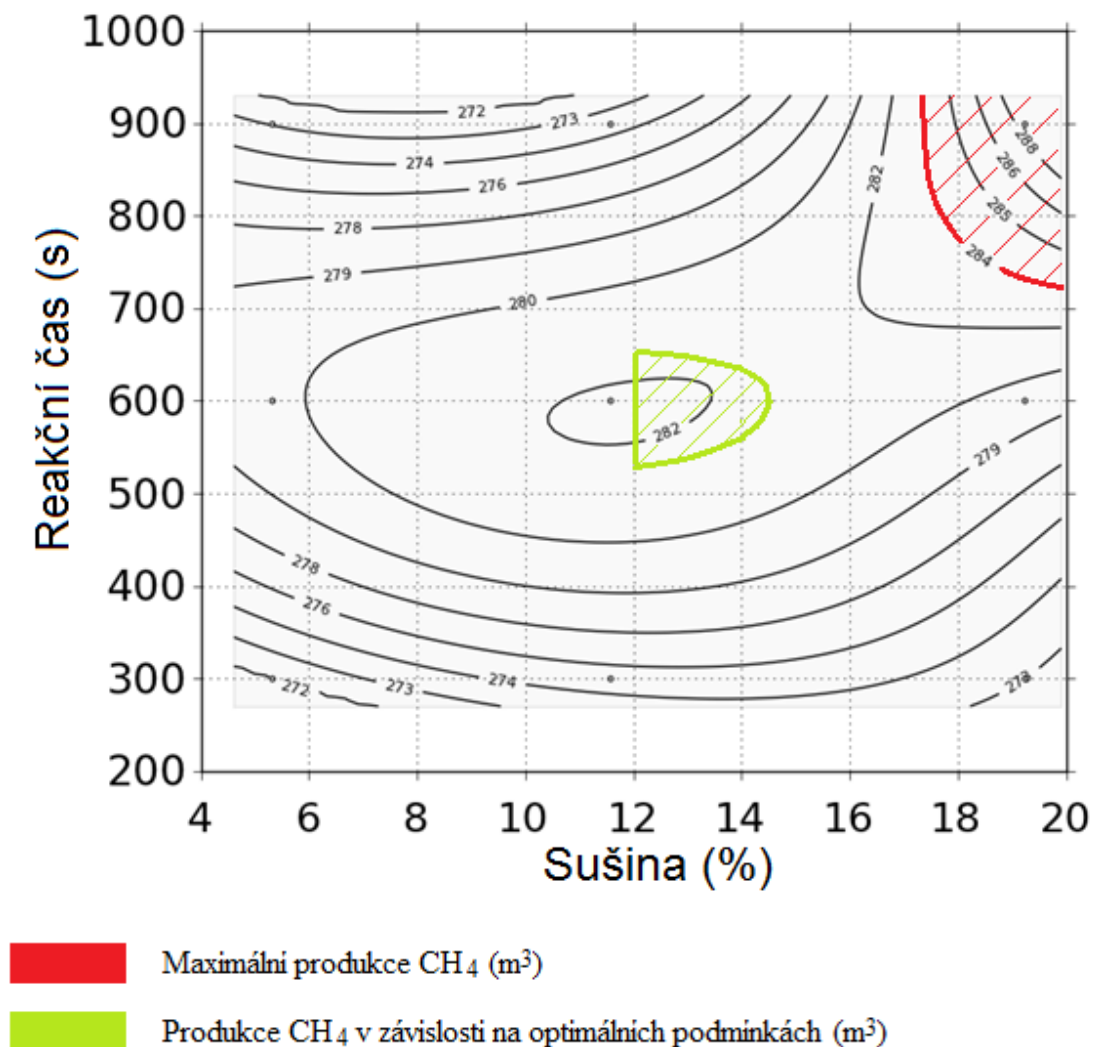
$$i = -6.4486377362133981e-04$$

$$j = 8.0579164989103003e-07$$

$$\text{SSQABS: } 4.09495891491e-18$$

$$\text{RMSE: } 6.74533494343e-10$$

Graf č. 10 – Vrstevnicový graf optimálních parametrů

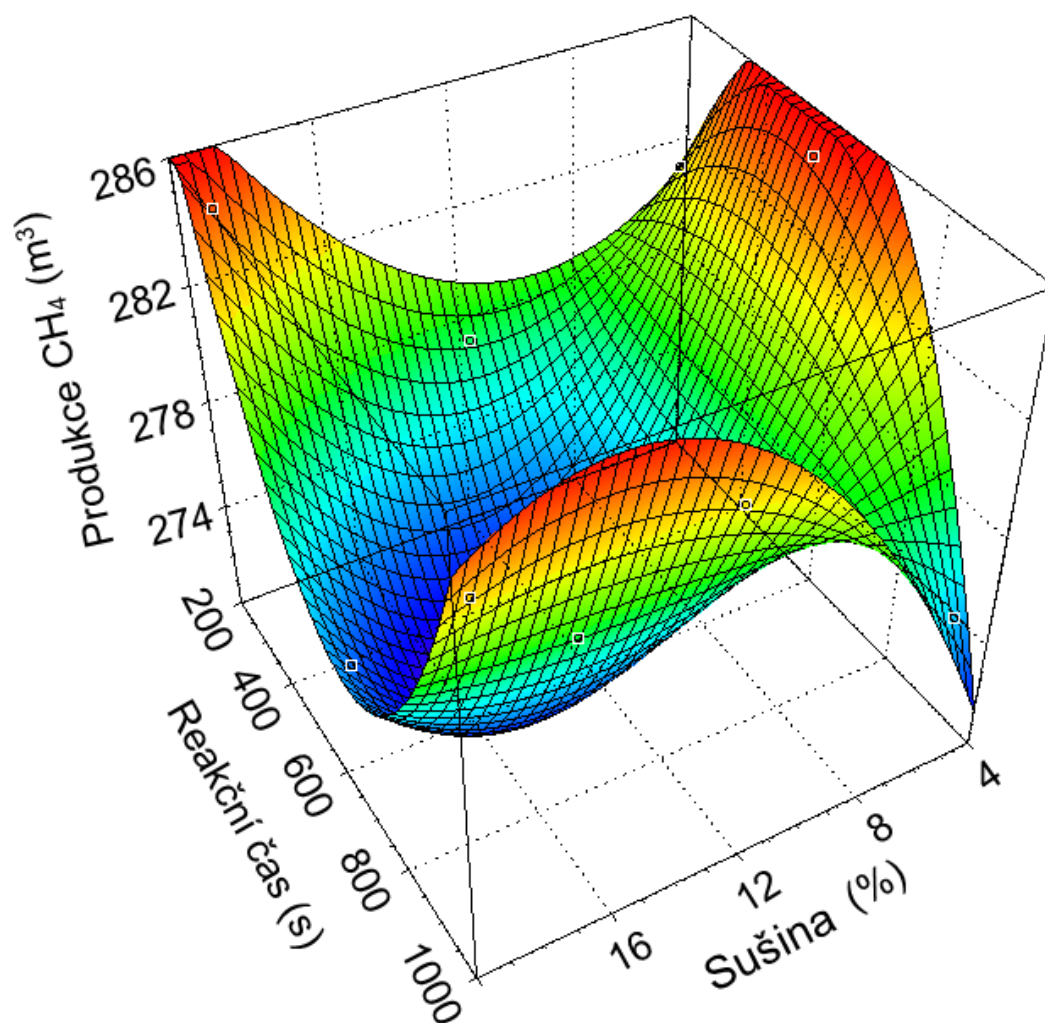


Tlak 2,421MPa

Tab. 13: Hodnoty získané při mapování produkce CH<sub>4</sub>

Osa X	Osa Y	Osa Z
Sušina [%]	Reakční čas [s]	Produkce CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> ]
5,306	300	283,93
5,306	600	277,80
5,306	900	281,22
11,577	300	273,94
11,577	600	271,66
11,577	900	284,47
19,219	300	282,12
19,219	600	281,73
19,219	900	275,28

Graf č. 11 – Vygenerovaný 3D graf



### Použitý polynom:

$$z = a + bx^0y^1 + cx^0y^2 + dx^1y^0 + fx^1y^1 + gx^1y^2 + hx^2y^0 + ix^2y^1 + jx^2y^2$$

Kde:

$$a = 3.0389113979171827e+02$$

$$b = 1.9598753879689488e-02$$

$$c = -6.2540173193241711e-05$$

$$d = -5.7003169988424374e-01$$

$$f = -2.3039838733060237e-02$$

$$g = 2.9521372603101385e-05$$

$$h = -4.4631947076766765e-02$$

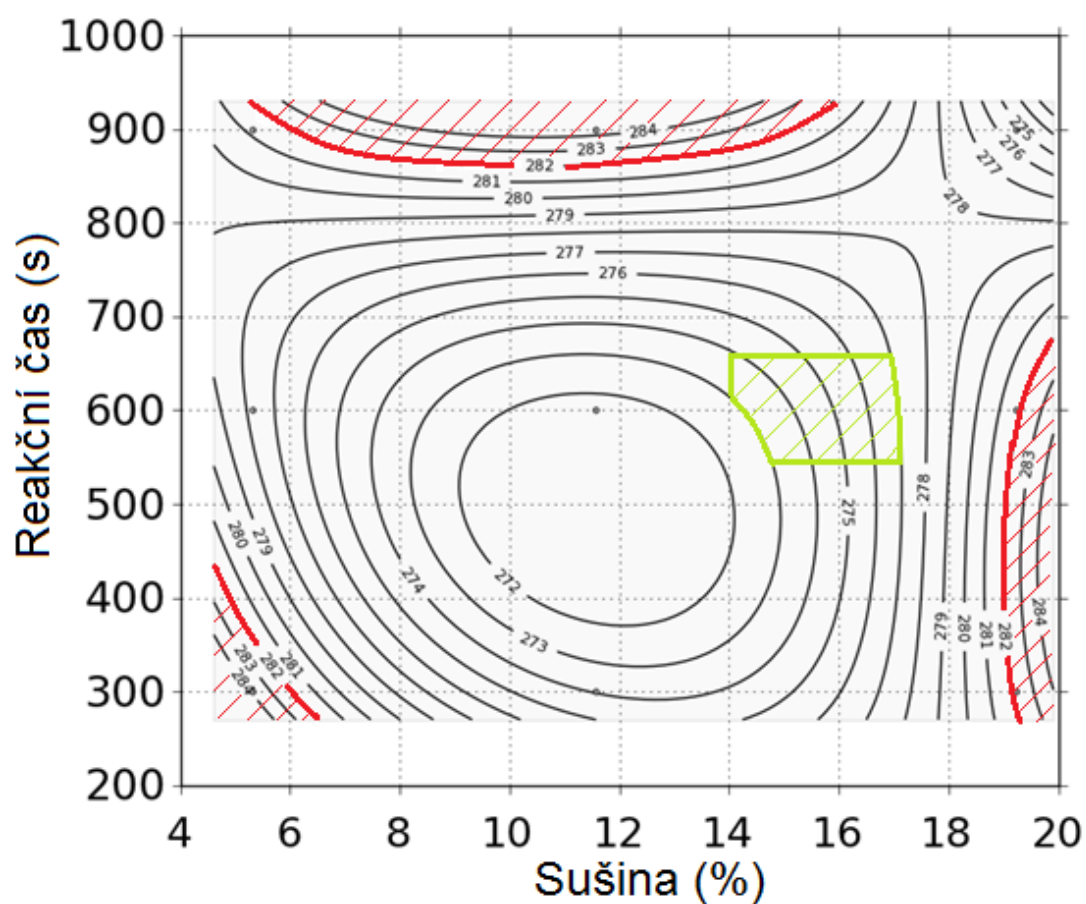
$$i = 1.2242573963178619e-03$$


$$j = -1.4578818268717875e-06$$


$$\text{SSQABS: } 1.90077285598e-18$$

$$\text{RMSE: } 4.59561730345e-10$$

Graf č. 12 – Vrstevnicový graf optimálních parametrů



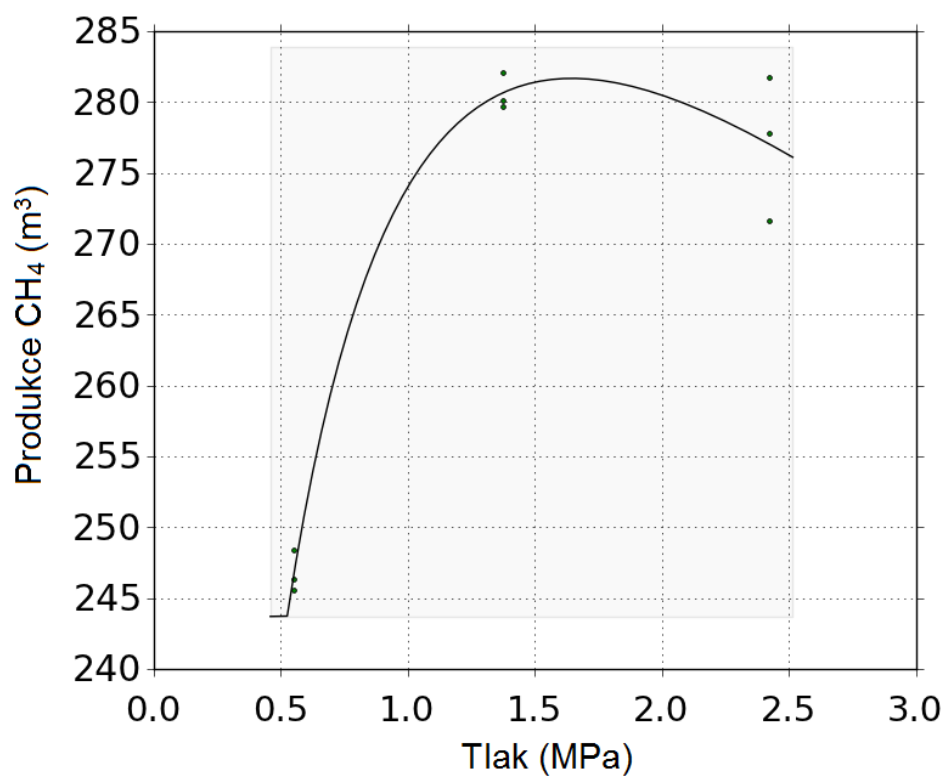
 Maximální produkce CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>)

 Produkce CH<sub>4</sub> v závislosti na optimálních podmínkách (m<sup>3</sup>)

Tab. 14: Produkce CH<sub>4</sub> v závislosti na tlaku při době zdržení 600s

Osa X	Osa Y
Tlak [MPa]	Produkce CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> ]
0,553	246,37
0,553	248,38
0,553	245,48
1,372	280,10
1,372	282,07
1,372	279,72
2,421	277,80
2,421	271,60
2,421	281,73

Graf č. 13 – Produkce CH<sub>4</sub> z kukuřičné siláže v závislosti na extruzním tlaku



**Použitý polynom:**

$$y = a * \exp(\text{pow}(\ln(x) - b, 2.0) / c)$$

Kde:

$$a = 2.8166710268032978e+02$$

$$\text{SSQABS: } 59.6639333333$$

$$b = 4.9839328347012185e-01$$

$$\text{RMSE: } 2.57474774025$$

$$c = -8.9918028751698209e+00$$

## **6. Diskuze**

Z lokálních autorů se extruzi fytomasy věnuje například Krátký a Jirout (2010): *„Zmenšením velikosti částic mechanickou nebo jinou dezintegrací dochází k podstatnému zvětšení povrchu a tím i k větší dostupnosti enzymovému rozkladu“*. S tímto výrokem se nerozchází žádný z výše citovaných autorů, jedná se o všeobecně uznávaný fakt. Na rozdíl od mechanických způsobů extruze nijak výrazně nesníží průměrnou velikost částic, ale při správných parametrech způsobí hlubokou dezintegraci rostlinných vláken, ideálně až na úroveň buněk. K tomuto dodává Hendriks (2009), že: *„dezintegrace biomasy zvýší účinnost hydrolyzy o 5 až 25 % a zároveň zle očekávat snížení doby zdržení ve fermentoru o 23 až 59 %“*. Pro vlastní práci byla využívána kukuřičná siláž, která prošla určitým stupněm mechanické dezintegrace.

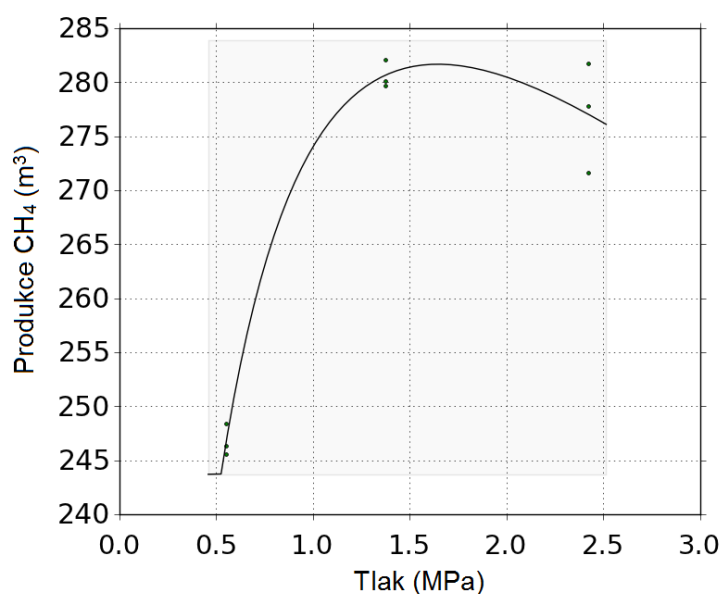
Studie byla prováděna za účelem posouzení problematiky technologického a ekonomického procesu extruze při zpracování kukuřičné siláže k výrobě BP. Schulz (2004) uvádí že: *„každá BPS, je z technologického pohledu a palety vstupů jedinečná“*. Dle Marouška (2011) patří ke klíčovým parametrům celého technologického procesu nalezení optimálního hydromodulu. Alvira (2010) dodává, že *„vhodně zvolené parametry extruze výrazně zvyšují přístupnost celulósových vláken pro enzymy a tím zlepšují možnost rozkladu polysacharidů na monosacharidy“*. Klíčovými parametry technologického posouzení byla dynamika kumulativní produkce BP v návaznosti na extruzním tlaku, době zdržení v extrudéru a obsahu sušiny substrátu. Extrudovaná fytomasa musí být dostatečně řídká, aby mohla přívodem do extrudéru kontinuálně procházet, avšak obsah vody nesmí být natolik vysoký, aby ohrožoval ekonomiku provozu.

Problematikou obsahu sušiny se zabýval Kreuger (2011), kdy provedl výzkum podle normy DIN 38414 a podotkl, že *„maximálního výnosu CH<sub>4</sub> bylo dosaženo v době, kdy jsou rostliny optimálně silážovatelné, tedy s obsahem sušiny kolem 30 % v celé rostlině“*. Maroušek (2011) dodal, že *„nižší sušina je příznivější z hlediska hloubky procesu, avšak příliš vody může způsobovat problémy s udržením konstantního tlaku díky pohybu vnitřního šneku“*. Menší kolísání tlaku má za následek vyšší životnost vysokotlakého reaktoru a nižší spotřebu energie. Jako další z parametrů je třeba nalézt experimentálně optimální dobu zdržení.

Při příliš krátkém zdržení uvnitř reaktoru nedojde k proniknutí efektu tlaku až hluboko do vnitřních struktur a proces pak nemůže být efektivní. Jakákoli zbytečná prodleva v extrudéru se naopak negativně promítne do energetické náročnosti procesu. Sun (2001) uvádí, že „Optimálního rozkladu hemicelulózy lze dosáhnout jak za vysoké teploty a krátké doby zdržení (270 °C, 1 min), tak i za nízké teploty a dlouhé doby zdržení (190 °C, 10 min)“.

Mezi další problém spojený s řízením procesu je vhodné nalezení ideálního extruzního tlaku, který je úzce souvisí s návrhem zařízení. Maroušek (2011) „uvádí, že jakékoli zvýšení tlaku efekt zvyšuje, ale je energeticky náročné a přináší vyšší nároky na konstrukci. Překročení kritického tlaku způsobuje biochemické procesy, které zvyšují přítomnost inhibitorů. Ty se mohou negativně promítnout v navazujícím procesu tvorby bioplynu“. Dle Masona (1928) je tlak 1,9 MPa hraniční hodnotou a podotýká, že tlak nižší než tato hodnota výrazně snižuje účinnost procesu úpravy. Níže uvedený graf je výsledek vlastních simulací, konstruován ze získaných hodnot.

Graf č. 14 – Produkce CH<sub>4</sub> z kukuřičné siláže v závislosti na extruzním tlaku



Nejvyšší produkce CH<sub>4</sub> byla mapována při tlaku 1,372 MPa. K podobným výsledkům došel i Karunanithy (2011), kdy hodnota 1,4 MPa vykazovala velice příznivých výsledků v produkci CH<sub>4</sub>. Aproximace grafu byla zhotovena pomocí parabolické regrese, kterou lze použít v případě, kdy se závislá proměnná mění rychleji než lineárně nebo pokud ve sledovaném intervalu dochází ke změně průběhu funkce z rostoucí na klesající a naopak.

Největší dovedností tak zůstává nalezení optimálních parametrů, které jsou pro každý vstupující materiál různé (vzrůstající náklady při rostoucím tlaku versus nízký efekt extruze při nedostatečném tlaku versus kritický tlak, při kterém je fytomasa degradována).

Nalezení optimálních parametrů při extruzi je z ekonomického hlediska neméně důležité, jelikož nabývá na biochemické složitosti limitovanou technologickými limity. Sun a Cheng (2002) konstatují, že „*použitím mechanických úprav dojde ke zvýšení vstupní energie až o 1/3*“. Snaha o dosažení maxima je z biologického pohledu nesprávná, protože musíme respektovat technologická omezení. Až v jejich limitech je možno hledat optima takovým způsobem, že hlavní slovo hraje ekonomika. Parametr, který se může projevit v ekonomické stránce je nízká koncentrace sušiny, jelikož práce v nízkých koncentracích vyžaduje konstrukci mnohem větších reaktorů, což se projeví ve zvýšených provozních nákladech. Způsobuje zároveň kolísání tlaku v kontinuálním vysokotlakém reaktoru (vstup velkého množství chladnější vody). Provedená studie ukázala, že optimální hodnota sušiny pro produkci CH<sub>4</sub> se pohybuje kolem 14 % při době zdržení v extrudéru 600s.

Pokud bychom diskutovali o aplikaci studované technologie v provozu, BPS Soběšice (základní parametry viz příloha č. 1) je nutno při výstavbě na zelené louce počítat s následujícími změnami v ekonomické bilanci.

Tab. 15: Náklady pořízení

Použitá technologie	BPS Soběšice [tis. Kč]	BPS Soběšice s užitím technologie PES [tis. Kč]
Fermentor	17 600	12 320
Kogenerační jednotka	15 400	15 400
Rozvody tepla pro potřebu BPS	950	950
Teplovody	100	100
Velín - kontejner	510	510
Skladovací nádrž + jímka	3 700	2 590
Fléra	1 300	1 300
Výkopové práce	19 800	13 860
Projektové práce + ostatní náklady spojené s výstavbou	3 200	3 200
PES Promeco Extruder Systém	-	16 000
<b>Celkem</b>	<b>62 560</b>	<b>66 230</b>
Dotace na výstavbu	23 000	23 000
<b>Investiční náklady</b>	<b>39 560</b>	<b>43 230</b>

Zdroj: ZD Soběšice s.r.o., 2012



Pokud bychom uvažovali o využití dané technologie, je možné realizovat menší fermentory, což povede ke snížení investičních nákladů. Jestliže se doba zdržení ve fermentoru sníží o 30%, je možné snížit objem fermentor o 30%. Zmenšením fermentorů dojde i k úspoře nákladů na skladovací jímku z důvodů menšího množství použité fytomasy. K úspoře dojde u výkopových prací. V kalkulaci není počítáno s využitím silážních jam, jelikož se podnik zabývá chovem skotu je siláž hlavní složkou krmiva. Z tohoto důvodu má podnik dostatečné prostory na uskladnění. Co se týče výkonu, který chceme zachovat, náklady na kogenerační jednotku zůstávají stejné. Investiční náklady se oproti BPS bez studované technologie zvýšily o 9 %. Největší zásluhu na tom má pořízení extrudéru od firmy Promeco (základní parametry viz příloha č. 2).

Tab. 16: Provozní náklady

Náklady	BPS Soběšice [tis. Kč/rok]	BPS Soběšice s užitím technologie PES [tis. Kč/rok]
Materiál (paliva, maziva, pohonné látky)	600	600
Služby (servis, školení, reprezentaci)	470	470
Spotřebu vlastních výrobků (senáž, siláž)	5 880	4 116
Osobní náklady (Základní mzdy Prémie, náhrady mezd sociální, zdravotní pojištění)	500	500
Ostatní náklady (odpisy, režie)	2 300	2 300
<b>Celkem</b>	<b>9 750</b>	<b>8 574</b>

Zdroj: ZD Soběšice s.r.o., 2012

Pokud bychom provedli kalkulaci ohledně provozních nákladů, dojde ke snížení o 12 % způsobené zejména úsporou vlastních výrobků (náklady na kukuřičnou siláž). Změny v ostatních nákladech jsou minimální.

Roční produkce bioplynu se pohybuje kolem  $1\,820\,000\text{ m}^3\cdot\text{rok}^{-1}$  s obsahem  $\text{CH}_4$  50%. Vyprodukovaný bioplyn pomocí dané technologie obsahuje až o 10 %  $\text{CH}_4$  více. Díky zvýšení obsahu  $\text{CH}_4$  v bioplynu lze produkci bioplynu snížit o 10 %. Německá firma LEHMANN zabývající se konstruováním extruderů došla k závěru, že použitím extruze lze zvýšit výnos  $\text{CH}_4$  až o 13,8 %. K podobnému výsledku došel i Karunanithy (2011), kdy dodává, že „vhodným nastavením daných podmínek extruze lze zvýšit produkci  $\text{CH}_4$  až o 25 %“.

Spotřebu elektrického proudu v BPS s použitím Systému PES lze snížit v technologii míchání, jelikož upravený materiál je snáze míchatelný a tím dochází k úspoře energie až o 20 % oproti siláži. Avšak je třeba počítat s vyšší spotřebou elektrického proudu na samotný systém. Extrudát přichází do anaerobní digesce teplý, tudíž je vyrobené teplo spotřebováno na extrudér. Výše uvedená praktická pozorování jsou zohledněna v následující tabulce.

Tab. 17: Bilance příjmů

Bilance	BPS Soběšice [tis. Kč/rok]	BPS Soběšice s užitím technologie PES [tis. Kč/rok]
Produkce CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> ]	910	1 070
Produkce el. energie [kWh.rok <sup>-1</sup> ]	3 789	4 168
Cena za 1 kWh [Kč.kWh <sup>-1</sup> ]	4,12	4,12
Vlastní potřeba el.energie BPS [kWh.rok <sup>-1</sup> ]	725	835
Prodej do sítě [kWh.rok <sup>-1</sup> ]	3 064	3 330
Zisk prodejem do sítě [Kč.rok <sup>-1</sup> ]	12 625	13 790
Tržba za prodej tepla [Kč.rok <sup>-1</sup> ]	1 340	-
<b>Celkem [Kč.rok<sup>-1</sup>]</b>	<b>13 965</b>	<b>13 790</b>

Zdroj: ZD Soběšice s.r.o., 2012

Tab. 18: Ekonomická kalkulace

Bilance	BPS Soběšice [tis. Kč]	BPS Soběšice s užitím technologie PES [tis. Kč]
Zisk celkem [Kč.rok <sup>-1</sup> ]	13 970	13 790
Provozní náklady [Kč.rok <sup>-1</sup> ]	9 750	8 574
<b>Čistý zisk [Kč.rok<sup>-1</sup>]</b>	<b>4 215</b>	<b>5 216</b>

Zdroj: ZD Soběšice s.r.o. (2012)

Jako hlavní ukazatel vyjadřující současnou hodnotou budoucích peněžních toků zohledňující faktor času je použita metoda čisté současné hodnoty investice. Jádrem této metody je výpočet rozdílu mezi současnou hodnotou všech očekávaných příjmů (CF) a současnou hodnotou všech investičních výdajů projektu. Počítáme ji dle vzorce (2) uvedeného v literární rešerši. Diskontní sazba je stanovena jako průměrná míra kapitálových nákladů a to na 5 %.

#### Příklad:

*Výpočet aktuální ČSH pro BPS Soběšice*

$$\check{C}SH = \sum_{t=15}^n \frac{4\,215\,000}{(1+0,05)^{15}} - 39\,560\,000 = 4\,191\,602 \text{ Kč}$$

Výpočet ČSH pro BPS Soběšice s užitím technologie PES

$$\check{C}SH = \sum_{t=15}^n \frac{5\,216\,000}{(1+0,05)^{15}} - 43\,230\,000 = 11\,102\,435 \text{ Kč}$$

Tab. 21: ČSH pro BPS Soběšice

Rok	Odúročitel	Současná hodnota CF [Kč]	Současná hodnota CF s užitím technologie PES [Kč]
1	1,050	4 014 286	5 158 095
2	1,102	3 824 864	4 733 212
3	1,158	3 639 896	4 504 318
4	1,216	3 466 283	4 289 474
5	1,276	3 303 292	4 087 774
6	1,340	3 145 522	3 892 537
7	1,407	2 995 736	3 707 178
8	1,477	2 853 758	3 531 482
9	1,551	2 717 602	3 362 991
10	1,629	2 587 477	3 201 964
11	1,710	2 464 913	3 050 292
12	1,796	2 346 882	2 904 232
13	1,886	2 234 889	2 765 642
14	1,980	2 128 788	2 634 343
15	2,079	2 027 417	2 508 898
Σ		43 751 603	54332435
IN		39 560 000	43 230 000
<b>ČSH</b>		<b>4 191 602</b>	<b>11 102 435</b>

Zdroj: Autor

Nákupem studované technologie lze počítat se změnou diskontované doby návratnosti. Tato doba se odvíjí hlavně od pořizovacích nákladů.

*Výpočet DN pro aktuální BPS Soběšice*

*Výpočet DN pro BPS Soběšice s užitím technologie PES*

$$DN = \frac{IN}{CF} = \frac{39\,560\,000}{4\,215\,000} = 9,4 \text{ let} \quad DN = \frac{IN}{CF} = \frac{43\,230\,000}{5\,216\,000} = 8,3 \text{ let}$$

S použitím technologie PES dojde ke snížení doby návratnosti díky vyšším peněžním tokům. Dle nového zákona, který nahradí od 1. ledna 2013 stávající zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie dojde ke změně v poskytnutí úvěru. Zákon přinese zastavení možnosti financování investic bankovními úvěry a v oboru budou dominovat pouze velcí energetičtí hráči, kteří mají dostatek vlastních investičních zdrojů.

## **7. Závěr**

Využití procesu extruze horkou parou dle UV 21314 se pozitivně projevilo na úpravě kukuřičné siláže jak z biotechnologického, tak ekonomického hlediska. Bylo ověřeno, že mezi klíčové parametry technologického posouzení patří dynamika kumulativní produkce  $\text{CH}_4$  v návaznosti na extruzním tlaku a době zdržení v extrudéru. Na základě robustních simulací v experimentální části lze usuzovat, že tlak 1,372 MPa se pravděpodobně pohybuje v blízkosti biotechnologického optima v návaznosti na kinetiku produkce  $\text{CH}_4$  za podmínek (teplota 38 °C, doba zdržení kukuřičné siláže ve vysokotlakém extrudéru UV 21314 byla 600 s). Menší kolísání tlaku způsobené obsahem sušiny má za následek vyšší životnost vysokotlakého reaktoru. Při příliš krátkém zdržení uvnitř vysokotlakého reaktoru lze předpokládat, že nedojde k proniknutí efektu tlaku až hluboko do vnitřních struktur a proces pak nemůže být efektivní. Naopak příliš dlouhá prodleva v extrudéru se může negativně promítnout do energetické náročnosti, ale i zvýšené tvorby inhibitorů.

Po aplikaci studované technologie v provozu, BPS Soběšice dojde k nárůstu ČSH o 62 %. Mezi výhody této technologie je možnost realizovat menší fermentory. Jelikož se doba zdržení ve fermentoru zkrátí o 30 %, lze snížit i objem reaktoru o 30%, což sníží náklady na pořízení technologie. Z důvodů lepší tečivosti lze snížit náklady na míchání až o 20 %. Extrudát přichází do anaerobní digesce teplý, tudíž se snižují náklady na teplo. Teplo k provozu extrudéru lze zajistit unikátní technologií rekuperací tepla ze žhavých spalin (490 °C) motoru kogenerační jednotky. Tím, že dojde k využití tepla v míře vyšší než 10 %, vzniká další nárok na dotaci. Vše výše uvedené se projeví i ve změně doby návratnosti, kdy při použití technologie PES dojde ke snížení o 1 rok.

Lze brát za prokázané, že vhodně zvolené parametry extruze zvyšují přístupnost celulózových vláken a tím zvyšují možnosti hydrolýzy polysacharidů. Největší dovedností je tak nalézt takové extruzní parametry, které jsou pro každý vstupující materiál optimální. Pokud se podaří vhodnou úpravou fytohmoty zvýšit výtěžnost BP, sníží se další kvantitativní požadavky na kukuřičnou siláž, což může představovat další snížení nákladů na agrotechniku. Daná technologie se zdá být jako velice zajímavá alternativa nejen z důvodu finanční rentability, ale i ve vztahu k životnímu prostředí.

## **8. Použitá literatura**

ABBASI, T. Production of clean energy by anaerobic digestion of phytomass - New prospects for a global warming amelioration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, č. 6, s. 1653–1659.

AHRING, B. K. Perspectives for Anaerobic Digestion. In: Advantages in Biochemical Engineering Biotechnology, Editor: T. Schcefer, *Springer Verlag*, Berlin. 2003, roč. 81.

AHRING, B. K.; SANDBERG, M.; ANGELIDAKI, I. Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1995, č. 43, s. 559-565.

ALVIRA, P., et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based. *Bioresource Technology*. 2010, č. 101, s. 4851–4861.

AMON, T., et al. Biogas production from maize and dairy cattle manure-Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2007, č. 118, s. 173–182.

AMON, T.; KRYVORUCHKO, V.; BODIROZA, V.; AMON, B. Methanerzeugung aus Getreide, Wiesengras und Sonnenblumen. Einfluss des Erntezeitpunktes und der Vorbehandlung. In: 7. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Herausgeber: *Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft*. 2005. s. 179-183.

ANGELIDAKI I., et al., Anaerobic processes. In: Angelidaki I, editor. *Environmental biotechnology*. Institute of Environment and Resources, Technical University of Denmark. 2002, s. 1-114.

ATALLA, R. H.; VANDERHART, D. L. The role of solid state <sup>13</sup>C NMR spectroscopy in studies of the nature of native celluloses. *Solid State Nucl Magn Reson*. 1999, roč. 15, s. 1-19.

AVELLAR, B. K.; GLASSER, W. G. Steam-assisted biomass fractionation. I. Process considerations and economic evaluation. *Biomass Bioenergy*. 1998, č. 14, s. 205–218.

BAAH, J.; SHELFORD, J. A.; SWIFT, M. L. Comparison of the fermentation characteristics, aerobic stability and nutritive value of barley and corn silages ensiled with or without a mixed bacterial inoculant. *Can. J. Anim. Sci.* 2011, č. 91, s. 133-146.

BALLESTEROS, M.; OLIVA, J. M.; NEGRO, M. J.; MANZANARES, P.; BALLESTEROS, I. Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875. *Process Biochem.* 2004, č. 39, s. 1843-1848.

BATSTONE, D. J., et al. Anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). *IWA Publishing*, London, UK, 2002.

BAUER, A. Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. *Journal of Biotechnology.* 2009, roč. 142, č. 1, s. 50-55.

BECKER, A.; HILL, S.; MITCHELL, J. R. Relevance of Amylose- Lipid Complexes to the Behaviour of Thermally Processed Starches. *Starch – Stärke. Division of Food Sciences.* 2001, č. 3-4, s. 121-130.

BERGER P.; GELUS, M. Process and apparatus for hydrolyzing cellulose material. Int. Cl. C13K 1/00, US 4478644, 23. 11. 1984.

BERTOFT, E.; PIYACHOMKWAN, P.; CHATAKANONDA, K. S. S. Internal unit chain composition in amylopectins. *Carbohydrate Polymers.* 2008, č. 74, s. 527-543.

BITRA, V. S. P., et al. Comminution properties of biomass in hammer mill and its particle size characterization. In: ASSABE Annual International Meeting in Rhode Island, 2008, s. 1779-1800.

BLAŽEJ, A.; MICHLÍK, I. Některé materiály, *VUT*, Brno, 1975.

BOBLETER, O. Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. *Prog. Polym. Science.* 1994, č. 19, s. 797-841.

BOLUK, Y. Acid-base interactions and swelling of cellulose fibers in organic liquids. *Chemistry and Materials Science.* 2005, roč. 12, č. 6, s. 577-593.

- BOLWELL, G. P. Dynamic aspects of the plant extracellular matrix. *Int. Rev. Cytol.* 1993, č. 146, s. 261-324.
- BOONE, D. R. Ecology and microbiology of biogasification. *Biomass and Bioenergy.* 1993, č. 5, s. 191-202.
- BORGSTRÖM, Y. Pretreatment technologies to increase the methane yields by anaerobic digestion in relation to cost efficiency of substrate transportation. *MASTER OF SCIENCE.* 2011, s. 67.
- BROWN, R. M. Cellulose microfibril assembly and orientation. *J. Cell Sci., Suppl.* 1985, č. 2, s. 13-32.
- BUCHANAN, B. B., et al. Biochemistry and Molecular Biology of Plants. *ASPP.* Rockville, 2000.
- BUCHGRABER, K.; DEUTSCH, A.; GINDL, G. Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung. Leopold Stocker-Verlag. Graz-Stuttgart, 1994, ISBN: 3-7020-0683-4.
- BUSCH, G.; BUSCHMANN, J.; SIEBER, M. Zweistufige Trocken-Nass-Vergärung –Optimierung der Hydrolyse für kurze Raum-Zeit-Ausbeuten. In: Progress in Biogas:Biogas production from agricultural biomass and organic residues. *Kirchberg an der Jagst.* 2007, č. 1, s. 227–232.
- CANGA, G. A., et al. Glucomannan: Properties and Therapeutic Applications. *Nutr. Hosp.* 2004, roč. 19, č. 1, s. 45-50.
- COOKE, K. M.; BERNARD, J. K. Effect of length of cut and kernel processing on use of corn silage by lactating dairy cows. *Dairy Science.* 2005, č. 88, s. 310–316.
- ČOPÍKOVÁ, J.; SYNITSYA, A. Polysacharidy, jejich význam a uplatnění. *Chem. Listy,* 2005, č. 98.
- DEBET, M. R.; GIDLEY, M. J. Why Do Gelatinized Starch Granules Not Dissolve Completely, Roles for Amylose, Protein, and Lipid in Granule “Ghost” *Integrity.* *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 2007, č. 12, s. 4752–4760. Dostupný z WWW:<http://pubs.acs.org/doi/pdfplus/10.1021/jf070004o>>.DOI:10.1021/jf070004>.
- DELMER, D. P.; AMOR, Y. Cellulose Biosynthesis. Department of Botany, *Institute of Life Sciences.* The Hebrew University of Jerusalem. 1995, č. 7, s. 987-1000.



- DEMIRBAS, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*. 2001, č. 11, s. 1357–1378.
- DOHÁNYOS, M., a kol. Anaerobní čistírenské technologie, 1. *Vydání Noel*. 2000, Brno, 1998
- DONALD, K., et al. Microbiology (6. ed.). New York. *McGraw-Hill Science*. 2004, ISBN 978-0072556780.
- ELEFSINIOTIS, P.; OLDHAM, W. K. Substrate degradation patterns in acid-phase anaerobic digestion of municipal primary sludge. *Environmental Technology*. 1994, roč. 15, s. 741-751.
- EPSTEIN, H., et al. Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades. *Environmental Research Letters*. 2012, č. 1, s. 12.
- EVANS, R., et al. Changes in cellulose crystallinity during kraft pulping. Comparison of infrared, X-ray diffraction and solid state NMR results. *Holzforschung*. 1995, roč. 49, s. 498–504.
- FAN, L. T.; LEE, Y. Mechanism of the enzymatic hydrolysis of cellulose: Effects of major structural features of cellulose on enzymatic hydrolysis. *Biotechnol. Bioeng.* 1980, č. 22, s. 177-199.
- GARROTE, G., et al. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz Roh Werkst*. 1999, č. 57, s. 191-202.
- GEIGENBERGER, P.; STITT, M. Sucrose synthase catalyses a readily reversible reaction in vivo in developing potato tubers and other plant tissues. *Planta*. 1993, č. 189, s. 329-339.
- GUNASEELAN, V. N. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass Bioenergy*. 1997, roč. 13, č. 1–2, s. 83–114.
- GUSTAVSSON, L., et al. Reducing CO<sub>2</sub> emissions by substituting biomass for fossil fuels. *Energy*. 1995, č. 11, s. 1097–1113.
- HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2009, č. 100, s. 10-18.

HIMMEL, M. E., et al. Biomass Recalcitrance. [s.l.] : [s.n.], 2008. s. 528, ISBN 978-1-4051-6360-6.

HJORTH, M.; GRÄNITZ, K.; ADAMSEN, A. P. S.; MÖLLER, H. B. Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. *Bioresource Technology*. 2011, č. 102, s. 4989-4994.

HOFRICHTER, M. Lignin conversion by manganese peroxidase (MnP). *Enzyme and Microbial Technology*. 2002, č. 4, s. 454-466.

HOLGERSSON, J.; GUSTAFSSON, A.; BREIMER, M. E. Characteristics of protein-carbohydrate interactions as a basis for developing novel carbohydrate-based antirejection therapies. *Immunology and Cell Biology*. 2005, č. 83, s. 694-708.

HOLTZAPPLE, M. T.; JUN, J. H.; ASHOK, G.; PATIBANDLA, S. L.; DALE, B. E. The ammonia freeze explosion (AFEX) process – A practical lignocellulose pretreatment. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 1991, č. 28, s. 59-74.

HOOPER, R. J.; LI, J., Summary of the factors critical to the commercial application of bioenergy technologies. *Biomass Bioenerg.* 1996, č. 11, s. 469-474.

HOOVER, R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymer*. 2001, č. 45, s. 253-267.

HUBER, G. W.; DALE, B. E. Grassoline at the Pump. *Scientific American*. 2009, roč. 16, č. 6, s. 52-59. Dostupný z WWW: <<http://www.chems.msu.edu/system/files/content/Grassoline-at-the-Pump.pdf>>.

CHYI, Y. T.; DAGUE, R. R. Effects of particulate size in anaerobic acidogenesis using cellulose as a sole carbon source. *Water Environment Research*, 1994, roč. 66, č. 5, s. 670-678.

CHYNOWETH, D. P. Biomethane from energy crops and organic wastes. In: International Water Association (Eds.), *Anaerobic Digestion*. 2004. s. 525–530.

JARVIS, M. C. Interconversion of the Ialpha and Ibeta crystalline forms of cellulose by bending. *Carbohydrate Research*. 2000, č. 325, s. 150–154.

JOHNSON, L. A. Corn: The major cereal of the Americas. In KULP, K. a PONTE, J. G. Handbook of Cereal. *Science and Technology*. New York, 2000, s. 31-80.

KANNADHASAN, S.; MUTHUKUMARAPPAN, K.; ROSENTRATER, K. A. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and tapioca starch. *J. Aquacult. Feed Science Nutr.* 2008, č. 1, s. 6-21.

KARUNANITHY, C.; MUTHUKUMARAPPAN, K. Optimizing extrusion pretreatment and big bluestem parameters for enzymatic hydrolysis to produce biofuel using response surface methodology. *Agricultural & Biosystems Engineering Department.* 2011, roč. 4, č. 1, s. 1-14.

KARUNANITHY, C.; MUTHUKUMARAPPAN, K. Influence of Extruder Temperature and Screw Speed on Pretreatment of Corn Stover while Varying Enzymes and Their Ratios. *Appl Biochem Biotechnol.* 2010, č. 162, s. 264-279.

KHAN, A. A.; DE JONG, W.; JANSSENS, P. J.; SPLIETHOF, H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology.* 2009, č. 90, s. 21-50.

KIM, S.; HOLTZAPPLE, M. T., Delignification kinetics of corn stover in lime pretreatment. *Bioresour. Technol.* 2006, č. 97, s. 778–785.

KLEM, D.; SCHMAUDER, H. P.; HEINZE, T. Biopolymers : Polysaccharides I. [online]. 2002, [cit. 2011-05-10], č. 5, s. 275 - 287. Dostupné z WWW: <[http://www.wiley-vch.de/books/biopoly/pdf\\_v06/bpol6010\\_275\\_287.pdf](http://www.wiley-vch.de/books/biopoly/pdf_v06/bpol6010_275_287.pdf)>.

KREUGER, E. Ensiling of crops for biogas production: effects on methane yield and total solids determination. *Biotechnology for Biofuels.* 2011, č. 1, s. 44.

KRUMPHANZL, V.; ŘEHÁČEK, Z., et al. Mikrobiální technologie- buňka a techniky jejího využití. *Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1988*

KUGA, S.; BROWN, R. M. Physical structure of cellulose microfibrils: Implications for biogenesis. In *Biosynthesis and Biodegradation of Cellulose.* New York, 1991, s. 152-142.

LASER, M.; SCHULMAN, D.; ALLEN, S. G.; LICHWA, J.; ANTAL, M. J., Jr.; LYND, L. R. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. *Bioresource Technol.* 2002, č. 81, s. 33-44.

LEGENDRE, CH. Anaerobic Fermentation of Glycerol to Ethanol. *Department of Chemical & Biomolecular Engineering.* 2009, s. 317.

LEHMANN Maschinenbau GmbH c2005 [cit. 2012-04-16]. Bio-extrusion Dostupné z WWW: <<http://www.lehmann-maschinenbau.de/web/index.php?id=54&L=1>>.

LI, J. Y.; YEH, A. I. Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. *J. Food Engineering*. 2001, č. 50, s. 141-148.

LI, A.; ANTIZAR-LADISLAO, B.; KHRAISHEH, M., Bioconversion of municipal solid waste to glucose for bio-ethanol production. *Bioprocess and biosystems engineering*. 2007, ISSN 1615-7591.

LUO, P.; LIU, Z.; WANG G. Effects of Steam Explosion Pretreatment on Bioconversion of Wheat Straw to Ethanol, Liquor-making. *Science & Technology*. 2005.

MACGREGOR, A. W.; BALLANCE, D. I. Hydrolysis of Large and Small Starch Granules from Normal and Waxy Barley Cultivars by Alpha-Amylases from Barley Malt. *Cereal chemistry*. 1980, č. 6, s. 397-402.

MÁČE, M. Finanční analýza investičních projektů, praktické příklady a použití. *Praha: Grada Publishing*, 2006. s. 77. ISBN 80-247-1557-0.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J.; Brock Mikrobiologie. Spektrum Akademischer Verlag, *GmbH Heidelberg*, Berlin, 2000.

MAIS, U., et al., Enhancing the enzymatic hydrolysis of cellulosic materials using simultaneous ball milling. *Appl. Biochem. Biotechnol*, 2002, 98, s. 815-832.

MALERŤ, J. Zpracování obilovin. 1. vyd. *MZe*. Praha, 1994, 38 s. ISBN 80-7105-073-3.

MANTANIS, G. I.; YOUNG, R. A.; ROWELL, R. M. Swelling of compressed cellulose fiber webs in organic liquids. *Cellulose*. 1995, č. 2, s. 1-22. Dostupný z WWW: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1995/manta95a.pdf>>.

MAROUŠEK J. Produkci bioplynu lze zvýšit dezintegrací vstupní fytomasy, *energie 21*, 2011.

MAROUŠEK, J. Re: *Dotaz* [elektronická pošta]. Zpráva od: Malík Vladimír [28. 3. 2012]. Osobní komunikace

MAŘÍKOVÁ, P., MAŘÍK, M. Diskontní míra v oceňování, *VŠE Praha*, Praha, 2001, s. 101., ISBN 80-245-0228-3

MASON, W. H. Apparatur for and process of explosion fibrillation of lignocellulose material. Patent number 1655618, Jan 10, 1928.

MCNEIL, M.; DARVILL, A. G.; FRY, S. C. Structure and function of the primary cell walls of plants. *Annual Review of Biochemistry*. 1984, č. 53, 625-663.

MOSIER, Net al., Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2005, č. 96, s. 673-686.

MUCHOVÁ, Z. Technológia spracovania cereálií. 2. vyd. *SPU*. Nitra, 2007, 194 s. ISBN 978-80-8069-980-2.

MUSSATTO, S. I.; TEIXEIRA, J. A. Lignocellulose as raw material in fermentation processes. *Technology and Education topics in applied mikrobiology and microbial biotechnology*. 2010, č. 1, s. 897-907.

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. When Plants \"Think\" Alike : Press Release 08-084 [online]. 2009, Nov 05 [cit. 2011-10-11]. The National Science Foundation, 4201 Wilson Boulevard, Arlington, Virginia 22230, USA. Dostupný z WWW: <[http://www.nsf.gov/news/news\\_images.jsp?cntn\\_id=111597&org=IOS](http://www.nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=111597&org=IOS)>.

ODIER, E.; MONTIES, B. Absence of microbial mineralization of lignin in anaerobic enrichment cultures. *Applied and Environmental Microbiology*. 1983, č. 3, s. 661-665.

PALMQVIST, E.; HAHN-HÄGERDAL, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: Inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresource Technol.* 2000, č. 74, s. 25-33.

PANDEY, M. P.; KIM, CH. S. Lignin Depolymerization and Conversion: A Review of Thermochemical Methods. *Chemical Engineering & Technology*. 2010, č. 1, s. 29-41.

PARK, S.; BAKER, J. O.; HIMMEL, M. E.; JOHNSON, D. K. Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance. *Biotechnol Biofuels (in press)*. 2010, roč. 3, s. 10.

PASTOREK, Z.; WOLFF, J., Výroba a využití bioplynu v zemědělství. *Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství*. Praha, 1992, ISSN: 0231-9470.

PELIKÁN, M; SÁKOVÁ, L. Jakost a zpracování rostlinných produktů. 2001, s. 235, ISBN 80-7040-502-3.

PORTER M. G.; MURRAY, R. S. The volatility of components of grass silage on oven drying and the inter-relationship between dry-matter content estimated by different analytical methods. *Grass Forage Sci.* 2001, č. 56, s. 405-411.

PROCHÁZKA, J, et al. Produkce bioplynu z kukuřice. *Česká bioplynová asociace.* 2009.

PŘÍHODA, J.; SKŘIVAN, P.; HRUŠKOVÁ, M. Cereální chemie a technologie I, cereální chemie, mlýnská technologie, technologie výroby těstovin. 1.vyd. *VŠCHT*, Praha, 2003, s. 202 ISBN 80 –7080-530-7.

PSCHORN, T; SHIN, N; STROMBERG, B., System and method for preextraction of hemicellulose through using a continuous prehydrolysis and steam explosion pretreatment process. *Patent Application Publication.* Patent number 0221814 A1, Sep.3, 2009.

REMY, H. Anorganická chemie I. díl. *Státní nakladatelství technické literatury.* 1972, s. 831.

RESS, B. Testing Anaerobic Biodegradability of Polymers in a Laboratory-Scale Simulated Landfill. *Environmental. Science & Technology.* 1998, č. 6, s. 821-827.

RUIZ, E.; Cara, C.; MANZANARES, P.; BALLESTEROS, M.; Castro, E. Evaluation of steam explosion pretreatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks. *Enzyme Microb. Tech.* 2008, č. 42, s. 160-166.

SABOURIN, M. J. High defiberization pretreatment process for mechanical refining. *Patent application publication.* Patent number 20080066877 A1, Mar. 20, 2008.

SENTURK-OZER, S., et al. Biomass pretreatment strategies via control of rheological behavior of biomass suspensions and reactive twin screw extrusion processing Original Research Article. *Bioresource Technology.* 2011, roč. 102, č. 19, s. 9068-9075.

SHIRATO Y.; YOKOZAWA M. Acid hydrolysis to partition plant material into decomposable and resistant fractions for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, roč. 38, č. 4, s. 812-816.

- SCHINK, B. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 1997, roč. 61, č. 2, s. 262-280.
- SCHROEDER, L. R.; GENTILE, V. M.; ATALLA, R. H. Nondegradative preparation of amorphous cellulose. *IPC Technical series*. 1985, č. 152, s. 15.
- SCHULZ H., EDER B. Bioplyn v praxi. HEL. Ostrava 2004. ISBN 80-86167-21-6.
- SIMS, R., Biomass and resources bioenergy options for a cleaner environment in developed and developing countries. *Elsevier Science*, London, UK, 2003.
- SJÖSTRÖM, E., Wood chemistry: fundamentals and applications. *Academic Press*, San Diego, USA, 1993.
- SLUITER, A.; HAMES, B.; RUIZ, R.; SCARLARA, C.; TEMPLETON, D. Determination of ash in biomass. NREL/TP-510-42622. *National Renewable Energy Laboratory*, 2008.
- SOLER, L.; FIGUERAS M. J.; CHACON, M. R.; VILA, J.; MARCO, F.; MARTINEZ-MURCIA, A.; GUARRO, J. Potential virulence and antimicrobial susceptibility of *Aeromonas popoffii* recovered from freshwater and seawater. *FEMS Immunol. Med. Microbiol.*, 2002, č. 32, s. 243-247.
- SREENATH, H. K., et al., Enzymic saccharification of alfalfa fibre after liquid hot water pretreatment. *Process Biochem*, 1999, č. 35, s. 33-41.
- STAMS, A. J. M.; PLUGGE, C. M.; DE BOK, A. F. M.; VAN HOUTEN, B. H. G. W.; LENS, P.; DIJKMAN, H.; WEIJMA, J. Metabolic interactions in methanogenic and sulfate-reducing bioreactors. *Water Science and Technology*, 2005, roč. 52, č. 1, s. 13-20.
- STRAKA, František. BIOPLYN-příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů, *GAS s.r.o.*, Říčany, 2003, ISBN: 80-7328-029-9.
- STRAKA, F., et al. Bioplyn-příručka pro výuku a provoz bioplynových systémů, 2. rozšířené vydání, *GAS s.r.o.*, Praha, 2006.
- STUART, E. Treatment of Fibrous Lignocellulosic Biomass by High Shear Forces in a Turbulent Couette Flow to Make the Biomass More Susceptible to Hydrolysis, Patent number: 5370999, Filing date: Dec 17, 1992, Issue date: Dec 6, 1994.

- SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocelulosic materials for ethanol production. *Bioresource technology*. 2002, č. 82, s. 1-11.
- SYNEK, M a kol. Podniková ekonomika. 3. přepracované a doplněné vyd. Praha: C.H. Beck, 2002. s. 479. ISBN 80-7179-736-7.
- ŠNOBL, Josef, et al. *Základy rostlinné produkce*. Praha: Power Print, 2005. s. 172. ISBN 80-213-1340-4.
- ŠPALDON, E. Rostlinná výroba, *Příroda*, Bratislava, 1982, s. 614.
- ŠTINDL, P. Vliv pH a pórovitosti prostředí na anaerobní digesci travní hmoty. České Budějovice : [s.n.], 2004. s.55.
- TAHERZADEH, J. M.; KARIMI, K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008, č. 9, s. 1621-1651.
- TAHERZADEH, M. J. Ethanol from lignocellulose: physiological effects of inhibitors and fermentation strategies. Ph.D thesis in Biotechnology, *Chemical Reaction Engineering*. Chalmers University of Technology. 1999.
- TAMMINGA, S.; KETELAAR, R.; VAN VUUREN, A. M. Degradation of nitrogenous compounds in conserved forages in the rumen of dairy cows. *Grass Forage Science*. 1991, č. 46, s. 427-435.
- TEEÄÄR, R.; SERIMAA, R.; PAAKKARI, T. Crystallinity of cellulose, as determined by CP/MAS NMR and XRD methods. *Polym Bull*. 1987, roč. 17, s. 231–237.
- THOMSEN, M. H. Complex media from processing of agricultural crops for microbial fermentation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2005, č. 68, s. 598–606.
- TURNER, S. R.; SOMERVILE, C. R. Collapsed xylem phenotype of Arabidopsis identifies mutants deficient in cellulose deposition in the secondary cell wall. *Plant Cell*. 1997, č. 9, s. 689-701.
- TWIDELL, J. Biomass energy. *Renewable Energy World*. 1998, č. 3, s. 38-39.
- VALACH, J. Investiční rozhodování a dlouhodobé financování. 1. vyd. Praha: Ekopress, 2001. s. 447. ISBN 80-86119-38-6.



VALLA, S., et al. Cloning of a gene involved in cellulose biosynthesis in *Acetobacter xylinum*: Complementation of cellulose-negative mutants by the UDPG pyrophosphorylase structural gene. *MOI. Gen. Genet.* 1989, č. 217, s. 26-30.

VAN SOEST, P. J. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science.* 1991, č. 10, s. 3583–3597.

WEILAND, P., Biomass digestion in agriculture: a successful pathway for the energy production and waste treatment in germany. *Engineering in Life Science.* 2006, č. 6, s. 302-309.

YADVIKA, S. Enhancement of biogas production from solid substrates. *Bioresource Technology.* 2004, č. 94, s. 1-10.

YOO, J.; ALAVI, S.; VADLANI, P.; AMANOR-BOADU, V. Thermo-mechanical extrusion pretreatment for conversion of soybean hulls to fermentable sugars, *Bioresource Technology.* 2011, roč. 102, č. 16, s. 7583-7590.

ZHANG, Y. H.; LYNDL, L. R. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: noncomplexed cellulase systems. *Biotechnolgy and Bioengineering.* 2004, roč. 88, č. 7, s. 797-824.

ZIMOLKA, J., et al. Kukuřice-hlavní a alternativní užitkové směry. *Profi Press.* Praha, 2008, s. 200, ISBN 978-80-86726-31-1.

ZUMAN, P. Použití polarografie při studiu reakcí v homogenních prostředích. *Chem. Listy.* 1999, č. 93, s. 306-314.

ZSCHEISCHLER, J.; ESTLER, M.; GROB, F.; BURGSTALLER, G.; NEUMANN, H.; GEIBLER, B. Handbuch Mais: Anbau – Verwertung – Fu“tterung, 3. Auflage, Frankfurt (Main): DLG-Verlag; Mu“nchen, BLV-Verlagsgesellschaft; M“nster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag; Wien “sterreichischer Agrarverlag; Bern: Verbandsdruckerei Wirz. 1984, s. 253.

## **9. Seznam použitých zkratk**

BP- bioplyn

BPS- bioplynová stanice

CF-cash-flow

CI- index krystalinity

CP- Cross-polarization

ČSH- čistá současná hodnota

HTST- high temperature short time

LCM- lignocelulózový materiál

LHW- liquid hot water

LPM- linode platform manager

MAS- magic angle spinning

NMR- nuclear magnetic resonance

PES- promeco extruder systém

SE- steam explosion

SHA- secure hash algorithm

XRD- X-ray diffraction

## **10. Příloha**

### **Příloha 1: BPS Soběšice**

Bioplynová stanice Soběšice je tvořena ze dvou fermentorů (1855 m<sup>3</sup>) na výrobu a jímání BP včetně dávkovacího zřízení na biomasu, dvou kogeneračních jednotek (každá o výkonu 249 kW), velínu umístěného ve třech mobilních buňkách a nové jímky na skladování kejdy o kapacitě 4 000 m<sup>3</sup> včetně výdejní plochy. Veškerý BP je využíván na kogenerační jednotce s vysokou elektrickou účinností a je z něj vyráběna elektrická energie a teplo. Tepelná energie je z kogenerační jednotky produkována ve formě teplé vody cca 90 °C. Vyrobené teplo je využíváno pro hygienizaci a ohřívání fermentačních nádrží. Přebytky jsou využívány k vytápění areálu obchodního družstva.

Kukuřici, kterou pro produkci bioplynu používají, pěstují na výměře 350 ha. Pro správnou funkci a dostatečnou výtěžnost BP je bezpodmínečně nutné dodržet kvalitu vstupního materiálu. Siláž, kterou mají uloženou bezprostředně u BPS. Velikost řezanky jsem odhadoval tak na maximálně 20 mm a sušina byla podle údajů provozovatele 34 %. V době návštěvy se pohyboval obsah CH<sub>4</sub> v rozmezí 50-52 %. Roční spotřeba kukuřičné siláže se pohybuje kolem 10 000 t, kdy náklady na tunu činí cca 750 Kč.

Tab. 19: Ekonomická bilance

Roční produkce BP	1 826 222 m <sup>3</sup>
Výhřevnost BP	cca 18,7 MJ.m <sup>-3</sup>
Elektrická účinnost	39,9 %
Produkce elektrické energie	3 789 MWh
Účinnost výroby tepelné energie	47,1 %
Roční výroba tepelné energie	16 085 GJ
Spotřeba elektrického proudu BPS	725 MWh
Prodej do sítě	3 064 MWh

Zdroj: Interní zdroje podniku, 2011

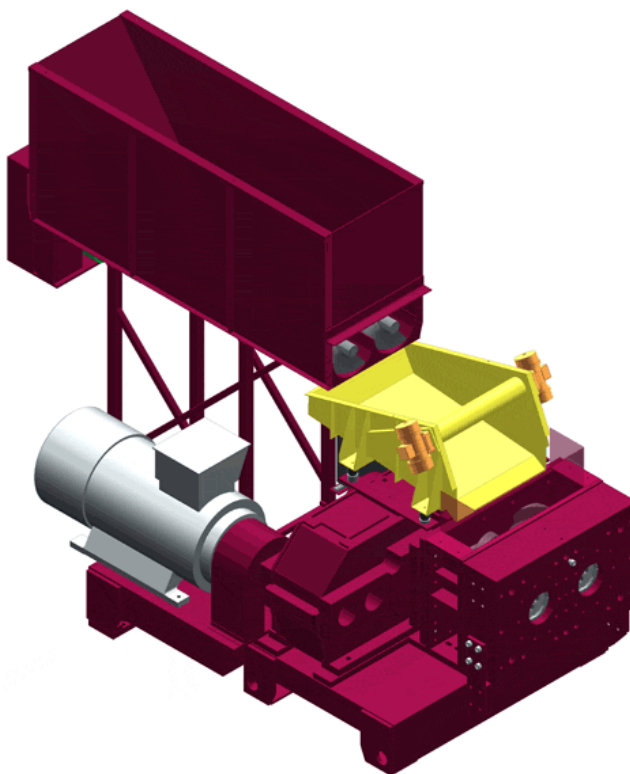
Celkové investiční náklady na výstavbu bioplynové stanice činí 62 560 000 Kč bez DPH. Do celkových nákladů na výstavbu nebyly započteny bourací a demoliční práce. Při ekonomickém hodnocení je uvažováno s předpoklady (doba hodnocení 15 let, doba obnovy u odpisové skupiny 3 je 20 let a u odpisové skupiny 5 je 40 let, daňová sazba 19 %, nominální diskont 5 %, rovnoměrné odpisování).

Doba návratnosti dle vzorce (1) vychází 9 let. Do propočtů BPS bylo však počítáno s dobou návratnosti 10 – 11 let. Jedním z důvodů tohoto navýšení je to, že v prvním roce provozu nebyly žádné velké náklady na opravy, avšak byly zvýšené náklady na obsluhu (zaučení a zaškolení pracovníků). Plánovanými náklady jsou opravy motorů, které se očekávají během 4 až 5 roku provozu (odhad výměny motorů činí 1,5 – 2 miliony korun). Z výše uvedeného zřejmé, že se návratnost o 2 - 3 roky prodlouží.

## **Příloha 2: PES Promeco Extruder Systém**

PES systémy jsou úspěšně využívány v tradici vytlačovacích strojů, vyznačují se zejména v kvalitní úpravě vstupního materiálu.

Grafika 26 – *Bioextrudér Promeco*



Zdroj: Promeco S.p.A, 2012

Zpracovatelská kapacita v závislosti na složení směsi a na struktuře a konečné velikosti požadovaného produktu se pohybuje mezi 25 a 40 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Pořizovací cena dané technologie činí cca 16 000 000 Kč.