

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: N4101 Zemědělské inženýrství

Studijní obor: Zemědělské inženýrství

Katedra: Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií

Vedoucí katedry: prof. Ing. Jan Moudrý, CSc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití procesu extruze při produkci bioplynu z pšeničné slámy

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

Autor: Bc. Dušan Verner

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. Dušan VERNER**
Osobní číslo: **Z10728**
Studijní program: **N4101 Zemědělské inženýrství**
Studijní obor: **Zemědělské inženýrství**
Název tématu: **Využití procesu extruze při produkci bioplynu z pšeničné slámy**
Zadávající 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 pšeničné slámy 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 pšeničné slámy získaných za různých procesních parametrů.

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

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

Práce bude vypracována 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*. Weinheim : 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

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13 ④
370 05 České Budějovice

prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.
děkan

L.S.

prof. Ing. Stanislav Kužel, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 15. března 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma Využití procesu extruze při produkci bioplynu z pšeničné slámy, 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 a to 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.

V Českých Budějovicích 27. 4. 2012

Bc. Dušan Verner

Mé poděkování patří především vedoucímu práce Ing. Josefu Marouškovi, Ph.D., MBA, za metodické a odborné vedení. Dále všem, kteří mi poskytli potřebné informace pro vypracování této práce.

Abstrakt

Mnohé zemědělské bioplynové stanice zpracovávají především cíleně pěstovanou fytomasu jako hlavní vstupní surovinu. Proto má především kukuřice stále větší zastoupení v osevních sledech na úkor tradičních plodin dané oblasti, což představuje mnoho potenciálních negativních dopadů. Cílem práce je biotechnologické a ekonomické hodnocení možnosti využití pšeničné slámy pro anaerobní fermentační proces.

Do pelet lisovaná pšeničná sláma byla extrudována ve vysokotlakém extrudéru dle UV CZ 21314 při různých provozních parametrech. Hlavním hodnotícím kritériem byla kumulativní produkce metanu (CH_4) ve čtvrtprovozní simulaci, v závislosti na extruzním tlaku, době zdržení a teplotě fermentace. Aproximací byly odhadnuty optimální provozní parametry, extruzní tlak 1,35 MPa, doba zdržení v extrudéru 210 s, pro maximální produkci CH_4 při mezofilní teplotě fermentace (38 °C). Pro teplotu fermentace 48 °C byl aproximován optimální tlak 1,25 MPa a doba zdržení 180 s.

Jako hlavní srovnávací kritérium byl zvolen diskontující finanční ukazatel čisté současné hodnoty investice (ČSHI, NPV = Net Present Value), přičemž výpočet celistvě zohlednil veškeré manažerské, legislativní i technologické limity analyzovaných biologických projevů. Z těchto zjištění vyplývá, že extruze pšeničné slámy je zajímavou, nekonvenční a rentabilní technologií pro produkci bioplynu.

Klíčová slova: extruze, pšeničná sláma, bioplyn, CH_4 , bioplynová stanice, NPV

Summary

Many agricultural biogas stations process predominantly phytomass specifically grown for power engineering purposes as a primary raw material. This results in gradual increase of maize proportion in sowing sequences at the exclusion of traditional area-specific crops, which presents various potential negative effects. The aim of study is to evaluate the substitution of maize with wheat straw in the anaerobic fermentation process from the biotechnological and economic viewpoint.

For this purpose, wheat straw pellets were pretreated using the high-pressure extruder in compliance with UV CZ 21314 at different runtime parameters. Cumulative methane (CH₄) production in quarter-mode operation simulation, based on the extrusion pressure, cycle duration and fermentation temperature, was the main evaluation criteria. Optimal run time parameters were derived from the approximation – extrusion pressure 1,35 MPa, reaction time 210 s, in order to achieve maximal CH₄ production at mesophilic fermentation temperature (38 °C). For fermentation temperature 48 °C, optimal pressure 1,25 MPa and cycle duration 180 s were approximated.

The discount rate of Net Present Value (NPV) was established as a main comparative criterion considering overall executive, legislative and technological aspects of analyzed biological effects. Based on these findings suggest, wheat straw extrusion is interesting, unconventional and profitable technology in the field of biogas production.

Keywords: Extrusion, Wheat Straw, Biogas, CH₄, Biogas station, NPV

Obsah

1.	Úvod.....	7
2.	Literární rešerše.....	8
2.1	Fytomasa	8
2.2	Úprava fytomasy	12
2.2.1	Fyzikální metody úpravy.....	14
2.2.2	Chemické metody úpravy.....	15
2.2.3	Fyzikálně-chemické metody úpravy	15
2.2.4	Biologické metody úpravy	15
2.3	Extruze.....	16
2.4	Legislativní ukotvení	21
2.5	Ekonomika bioplynových stanic	22
3.	Metodika	25
3.1	Materiál	25
3.2	Použité zařízení	25
3.3	Příprava extrudátu	28
3.4	Simulace kumulativní produkce CH ₄ ve čtvrt provozu.....	28
3.5	Použitý software	29
4.	Výsledky	30
5.	Diskuze.....	35
6.	Závěr	41
7.	Použitá literatura	42
8.	Přílohy.....	47

1. Úvod

Mnohé zemědělské bioplynové stanice zpracovávají především cíleně pěstovanou biomasu jako hlavní vstupní surovinu. Zejména kukuřice má stále větší zastoupení v osevních sledech na úkor tradičních plodin dané oblasti, což představuje mnoho potenciálních negativních dopadů. Tento fakt je stále více kritizován nejen odborníky.

Cílem práce je biotechnologicky a ekonomicky zhodnotit možnosti využití doposud sporadicky používaných lignocelulóзовých materiálů pro anaerobní fermentační proces. Pšeničná sláma je běžnými technologiemi fermentace zcela nevyužita. S odkazem na aktuální vědecké poznatky týkající se dané problematiky se práce zabývá dezintegrací této vstupní suroviny, především pak extruzí. S tím je spjato legislativní ukotvení problematiky zemědělských bioplynových stanic a ekonomika provozu.

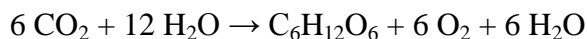
2. Literární rešerše

2.1 Fytomasa

Producentem fytomasy jsou rostliny využívající fotosyntetické asimilace k produkci sacharidů a následně bílkovin. Ty jsou základním „stavebním kamenem“ všech živých organismů – biomasy. Fytomasa je od pradávna zdrojem primární energie ve formě tepla pro topení, vaření atd. Literatura udává, že fytomasa pokrývá 11-15% celosvětové spotřeby energie (Jakubes, 2006). Jednoznačnou výhodou fytomasy je, že se jedná o obnovitelný zdroj, který je při rozumném užívání nevyčerpatelný. Například Azar et al. (2003) ve své studii popisují biomasu jako CO₂ neutrální. To znamená, že při spalování této suroviny jsou emise CO₂ rovny spotřebě tohoto plynu nově narůstající fytomasou. Ta má mnoho forem, ne všechny jsou vhodné ke spalování, např. kvůli vysokému obsahu některých prvků nebo látek, které dají vzniknout nebezpečným emisím. Dle zákona č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší je míněno především emise CO, NO_x, C_xH_y, SO₂, NH₃, H₂S, benzen, aj. Stanovení obsahu hlavních prvků v biopalivech se provádí podle ČSN P CEN/TS 15290. U forem biomasy, kde přímým spalováním mohou tyto emise vznikat, je možné zvolit odlišný způsob využití, například fermentaci pro výrobu bioplynu nebo lihu (Weger, 2009). Lignocelulózová biomasa zahrnuje různé zemědělské zbytky (slámu, slupky, stonky, aj.), listnaté a jehličnaté dřevo, tuhý komunální odpad, odpad papírenského průmyslu, a další. Složení těchto materiálů se liší, hlavní složkou je celulóza (35-50%), hemicelulóza (20-35%) a lignin (10-25%), (Saha, 2003).

Organismy, které zajišťují tvorbu energeticky bohatých organických látek pomocí fotosyntézy, se nazývají autotrofní, respektive fotoautotrofní. Ty jsou schopné transformovat energii elektromagnetického záření o vlnové délce 380–760 nm (tzv. fotosynteticky aktivní záření) na energii chemickou, vázanou v molekulách sacharidů (Lambers et al., 2008). Patří mezi ně především zelené rostliny, některé druhy bakterií včetně sinic (*Cyanobacteria*), mnohé ruduchy (*Rhodophyta*), obrněnky (*Dinophyta*), skrytěnky (*Cryptophyta*), hnědé řasy (*Phaeophyceae*), krásnoočka (*Euglenophyta*) a zelené řasy (*Chlorophyta*). Fotosyntéza (též fotosyntetická asimilace) je složitý několikastupňový biochemický proces (Evans, 1989). Nobelovou cenou za objasnění fotosyntézy, resp. za objevení mechanismu asimilace CO₂, byl v roce 1961 odměněn americký chemik Melvin

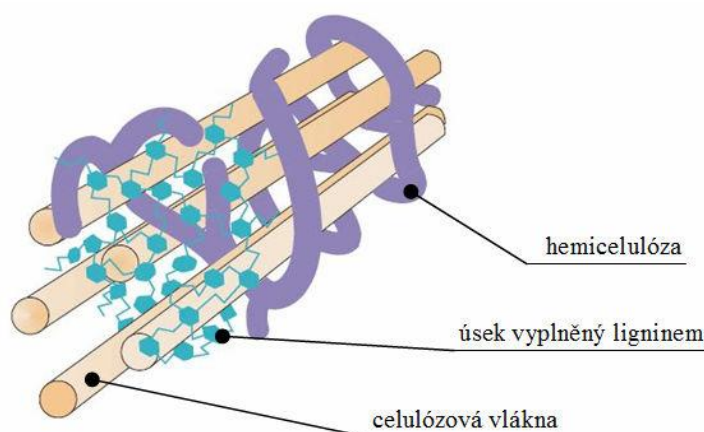
Calvin (The Nobel Prize in Chemistry, 1961). Celkový průběh fotosyntézy shrnuje rovnice:



Polymerace je chemická reakce, při níž se molekuly jednoduchých látek slučují a vznikají makromolekulární sloučeniny bez vzniku vedlejšího produktu. V živých organismech probíhají složité polymerační reakce za přítomnosti katalyzátorů s vysokou specifickou účinností zvaných enzymy. Umožňují jak syntézu, tak i odbourávání polymerního řetězce. Polymery jsou látky vyznačující se tím, že jejich základními jednotkami jsou makromolekuly (Stoklasa, 2005).

Maroušek (2009) ve své práci popisuje jeden z pohledů na fytomasu, který ji dělí na cukernatou, škrobnatou a celulóзовou, přičemž jen první dvě, jsou určeny primárně pro lidskou obživu. Dále uvádí, že skupina celulóзовých plodin je sice nejhojnější, avšak její konverze v užitkovatelné suroviny je tak náročná, že první dvě skupiny představují i přes vyšší cenu stále lukrativnější alternativu. Celulóзовé materiály jsou správněji lignocelulóзовé, jak ukazuje grafika 1. Obsahují totiž 40 až 60 % celulózy, 20 až 40 % hemicelulózy a 10 až 25 % ligninu.

Grafika 1: Struktura lignocelulóзовých materiálů.



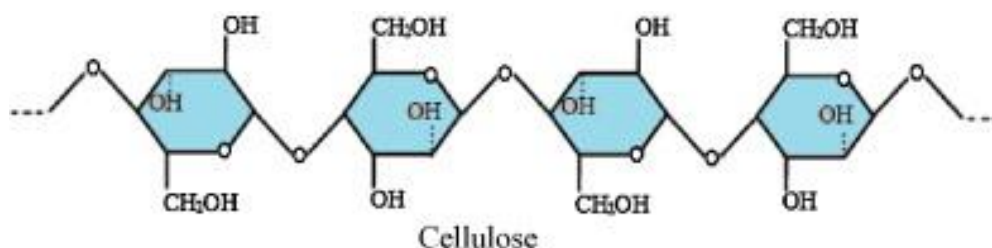
Zdroj: Krátký, 2010

Konverze fytomasy, jako např. pšeničné slámy na výrobu průmyslových výrobků je celosvětově velmi diskutované téma. Je známo, že pšeničná sláma se

skládá převážně z celulózy, hemicelulózy a ligninu. Celulóza v lignocelulózovém komplexu má velký energetický potenciál, který může být využíván v průmyslových a biotechnologických procesech (Reddy, 1978). Avšak vzhledem k přirozené povaze tohoto komplexu, není tento zdroj energie snadno dostupný, pokud není lignin upraven nebo odstraněn, chemickými či biologickými metodami. Odstranění ligninu tedy hraje důležitou roli pro využití celulózy (Zhang et al., 2008).

Celulóza, jako hlavní skladební součást rostlinného pletiva, je nejrozšířenějším biopolymerem na zemském povrchu, ročně jí vzniká až $1,5 \times 10^9$ tun (Kim, Yun, 2006). Tento polymer z β -D-glukopyranosových jednotek spojených vazbami β 1,4 vytváří dlouhé rovné řetězce zesílené příčnými vazbami vodíkových můstků (Murray et al., 1998), (viz grafika 2). Stupeň polymerizace celulózy je uváděn od 500 do 20 000 (Holtzaple et al., 1994), či od 100 do 20 000 (Dale, Balan, 2008). Celulóza je schopna vytvářet krystalické formy a její řetězce jsou různě prostorově uspořádány (lineární i spirální struktury). Celulózová vlákna tvoří hlavní stavební jednotky rostlinných primárních buněčných stěn, spolu s hemicelulózami a ligninem se podílí na stavbě sekundárních buněčných stěn. Straka (2006) popisuje lignocelulózu jako rostlinný „železobeton“, kde celulóza, tvořící fibrily, představuje armaturu, hemicelulóza cement a lignin šterkopísek. Celulózová vlákna jsou obtáčena rozvětvenými řetězci hemicelulózy, struktura je jako celek zpevněna ligninem.

Grafika 2: Celulózový řetězec



Zdroj: Chandra, 2012

Vláknitá struktura celulózy tvoří krystalickou i amorfní strukturu, a krystalinita je určována jako relativní podíl množství těchto dvou forem. Běžně se uvádí, že přibližně 2/3 celkového obsahu celulózy se nachází v rostlinách ve formě krystalické (Chandra, 2012). Během různých experimentů bylo dokázáno, že

celulázy, enzymy štěpící celulózu, štěpí lépe přístupnou amorfní část celulózy, oproti tomu štěpení krystalické formy těmito enzymy není zdaleka tak účinné. Proto jsou rostliny s vysokým obsahem krystalické celulózy více odolné vůči působení mikrobiálního rozkladu. Z tohoto hlediska je tedy důležité vhodnou metodou narušit tuto krystalickou strukturu, čímž dojde k zvýšení přístupnosti a k účinnějšímu rozkladu na monomery, tedy na glukózu. (Taherzadeh, Karimi, 2008). Metody dezintegrace fytomasy budou probrány později.

Hemicelulózy jsou oproti celulóze o mnoho složitější heteropolysacharidy, většinou amorfní, obsahující rozvětvené řetězce. Hemicelulózy podléhají snáze a rychleji enzymatické hydrolýze než celulóza. Hydrolýzou je narušen balastní komplex obklopující strukturu celulózy a tím je umožněno hlubší a efektivnější proniknutí enzymů do struktury celulózy. Hemicelulózy představují heterogenní polymery pentóz (xylózy, arabinózy), hexóz (manózy, glukózy, galaktózy), uronových kyselin a derivátů cukrů a dělí se na 3 skupiny: xylany, manany a galaktanty, podle zastoupení hlavních složek (Straka, 2006). Hemicelulózy v tvrdém dřevě obsahují většinou xylany, zatímco v měkkém převažují manany. Stupeň polymerizace u tvrdého dřeva (150-200) je vyšší než u měkkého (70-130). Hemicelulózy, jsou druhým nejčastějším polysacharidem v přírodě, tvoří asi 20-35 % z lignocelulózové biomasy. Xylan je nejhojnější polysacharid v hemicelulózách. Skládá se z molekul D-xylózy vázaných společně 1,4- β -glykosidickou vazbou (Saha, 2003).

Mezi další významné polysacharidy řadíme škrob. Skládá se ze dvou hlavních složek, amylozy (15-20 %) a amylopektinu (80-85 %). Dále dextriny, látky vznikající v průběhu hydrolytického štěpení škrobu a inulin, jehož hydrolýzou lze získat fruktózu (Murray et al., 1998).

Vedle biologicky rozložitelných sacharidů a polysacharidů obsahuje fytomasa i látky, jejichž biologická rozložitelnost je velmi nízká až nulová. Mezi tyto látky patří především lignin, též lignany a terpeny. Lignin je termín pro skupinu aromatických polymerů vyplývající z hydroxyfenylpropanových jednotek pospojovaných do třírozměrné, těžce rozložitelné struktury. Tyto polymery zajišťují pevnost a odolnost buněčných stěn rostlin (VanHolme et al., 2010). Čím je podíl

ligninu vyšší, tím hůře dochází k chemické a enzymatické degradaci (Taherzadeh, Karimi, 2008).

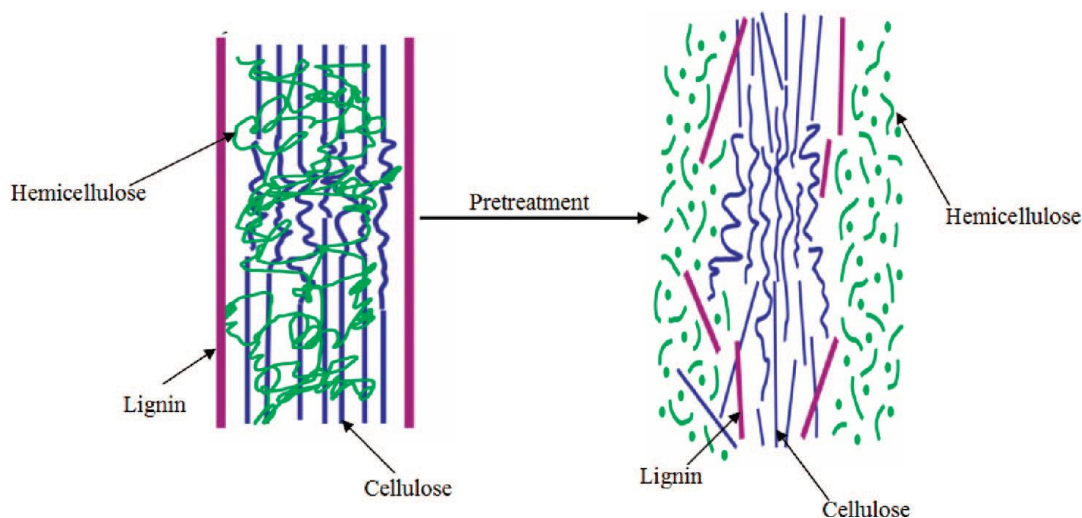
Lignin lze rozpouštět stejně jako hemicelulózu ve vodě při 180 °C, v neutrálním prostředí, např. termotlakou přípravou (extruze) dojde k roztavení či přeskupení ligninu. Explozí amoniakem je narušena vazba lignin-sacharid (Laureano-Pérez et al., 2005). Rozpustnost ligninu závisí také na prostředí (kyselé, neutrální, alkalické) a zastoupení jednotlivých složek (p-kumaryl, konyferyl, sinapyl, atd.) Rozpuštěný působí inhibičně na celulózy a β -glukosidázy (Taherzadeh, Karimi, 2008).

2.2 Úprava fytomasy

Současný provoz zemědělských bioplynových stanic je založen především na zpracování cíleně pěstované fytomasy jako hlavní vstupní suroviny. Použití lignocelulózových materiálů s převážujícím obsahem krystalické celulózy se jeví jako neefektivní vzhledem k malé biologické rozložitelnosti celulózy, jejich derivátů a také ligninu (Sánchez, Cardona, 2008). Pouze část přítomného organického uhlíku je při anaerobní fermentaci transformovaná na bioplyn. Značná část energie syntetizovaná rostlinami do těchto biopolymerů zůstává nevyužita. Proto je cílem úpravy vstupní suroviny odstranění ligninu a hydrolýza hemicelulózy, snížení krystalinity celulózy a zvýšení pórovitosti materiálu. Z toho se odvozuje zlepšení dostupnosti celobiózy a dalších oligosacharidů a jejich využití během následující enzymatické hydrolýzy. Dále je snaha vyhnout se tvorbě inhibitorů pro následnou hydrolýzu a fermentační procesy (Sun, Cheng, 2002).

Zvýšení biologické rozložitelnosti fytomasy a tím i výtěžnosti metanu (CH_4) lze dosáhnout vhodnou úpravou suroviny. Metody úpravy jsou založeny na zpřístupnění celulózových vláken substrátu hydrolytickým enzymům, s cílem dosáhnout zvýšené transformace organického uhlíku do bioplynu (viz grafika 3). Mikrobiální rozklad neupravených lignocelulózových materiálů je příliš pomalý, stupeň rozkladu je nízký a často nepřesahuje 20 % (Dohányos, 2009). Účinná, resp. vhodně zvolená metoda úpravy zvyšuje přístupnost celulózových vláken a zvyšuje tak možnosti rozkladu polysacharidů na monosacharidy bez degradace materiálu a vzniku jakýchkoliv inhibitorů majících vliv na mikrobiální rozklad (Sánchez, Cardona, 2008).

Grafika 3: Efekt předúpravy na zvýšení přístupu mikrobiálního rozkladu



Zdroj: Kumar et al., 2009

Maroušek (2011) z provozního a ekonomického pohledu hodnotí hloubku fermentačního procesu na základě úbytku organické sušiny, zvláště pro suchou a mokrou fermentaci, jak ukazuje grafika 4.

Grafika 4: Orientační hodnocení hloubky procesu zemědělských BPS

Mokrá fermentace úbytek organické sušiny (%)	Suchá fermentace úbytek organické sušiny (%)	Ekonomické hodnocení procesu
do 30	do 20	neefektivní
30 až 45	20 až 35	optimalizovatelný
45 až 50	35 až 40	efektivní
nad 50	nad 40	špičkový

Zdroj: Maroušek, 2011

Zatímco výroba biopaliv z rostlin se škrobovým základem (např. pšenice, kukuřice) je běžná a relativně jednoduchá, snadno se hydrolyzuje amylolytickými enzymy na jednoduché cukry, tak u rostlin s lignocelulózovým základem (dřevní štěpky, sláma, papír, tráva, řepné řízky) tomu tak není. Důvodem je jejich složení, respektive vláknitá struktura (Krátký, 2010).

Vzhledem k tomu, že většina zpracovávaných substrátů je v partikulární formě, nejdůležitějším procesem rozkladu je již zmiňovaná hydrolyza. Jak je obecně

známo, ta probíhá v důsledku přítomnosti bakterií produkujících extracelulární hydrolytické enzymy v první fázi anaerobní fermentace (Verner, 2010)

Maroušek (2011) publikuje, že užití aditiv přináší také ekonomicky zajímavé zvýšení produkce bioplynu, zvláště po kvalitní dezintegraci fytomasy. Čím více je vstupní surovina dezintegrovaná, tím efektivněji může být hydrolyzována. Dezintegraci rostlinné hmoty lze provádět mnoha způsoby, mezi konvenční lze zařadit různé drtiče a mlýny. Ruiz et al. (2008) taktéž uvádějí, že enzymatická hydrolyza nepřináší požadovaný efekt bez předchozí mechanicko-fyzikální úpravy. Před enzymatickou hydrolyzou celulázami je vhodné aplikovat např. termotlakou extruzi.

Jak uvádí Saha (2003), v bioenergetice bylo zkoušeno mnoho metod předúpravy lignocelulóзовé biomasy. Principiálně je lze rozdělit do čtyř skupin a to na metody fyzikální, chemické, fyzikálně-chemické a biologické. V praxi se můžeme setkat i s uplatněním kombinací dvou i více postupů.

2.2.1 Fyzikální metody úpravy

Do těchto metod patří zejména různé způsoby dezintegrace tuhých složek substrátu mechanicky, tzn. mletím, drcením, apod. Do fyzikálních metod je také řazeno ozařování (např. γ -zaření, mikrovlnné) a pyrolýza (Sun, Cheng, 2002). Mezi nejčastější stroje, které lze využít jsou např. mlýny (úderové, koloidní, vibrační a kulové) a válcovací stolice. Mechanické metody jsou považovány za nejjednodušší, avšak díky svým vlastnostem také za energeticky velice náročné. Zmenšením velikosti částic dochází ke zvětšení celkového povrchu a ke zlepšení přístupnosti organických látek v substrátu enzymatickému rozkladu, snižuje se krystalinita a stupeň polymerizace celulózy (Dohányos, 2009). Obtíž nastává v momentě, kdy biomasa není suchá, což lze u běžných vstupů, zejména siláže a senáže, s vysokou pravděpodobností očekávat. Zajímavou alternativou dezintegrace se jeví extruze (Maroušek, 2011). Tu lze rozdělit na mechanickou extruzi, používanou např. v potravinářství, výrobě krmiv atd., a fyzikálně chemickou, při které se využívá páry (=exploze párou, steam explosion, liquid hot water nebo autohydrolyza - chemicky nesprávný, ovšem technicky velice užívaný název).

2.2.2 Chemické metody úpravy

Chemické způsoby předúpravy jsou založené na dezintegraci materiálu pomocí chemikálií. Jedná se o organické či anorganické kyseliny, alkálie nebo různá organická rozpouštědla. V praxi nejpoužívanější chemická metoda je kyselá hydrolýza. Při použití tohoto způsobu předúpravy je biomasa vystavena působení roztoků H_2SO_4 , HCl , HNO_3 nebo H_3PO_4 . Zpracovávat biomasu lze v různých typech reaktorů jak za vysokých teplot ($180^\circ C$) a krátkých dob zdržení (5 min.), tak za nízkých teplot ($120^\circ C$) a dlouhých dob zdržení (30-90 min.), (Alvira, 2010). Určitým nedostatkem kyselých hydrolýz je tvorba sekundárních látek, které mohou působit inhibičně na následné zpracování hydrolyzátu mikroorganismy. Negativem může být finanční náročnost spojená s regenerací a recyklací použitých chemikálií a také korozivní napadání materiálu reaktoru (Saha, 2003). Jako další chemické metody dezintegrace biomasy literatura uvádí ozonolýzu, mokrou oxidaci, užití peroxidu vodíku (Sánchez, Cardona, 2008).

2.2.3 Fyzikálně-chemické metody úpravy

Jedná se o metody kombinující fyzikální a chemické principy dezintegrace lignocelulózové struktury biomasy. Mezi nejčastěji diskutované patří exploze vodní parou (Hamelinck a kol., 2005), parní exploze s přídavkem SO_2 , úprava horkou vodou (liquid hot water), (Taherzadeh, Karimi, 2008), amoniakální exploze (Ammonia fiber explosion, AFEX) a exploze CO_2 (Sun, Cheng, 2002).

Všechny tyto metody jsou založeny na temperování biomasy. Pokud dojde ke zvýšení teploty biomasy na hodnoty okolo $150-180^\circ C$, nejprve se začne rozpouštět hemicelulóza a dále pak i lignin. Při teplotách nad $180^\circ C$ dochází již k intenzivnímu rozkladu hemicelulózy a ligninu. Teploty nad $160^\circ C$ mohou být příčinou tvorby inhibičních látek na bázi fenolů, které mají negativní vliv na metanogenní bakterie (Zheng et al., 2009)

2.2.4 Biologické metody úpravy

Biologické metody mají nízké energetické nároky a nároky na prostředí. Nicméně většina z těchto procesů je příliš pomalá, což omezuje jejich použití průmyslově. Mnoho bílých plísní degraduje lignin, proto se jich využívá pro výrobu lignin-degradujících enzymů (ligninázy), (Lee, 1997). Hnědé, bílé a hnilobné houby produkují dále celulózy, hemicelulózy, lignin-peroxidázy, polyfenoloxidázy, lakázu

a chinony-redukující enzymy, aj. (Sánchez, Cardona, 2008). Tyto metody jsou málo efektivní bez předchozí mechanicko-fyzikální úpravy (Ruiz et al., 2008).

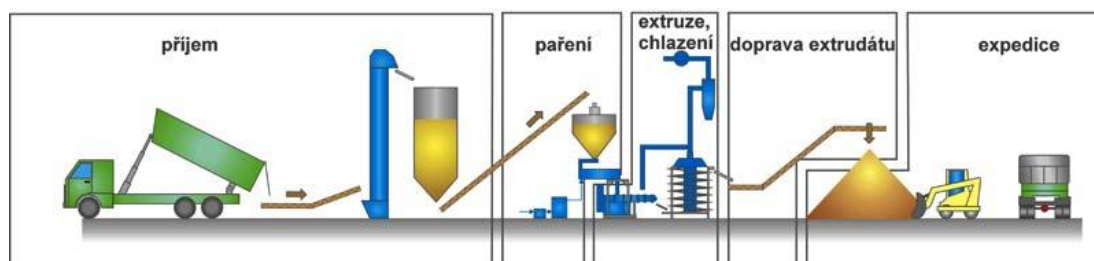
2.3 Extruze

V praxi se ukázalo, že užití různých drtičů a mlýnů je velice energeticky náročné (Shell, Hardwood, 1994). Hendriks a Zeeman (2009) publikují, že rozmělněním biomasy lze dosáhnout zvýšení účinnosti hydrolýzy o 5 až 25%, s předpokládaným snížením doby zdržení ve fermentoru o 23 až 59 %. S ohledem na vzrůstající ceny energií se mletí a drcení jeví jako neekonomické. Maroušek (2011) dodává, že jejich zařazení zvýší celkovou energetickou náročnost technologie až o třetinu. Samostatnou a velmi účinnou metodou dezintegrace fytomasy je tzv. extruze. Dezintegraci fytomasy extruzí lze chápat jako rychlý vysokoteplotní proces (high temperature, short time process, HTST) při kterém je v reaktoru (extrudéru) materiálu dodáno teplo a mechanická energie, což v okamžiku expanze z reaktoru způsobí fyzikálně-chemické změny v jeho hlubší struktuře (příloha 1 a 2). Tlaku uvnitř reaktoru je nejčastěji dosahováno zvýšením teploty přívodem horké páry. Po určité době zdržení v reaktoru následuje prudké uvolnění, nejčastěji do úrovně atmosférického tlaku. Extruze, na rozdíl od mechanických způsobů dezintegrace, nijak výrazně nesníží průměrnou velikost částic, ale při správných parametrech způsobí hlubokou dezintegraci rostlinných vláken, ideálně až na buněčnou úroveň. Tento jev lze externě detekovat například snížením viskozity. Pokud jsou parametry nastaveny optimálně (pro každý druh fytomasy je optimální jiný tlak, doba zdržení, hydromodul, atd.), dojde až k buněčné kavitaci. 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 kapalně fáze. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, bublina plynů imploduje za vzniku tlakové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál (Maroušek 2011).

Extruze je dobře zavedená metoda v potravinářském a krmivářském průmyslu. Ve své podstatě se jedná o mechanické protlačování materiálu zúženým místem pracovního ústrojí a to buď tryskou či matricí s průvlaky. Pracovní ústrojí extrudéru tvoří opakovaně za sebou řazené šneky a škrťací vložky umístěné v komorách, kde v poslední komoře je zmíněné zúžené místo. Zpracováváný materiál

je do pracovního ústrojí dávkován řízeně, což definuje výkonnost stroje. Šneky zajišťují posun materiálu přes škrtkové vložky komorami a postupně dochází k jeho zahřívání a plastifikaci. Při průchodu zúženým místem je materiál vystaven tlaku a teplotě, poté vstupuje do volné atmosféry, expanduje a část vody odchází ve formě páry. Technologie zpracování krmiv připouští dvě varianty, suchou a mokrou extruzi. Mokrú extrúzu umožňuje daleko širší využití než extrúzu suchá neboť umožňuje zpracovávat i materiály, které neobsahují žádný tuk nebo jej mají velice málo, např. kukuřice, obiloviny, luštěniny (viz grafika 5), (Mervart, 2005).

Grafika 5: Extruzní linka na zpracování zrnin



Zdroj: Mervart (2005)

Za průkopníka užití parní exploze (extruze pomocí páry) pro úpravu lignocelulózových materiálů lze považovat W. H. Masona (Sun et al., 2004). Proces, při kterém byly dřevěné štěpky nebo hobliny krátce ošetřené tlakovou parou s následným rychlým uvolněním tlaku přes ventil, byl patentován v roce 1928 (Mason, 1928). Parní exploze se stala známou metodou pro separaci lignocelulózových materiálů na jednotlivé hlavní složky, celulózu, lignin a hemicelulózu. DeLong et al. (1988) ve svém patentu uvádějí jako další chemicky separovatelné látky např. kyselinu glukoronovou a octovou, furfural, xylany a další.

Zhang et al. (2008) zkoumali vliv úpravy pšeničné slámy parní explozí na biodegradaci ligninu pomocí bílých plísní *Trametes versicolor*. Experimentálně byl zjištěn optimální provozní tlak 0,8 MPa, poměr pšeničné slámy a vody (hydromodul) 1:20. Za těchto podmínek bylo degradováno 19,94% ligninu, 13,51 % celulózy a 69,54% hemicelulózy. Takto upravená sláma byla máčena v *Trametes versicolor*. Výsledky ukázaly, že největší degradace ligninu, 75,34%, bylo dosaženo po třiceti

dnech máčení. Oproti tomu parní explozí neupravený vzorek dosáhl po máčení v *Trametes versicolor* pouze 31,23% degradace ligninu.

Han et al. (2010) se zabývali vlastnostmi pšeničné slámy po ošetření parní explozí, pro průmyslové využití. Sláma byla nadrcena na velikost 25 mm, 12 hodin máčena ve vodě, poté vystavena účinku parní exploze při teplotě 190 nebo 200°C, retenční čas 2 nebo 3 min. Optický výsledek znázorňuje grafika 5.

Grafika 5: Ukázka pšeničné slámy před a po úpravě explozí páry. (a) před úpravou, (b) ošetřeno 190°C po 2 min., (c) ošetřeno 190°C po 3 min., (d) ošetřeno 200°C po 2 min., (e) ošetřeno 200°C po 3 min.



Zdroj: Han et al., 2010

Moniruzzaman (1996) zkoumal účinky parní exploze na fyzikální a chemické vlastnosti rýžové slámy. Velký nárůst pórů přístupných celulolytickým enzymům byl

pozorován při podmínkách 3,53 MPa (240 °C) po dobu 2 minut. Při těchto procesních parametrech byl maximální 83% výnos glukózy ($C_6H_{12}O_6$). Naopak zjistil, že při tlaku 4,02 MPa (252 °C) je pórovitost vláken snížena.

Horn et al., (2011) upravovali nadrcenou (10mm) pšeničnou slámu pomocí parní exploze s použitím osmnácti různých kombinací parametrů. Teplota se pohybovala od 170 °C (0,8 MPa), odstupňováno po 10 °C, až po 220 °C (2,3 MPa), doba zdržení 5, 10 a 15 min, hydromodul 1:3-1:4. Studie se zabývala úpravou slámy pro produkci etanolu (C_2H_6O), kde celkový výsledek záleží především na kvalitě vstupních surovin a dostupnosti sacharidů pro fermentační proces. Jako hodnotícím kritériem byl určen největší výnos glukózy. Ten činil až 90% teoretického maxima (při teplotě 210 °C).

Výsledky úpravy biomasy musí být v rovnováze s následnými kroky dalšího zpracování a kompromisem mezi provozními a investičními náklady a náklady na biomasu (Mosier, 2005). Jakákoli metoda dezintegrace musí být z principu velmi efektivní, protože z ekonomické podstaty věci představuje vždy dodatečné náklady. Užitá metoda musí být nejen investičně a provozně nenáročná, ale nesmí způsobovat znehodnocení suroviny (Maroušek, 2010)

Každá bioplynová stanice je svým způsobem originální, jak z hlediska technologického řešení, tak i pestrou paletou vstupních surovin. Modifikované extrudéry využitelné pro úpravu vstupních surovin BPS jsou přizpůsobeny nejen velikostí a výkonem zařízení, ale i jejich parametry a schopností zpracovat širokou škálu vstupních surovin. Při zavádění extrudéru je třeba nejprve experimentálně zjistit optimální provozní parametry. Mezi kritické parametry patří nalezení optimálního hydromodulu. Hmota musí být dostatečně řídká, aby mohla přívodem do extrudéru kontinuálně procházet, avšak obsah vody nesmí být natolik vysoký, aby ohrožoval ekonomiku provozu. Nižší sušina je příznivější z hlediska hloubky procesu, avšak příliš vody může způsobovat problémy s udržením konstantního tlaku díky pohybu vnitřního šneku (Maroušek, 2011).

V České republice se problematikou konstrukcí modifikovaných extrudérů pro termotlakou přípravu biomasy zabývá firma Pharmix s.r.o., která je spolujemitelem užitého vzoru (UV) CZ 21314 s firmou Biomass technology a.s. Tento UV chrání zařízení pro kontinuální zpracování materiálů se signifikantním

podílem fytomasy kontinuální tlakovou hydrolýzou s následnou expanzí hydrolyzátu. Jedná se o relativně jednoduché multifunkční zařízení, schopné zpracovávat materiál s podílem fytomasy na hydrolyzáty či extrudáty, s širokou škálou procesních parametrů. Zařízení je tvořeno vysokotlakým vřetenovým čerpadlem materiálu ústícím do vysokotlakého hydrolyzéro/extruderu, dimenzovaného na tlak do 3,5 MPa, tvořící jeden tlakový prostor, který má na vstupu ohřívač materiálu. Dále je zařízení opatřeno vnitřním šnekem pro řízenou dopravu materiálu, přičemž na hydrolyzér/extruder navazuje expanzní turniket ústící do expanzní nádoby s odvodem brýdových par (viz. Příloha 3). Tato technologie využívá termickou tlakovou hydrolýzu a skokovou expanzi. Cílem je mechanicko-fyzikální degradace fytomasy na buněčné úrovni. Extrudát slámy, který byl připraven na výše popsaném zařízení, při procesních parametrech 180 °C, 1,5 MPa, dosáhl v kumulativní produkci bioplynu hodnoty v porovnání se slepým vzorkem slámy (21 dní) o 5 dní dříve.

Technologický proces hydrolýzy je výhodné využít jako termotlakou přípravu k degradaci biomasy před anaerobní fermentací. Dosáhne se tak výrazného zvýšení výtěžnosti bioplynu, zkracuje se reakční doba a také se snižuje potřeba objemu fermentorů i množství potřebné biomasy. Zároveň je možno zpracovat širší spektrum materiálů, např. slamnatou biomasu (grafika 6). Technologie využívá pro výrobu páry odpadní teplo spalin kogenerační jednotky z výroby elektrické energie, které se zpravidla jinak nevyužívá. Tím je celý proces ekonomicky efektivní (NWT, 2010).

Grafika 6: Ukázka neupravené a termotlakou hydrolýzou ošetřené biomasy.



Zdroj: NWT 2010

Patentem CZ 294398 je chráněný způsob komplexního zpracování lignocelulózových a škrobových materiálů za vzniku etanolu, furfuralu, kyseliny

octové a ligninu kontinuální tlakovou hydrolyzou s následnou dvoufázovou expanzí, rozdělením hydrolyzátu na plynnou fázi a roztok cukrů.

2.4 Legislativní ukotvení

Potřeba využívání energie z obnovitelných zdrojů je již obecně akceptována v celosvětovém měřítku. V Evropské unii byla nezbytnost využívání obnovitelných zdrojů energie (dále jen OZE) potvrzena na Evropském summitu v Bruselu v roce 2007, kde bylo přijato rozhodnutí, jehož cílem je dosažení 20% podílu energie z OZE a 10% podílu energie OZE v dopravě na spotřebě energie ve Společenství do roku 2020 (Směrnice EU, 2009). Dne 31. 1. 2012 byl schválen zákon o podporovaných zdrojích energie, s účinností od 1. 1. 2013, který nahradí stávající zákon č. 180/2005 Sb. Účelem nového zákona je zajistit zvyšování podílu obnovitelných zdrojů na spotřebě primárních energetických zdrojů k dosažení stanovených cílů daných Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2009/28/ES. K naplňování těchto cílů je stanoven Národní akční plán, který obsahuje opatření a způsob dosažení závazných cílů podílů energie z obnovitelných zdrojů, průběžných dílčích cílů podílu energie z obnovitelných zdrojů a předpokládané hodnoty vyrobené energie a instalovaných výkonů pro jednotlivé druhy obnovitelných zdrojů. V případě elektřiny vyrobené z bioplynu se podpora elektřiny z obnovitelných zdrojů vztahuje pouze na elektřinu vyrobenou v kombinované výrobě elektřiny a tepla, která využívá bioplyn vznikající alespoň ze 30% z jiné biomasy než je cíleně pěstovaná biomasa na orné půdě a na travním porostu a která zajistí efektivní využití pro alespoň 50% primární energie v bioplynu.

Dle vyhlášky č. 482/2005 Sb., o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy v platném znění, se biomasa dělí do dvou základních skupin, biomasa podléhající termickým procesům a biomasa pro anaerobní fermentaci. Tato vyhláška, resp. novela č. 453/2008 také zařazuje BPS do dvou kategorií, AF1, AF2. BPS kategorie AF1 zpracovávají více než 50 % sušiny cíleně pěstované biomasy a nezpracovávají žádné odpadní suroviny.

Energetický regulační úřad (ERÚ) byl zřízen 1. ledna 2001 zákonem č. 458/2000 Sb., ze dne 28. listopadu 2000, o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů, jako správní úřad pro výkon regulace

v energetice. Zákonem č. 180/2005 Sb., jsou stanoveny úkoly ERÚ, tzn. podpora využívání obnovitelných a druhotných zdrojů energie. Využití bioplynu je v ČR účelně podporováno systémem stanovených výkupních cen nebo systémem tzv. zelených bonusů. Provozovatel BPS musí pro každý kalendářní rok předem vybrat jednu z těchto dvou možností.

„Garantovaná“ výkupní cena

Elektřina vyrobená z OZE, musí být distributorem nebo správcem distribuční soustavy vykoupena za stanovenou cenu. Ceny jsou stanoveny jednou ročně cenovým rozhodnutím ERÚ a jsou pro zařízení uvedené do provozu v daném roce garantovány po dobu 15 let, cena je každoročně valorizována. Cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu č. 7/2011 ze dne 23. listopadu 2011 byla stanovena výkupní cena elektřiny pro BPS AF1 na 4120 Kč/MWh, pro AF2 na 3550 Kč/MWh dodané do sítě.

Zelený bonus

Pokud prodejce energie z OZE zvolí tuto variantu, může obchodovat s energií na volném trhu. Distributor je povinen mu uhradit zelený bonus. Na zelený bonus má výrobce elektřiny právo, i když využije elektřinu uvnitř podniku. Výše zeleného bonusu byla stanovena na 3070 Kč/MWh pro AF1 a 2500 Kč/MWh pro AF2.

2.5 Ekonomika bioplynových stanic

Správné vyhodnocení ekonomiky bioplynové stanice je základním předpokladem provozní úspěšnosti celého projektu. Proto je nutné mít v předinvestiční fázi mnoho přesných informací a propočtů nákladů nejen na investici do zařízení, ale zároveň nákladů spojených s provozem. Tato fáze je z hlediska úspěchu projektu klíčová, jelikož je základním záměrem všech komerčních investic finanční přínos, tedy zisk (Koudela, Schejbalová, 2000).

Investor se pro realizaci investice rozhodne tehdy, pokud celkový (finančně ohodnocený) efekt investice bude vyšší než celkové (finančně ohodnocené) nároky projektu při respektování časové hodnoty peněz. Pro výběr konkrétní varianty projektu pak slouží několik metod a ukazatelů. Např. Cash flow je stěžejním

nástrojem pro posuzování investičních záměrů. Používá se především ve finanční analýze, plánování a vyhodnocování investičních variant. Cash flow se dá charakterizovat jako pohyb peněžních prostředků (přírůstek i úbytek) za určité období. Počítá se v jednotlivých letech provozu a představuje rozdíl mezi všemi příjmy a výdaji (Trávníček, Szomolányiová, 1997).

$$CF = P - V \text{ [Kč]}$$

CF.....Cash flow

P.....příjmy

Vvýdaje

Pokud se používá cash flow pro vyhodnocení investičních variant za delší časové období, je nezbytné aktualizovat jeho hodnotu pomocí diskontu a dalších kategorií složeného úrokování.

Zřejmě nejjednodušším, literaturou uváděným kritériem pro hodnocení investice je prostá doba návratnosti (DN). Její vyhodnocení spočívá v porovnání počtu let, za které se investice vrátí. Investice, která má v porovnání s ostatními nejkratší dobu návratnosti, se hodnotí jako nejvýhodnější. Toto kritérium je nejméně přesné, přesto hojně užívané. Prostá doba návratnosti nezohledňuje skutečnou časovou hodnotu peněz (Ochodek et al., 2008).

Za teoreticky nejpřesnější metodu pro hodnocení investic je považována čistá současná hodnota (NPV, z angl. Net Present Value). Čistá současná hodnota představuje rozdíl mezi aktualizovanou (nebo současnou) hodnotou peněžních příjmů z investice a aktualizovanou hodnotou kapitálových výdajů na investice.

$$NPV = \sum_0^t \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

t.....doba životnosti

CF.....generovaný peněžní tok v daném a roce

r.....diskontní míra

Hlavní předností metody NPV je zkoumání efektivnosti investic na základě celé doby provozu, jako efekt investování vyjadřuje celý peněžní příjem, respektuje časovou hodnotu peněz a prostřednictvím diskontní sazby vyjadřuje také rizika toho kterého projektu. Problémem u této metody může být stanovení správné diskontní sazby, ta totiž významně ovlivňuje výslednou hodnotu (Valach et al., 2010).

Investiční náklady BPS se pohybují v řádech desítek až stovek milionů korun a jsou velice ovlivněny druhem vstupního materiálu. Elektrický výkon BPS je z pravidla poměrně malý, jedná se o jednotky o výkonech řádově stovek kW, maximálně jednotek MW. Tato kapacita je většinou dána dostupností surovin. Měrné investiční náklady mohou dosahovat 50-150 tisíc Kč na jednu kW instalovaného výkonu (Ochodek et al., 2008).

3. Metodika

3.1 Materiál

Zkoumaným substrátem byla sláma ozimé pšenice (odrůda Alka, sklizeň v roce 2009, vlhkost 9,8 %) ze zemědělského podniku VOŠ a SzeŠ Tábor v Měšicích (GPS souřadnice: 49° 24' 37.44", 14° 42' 32.24").

Inokulum pocházelo z bioplynové stanice Nedvědice [sušina 1.151%, pH (při 38°C 6,7; při 51°C 6,8) hustota 1157 kg/m³] pracující technologií suché fermentace kukuřičné siláže, čerstvého statkového hnoje, suchého statkového hnoje a zbytků z předchozí dávky v poměru 12:1:1:6.

Použitá voda pocházela z místního vodovodního řádu laboratoře Kroměříž (Česká republika).

3.2 Použité zařízení

Sušina byla stanovena pomocí pece UO 400 (Memmert GmbH, Büchenbach, Německo) a pomocí muflových pecí LH 06/13 (Fisher Scientific Ltd., Pardubice, Česká republika) v souladu s metodou USEPA (2001). Elementární analýza inokula (N, P, K, Ca a C) byla provedena externě (ÚKZUZ, S.p.A., Brno, Česká republika). Dynamika pH v závislosti na teplotě byla měřena pomocí pH metru - CyberScan 600 (Chromservis Ltd., Praha, Česká republika). Měření vlákniny a ligninu externě provedla (Zemědělská oblastní laboratoř Malý a spol., Postoloprty, Česká republika).

Briketovací lis

Nadrcená sláma byla lisována do pelet o průměru 2-6 mm a délce 8-18 mm, pomocí briketovacího lisu (Grafika 7) od společnosti GreenEnergy (Vlčkov, Česká republika). Průměr pelet závisí na velikosti matrice.

Modifikovaný extrudér

Technologie (Grafika 8) slouží ke kontinuálnímu zpracování materiálu obsahujícího signifikantní podíl fytohmoty, dle užitého vzoru (UV) CZ 21314. Je tvořena vysokotlakým vřetenovým čerpadlem dezintegrovaného materiálu (1) ústícím do vysokotlakového hydrolyzéry (2), dimenzované na tlak maximálně 3,5 MPa, který má na vstupu ohřívač (3) materiálu a je opatřen vnitřním šnekem (4)

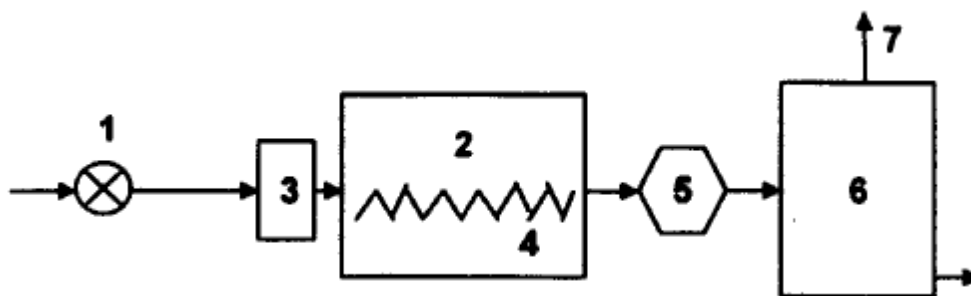
pro řízený posun materiálu. Na hydrolyzér (2) navazuje expanzní turniket (5) ústící do expanzní nádoby (6) s odvodem brýdových par. Je možné napojit odvod brýdových par (7) na vstupní ohřivač (3).

Grafika 7: Briketovací lis na výrobu pelet JGE 120



Zdroj: GreenEnergy, 2009

Grafika 8. Modifikovaný extrudér



Zdroj: UV 21314, 2010

Anaerobní fermentor

Automatický monitorovací anaerobní fermentor Stix (Grafika 9), objem 30 L, 2 otáčky za minutu, vyvinul Maroušek pro firmu Biomass Technology a.s. (Hulín, ČR). Horní nádoba je hlavním reaktorem. Teplota, pH, CH₄, CO₂, O₂ a H₂S jsou průběžně monitorovány systémem čidel a posílány přes WiFi (802.11b/g) do laboratorního serveru. Teplota je automaticky udržována pomocí čtyř termostatových senzorů. První je umístěn v dolní části reaktoru, druhý v krytu

reaktoru, třetí a čtvrtý senzor je umístěn uvnitř reaktoru ve vzdálenosti 5 a 20 cm ode dna fermentoru. Hodnota pH byla sledována čidly umístěnými vedle vnitřních senzorů. Plyny jsou snímány analyzátozem GA 3000, který je vybaven technologií pracující s infračerveným detektorem a elektrochemickými senzory (Chromservis s. r. o., Praha, Česká republika). Potrubí, které je vedeno na levé straně spojuje horní a spodní fermentor, slouží k průchodu digestátu. Ve spodním fermentoru je za stejných provozních parametrů pouze sledována zbývající produkce CH_4 a CO_2 .

Grafika 8: Automaticky monitorovaný anaerobní fermentor Stix.



Zdroj: Pharmix, 2010

3.3 Příprava extrudátu

Sláma byla nejprve nadrcena na velikost 1-2 mm, poté lisována do pelet o průměru 2-6 mm. Pelety jsou pásovým dopravníkem automaticky vkládány do maceračního mlýnu, kde se rozemelou, smísí s vodou, dojde k částečnému vytěsnění vzduchu a vznikne čerpatelná suspenze s optimálním hydromodulem 1:7. Tato suspenze je vysokotlakým vřetenovým čerpadlem dopravena do vysokotlakého extrudéru a vystavena působení tlaku a teploty (tlak 0,8 MPa, retenční čas 200; 400; 600; 800; 1000s; tlak 1,2 MPa retenční čas 200; 400; 600; 800; 1000s; tlak 1,4 MPa, retenční čas 200; 400; 600; 800; 1000s; tlak 2,0 MPa; retenční čas 200; 400; 600; 800; 1000s; tlak 2,6 MPa, retenční čas 200; 400; 600; 800; 1000s; tlak 3,2 MPa, retenční čas 200; 400; 600; 800; 1000s). Zvýšení tlaku a teploty je dosaženo přívodem technologické páry. Teplota sledována nebyla, ale na základě fyzikálních zákonů je zřejmé, že s rostoucím tlakem se zvyšovala i teplota. Přičemž je třeba konstatovat, že teplota závisí i na dalších faktorech, např. parametry reaktoru, objem páry, která do něho vstupuje, objem vody, která vstupuje s fytoomasou i rozdíl jejich teplot. Po uplynutí retenčního času opustí extrudát tlakový prostor přes expanzní turniket a vypadává do expanzní nádoby. Parní exploze nastává v důsledku poklesu tlaku na atmosférický, čehož se docílí zmiňovaným expanzním turniketem. Takto připravená extrudovaná sláma byla následně anaerobně fermentována.

3.4 Simulace kumulativní produkce CH₄ ve čtvrt provozu

Jednotlivé vzorky extrudované pšeničné slámy byly fermentovány ve výše popsaném anaerobním fermentoru Stix. Poměr substrátu a očkovací směsi byl 20:1 (vztaženo k sušině). Následně došlo k naředění vodou z důvodu snížení sušiny na 10% (požadavky BPS). Délka simulace trvala 35 dnů, při teplotě fermentace 38°C nebo 48°C.

Ze získaných dat (kumulativní produkce CH₄ v m³*t⁻¹ sušiny, při výše definovaných parametrech simulací, automaticky balancována na teplotu 0°C a tlak 101 325 Pa) byla vyhledána nejpřesnější aproximační funkce, pomocí metody pro určení přesnosti virtuálního modelu Root Mean Square Error - RMSE, která měří rozptyl rozdělení četnosti odchylek mezi původními výškovými daty. Data byla dále analyzována v matematickém programu MATLAB, kde byla do nejvhodnějšího

polynomu vložena získaná data a s přesností danou limity programu aproximována ohniska lokálních extrémů.

3.5 Použitý software

ZunZun.com

Webová aplikace autora Jamese R. Phillipse, (Birmingham, Alabama, USA) je provozována na serveru Linode Platform Manager s programovacím jazykem Python 3.3.0. Aplikace umožňuje aproximovat 2D a 3D grafy, křivkové či povrchové, na základě zadaných hodnot x , y , případně z . Aproximované funkce jsou seřazeny dle přesnosti, s jakou vystihují rozložení dat. Ke každému grafu je vygenerovaná funkce, z které lze vypočítat hledané extrémy. Vše lze stáhnout ve formátu PDF. Celá aplikace je zdarma, dostupná online na adrese www.zunzun.com.

MATLAB verze 7.0.1

MATLAB (**matrix laboratory**) je matematický program vyvinutý společností MathWorks s.r.o. (Natick, Massachusetts, USA), pracující v interaktivním programovém prostředí a skriptovacím programovacím jazyce čtvrté generace. MATLAB umožňuje počítání s maticemi, vykreslování 2D i 3D grafů funkcí, implementaci algoritmů, počítačovou simulaci, analýzu a prezentaci dat, atd.

4. Výsledky

Produkce CH₄ při teplotě fermentace 38°C

Tabulka 1: Hodnoty získané při mapování produkce CH₄ při teplotě fermentace 38°C.

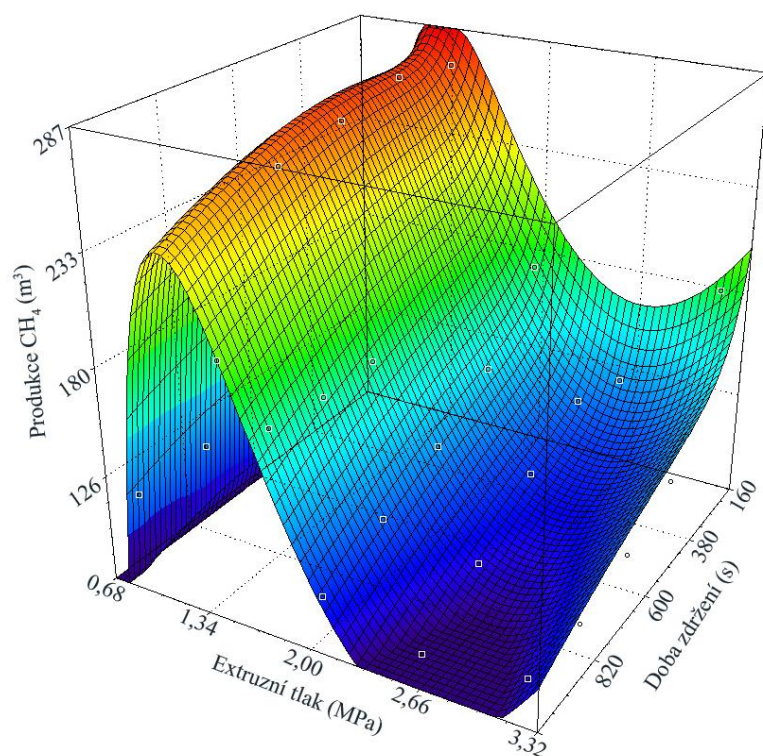
Doba zdržení (s)	Extruzní tlak (MPa)	Produkce CH ₄ (m ³ *t ⁻¹) sušiny
200	0,8	97,8
400	0,8	97,7
600	0,8	102
800	0,8	115,6
1000	0,8	114,2
200	1,4	271,5
400	1,4	277,3
600	1,4	269,8
800	1,4	263,2
1000	1,4	193,5
200	2	174,4
400	2	138,2
600	2	118,8
800	2	105,6
1000	2	93,3
200	2,6	123,2
400	2,6	133,7
600	2,6	118,4
800	2,6	98,2
1000	2,6	82,1
200	3,2	182,9
400	3,2	103,8
600	3,2	91
800	3,2	84,1
1000	3,2	88,2

Produkce CH₄ při teplotě fermentace 48°C

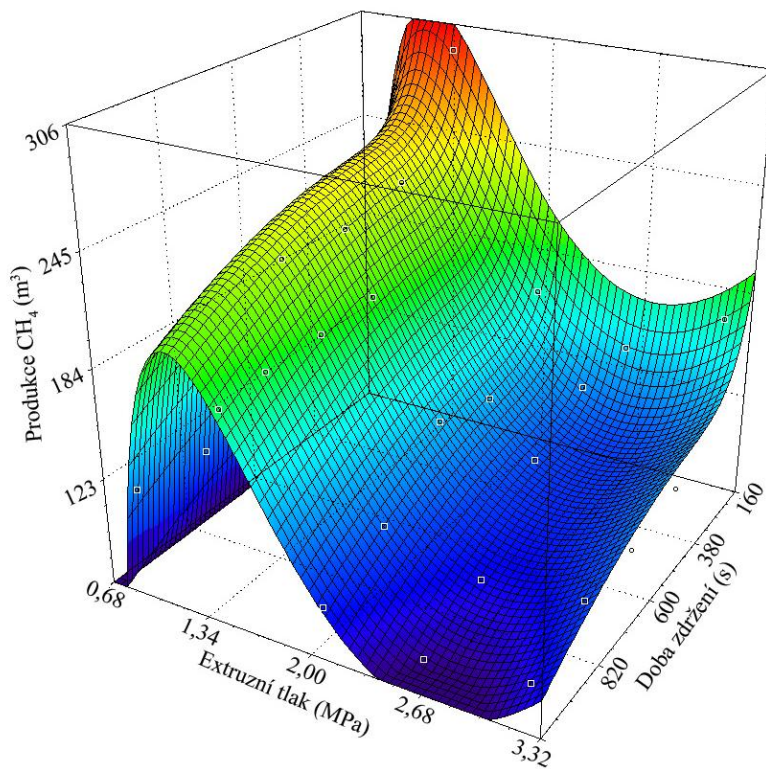
Tabulka 2: Hodnoty získané při mapování produkce CH₄ při teplotě fermentace 48°C.

Doba zdržení (s)	Extruzní tlak (MPa)	Produkce CH ₄ (m ³ *t ⁻¹) sušiny
200	0,8	134,8
400	0,8	132
600	0,8	131,8
800	0,8	108,9
1000	0,8	114,2
200	1,4	294,7
400	1,4	235,4
600	1,4	227,1
800	1,4	230,7
1000	1,4	174,5
200	2	162,9
400	2	119,6
600	2	130,9
800	2	97,6
1000	2	82,4
200	2,6	140,4
400	2,6	140,6
600	2,6	123,6
800	2,6	84,2
1000	2,6	73
200	3,2	170,9
400	3,2	94,7
600	3,2	88,2
800	3,2	91,2
1000	3,2	80,5

Graf 1: Vygenerovaný 3D graf z naměřených hodnot produkce CH_4 při teplotě fermentace 38°C .



Graf 2: Vygenerovaný 3D graf z naměřených hodnot produkce CH_4 při teplotě fermentace 48°C



Použitý polynom (produkce CH₄ při teplotě fermentace 38°C):

$$z = a + b \cdot \ln(x) + c \cdot \ln(y) + d \cdot \ln(x)^2 + f \cdot \ln(y)^2 + g \cdot \ln(x)^3 + h \cdot \ln(y)^3 + i \cdot \ln(x) \cdot \ln(y) + j \cdot \ln(x)^2 \cdot \ln(y) + k \cdot \ln(x) \cdot \ln(y)^2$$

$$a = 6.5832068943129761E+03; \quad b = -3.2561606725932015E+03;$$

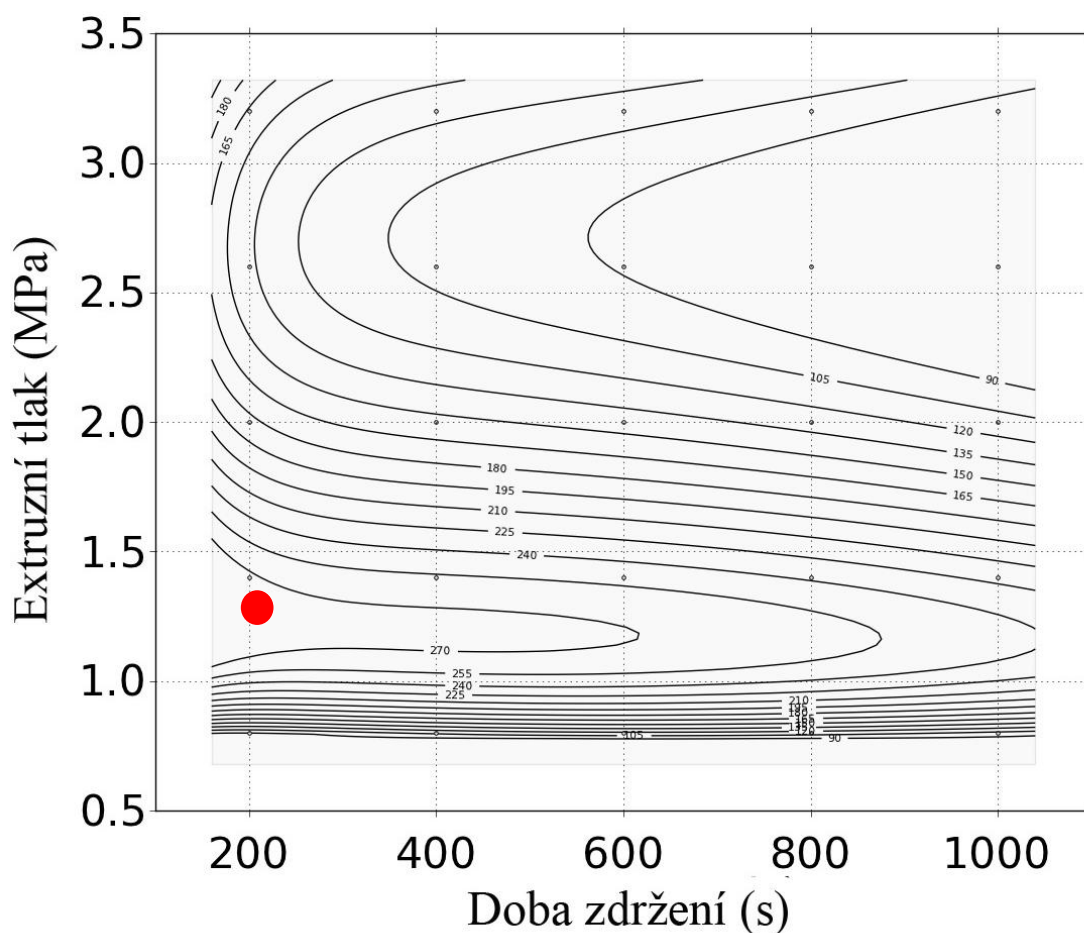
$$c = 1.5505685822556622E+03; \quad d = 5.5527088133976849E+02;$$

$$f = -1.3161821584448610E+03; \quad g = -3.1435623540794950E+01;$$

$$h = 6.2853727334581629E+02; \quad i = -3.2812026458443307E+02;$$

$$j = 2.0887705507788837E+01; \quad k = 3.4692288297203831E+01;$$

Graf 3: Vrstevnicový graf zobrazující produkci CH₄ (m³·t⁻¹ sušiny) při teplotě fermentace 38°C.



● Oblast optimálních parametrů extruze pro mezofilní teplotu fermentace 38°C.

Použitý polynom (produkce CH₄ při teplotě fermentace 48°C):

$$z = a + b \cdot \ln(x) + c \cdot \ln(y) + d \cdot \ln(x)^2 + f \cdot \ln(y)^2 + g \cdot \ln(x)^3 + h \cdot \ln(y)^3$$

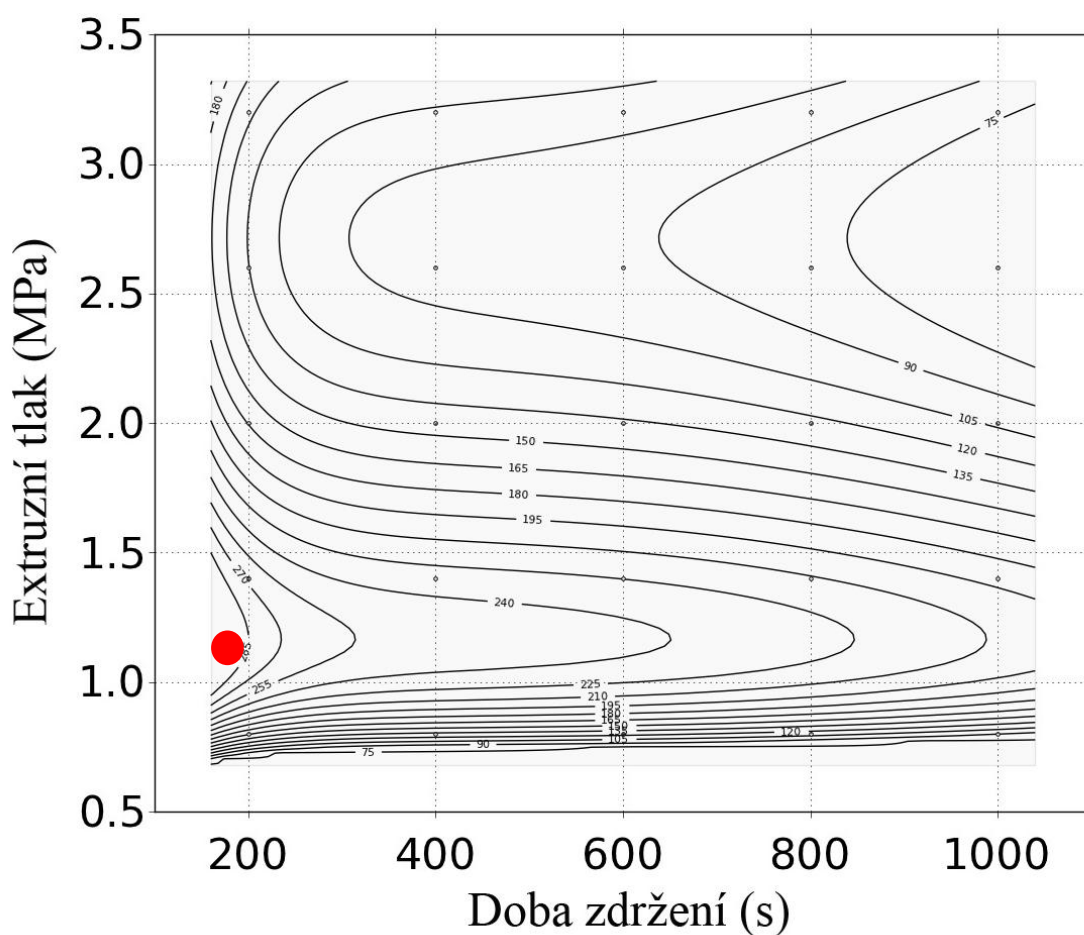
$$a = 1.2180140261990797E+04; \quad b = -5.8588640329969739E+03;$$

$$c = 2.3279544546905126E+02; \quad d = 9.5978881914037333E+02;$$

$$f = -8.6842762313999447E+02; \quad g = -5.2531621319867554E+01;$$

$$h = 5.0198178979759666E+02;$$

Graf 3: Vrstevnicový graf zobrazující produkci CH₄ (m³·t⁻¹ sušiny) při teplotě fermentace 48°C.



● Oblast optimálních parametrů extruze pro mezofilní teplotu fermentace 48°C.

5. Diskuze

Použití lignocelulózových materiálů s převažujícím obsahem krystalické celulózy pro anaerobní produkci bioplynu, se jeví jako neefektivní, vzhledem k malé biologické rozložitelnosti celulózy, jejích derivátů a také ligninu (Sánchez, Cardona, 2008). Sun a Cheng (2002) uvádějí, že zvýšení biologické rozložitelnosti fytomasy a tím i výtěžnosti metanu (CH_4) lze dosáhnout vhodnou úpravou. Shell a Hardwood (1994) publikují, že užití různých drtičů a mlýnů je v praxi velice energeticky náročné. Sun a Cheng (2002) dodávají, že použitím mechanických metod úpravy dojde k navýšení energetické náročnosti provozu až o třetinu. Samostatnou a velmi účinnou metodou dezintegrace fytomasy je tzv. extruze. Maroušek (2011) publikuje, že na rozdíl od mechanických způsobů dezintegrace, nijak výrazně nesníží průměrnou velikost částic, ale při správných parametrech způsobí hlubokou dezintegraci rostlinných vláken, ideálně až na buněčnou úroveň.

Experimentální část práce byla provedena za účelem posouzení problematiky technologického a ekonomického procesu extruze při zpracování pšeničné slámy pro výrobu bioplynu. Extruze byla prováděna na zařízení dle UV CZ 21314. Hlavním hodnotícím technologickým kritériem byla kumulativní produkce metanu (CH_4) ve čtvrtprovozní simulaci, v závislosti na extruzním tlaku, době zdržení v extrudéru a teplotě fermentace. Maximální produkce $277,3 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ (z tuny sušiny), při mezofilní teplotě fermentace ($38 \text{ }^\circ\text{C}$), bylo dosaženo při extruzním tlaku $1,4 \text{ MPa}$ a době zdržení 400 s . Maximální produkce $294,7 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ (z tuny sušiny), při teplotě fermentace $48 \text{ }^\circ\text{C}$, bylo dosaženo při tlaku $1,4 \text{ MPa}$ a době zdržení 200 s . Produkce CH_4 ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ sušiny) byla automaticky balancována na teplotu 0°C a tlak $101\,325 \text{ Pa}$.

Dle Marouška (2011) je klíčovým parametrem správného fungování procesu nalezení optimálního hydromodulu. Extrudovaná fytomasa musí být dostatečně řídká, aby mohla kontinuálně procházet přívodem do extrudéru, ale obsah vody nesmí být natolik vysoký, aby ohrožoval ekonomiku provozu. Dále dodává, že nižší sušina je příznivější z hlediska míry dezintegrace, avšak příliš vody může způsobovat problémy s udržením konstantního tlaku, díky pohybu vnitřního šneku. Při krátkém zdržení v extrudéru nedojde k patřičnému proniknutí efektu tlaku do vnitřních struktur fytomasy a proces se stává méně efektivní. Naopak zbytečná prodleva v extrudéru se negativně promítne do energetické náročnosti procesu a stejně jako

u překročení kritického tlaku hrozí zvýšení tvorby inhibitorů. U výše uvedených simulací byl hydromodul 1:7. Suspenze tak byla dostatečně řídká a čerpatelná.

Z výsledků simulací byly aproximací odhadnuty optimální parametry extruze s ohledem na provozní náklady. Pro mezofilní fermentaci, při které funguje většina zemědělských BPS, se jako zcela dostatečné a z manažerského hlediska optimální jeví tlak 1,3 MPa, doba zdržení v extrudéru 210 s. Horn et al. (2011) upravovali nadrcenou (10mm) pšeničnou slámu pomocí parní exploze, s použitím osmnácti různých kombinací parametrů. Teplota se pohybovala od 170 °C (0,8 MPa), odstupňováno po 10 °C, až po 220 °C (2,3 MPa), doba zdržení 5, 10 a 15 min, hydromodul 1:3-1:4. Studie se zabývala úpravou slámy pro produkci etanolu (C₂H₆O), kde celkový výsledek záleží především na kvalitě vstupních surovin a dostupnosti sacharidů. Jako hodnotící kritérium byl určen největší výnos glukózy. Ten činil až 90% teoretického maxima (při teplotě 210 °C). Pro účely produkce bioplynu je dostačující teplota 190°C (1,3 MPa), protože s vyšší teplotou (a tlakem) a delší dobou zdržení (>300 s) se dramaticky zvyšuje množství inhibitorů (zejména furfural a hydroxymethylfurfural).

Mosier (2005) ve své studii uvádí, že výsledky úpravy biomasy musí být v rovnováze s následnými kroky dalšího zpracování a kompromisem mezi provozními a investičními náklady a náklady na biomasu. Maroušek (2010) dodává, že metoda dezintegrace musí být z principu velmi efektivní, protože z ekonomické podstaty věci představuje vždy dodatečné náklady. Užitá metoda musí být nejen investičně a provozně nenáročná, ale nesmí způsobovat znehodnocení suroviny. Tyto požadavky modifikovaný extrudér dle UV CZ 21314 jednoznačně splňuje. Pokud budeme uvažovat o stavbě BPS s modifikovaným extrudérem, bude extrudér představovat dodatečné investice do technologie. Při stejném výkonu kogenerační jednotky se ovšem sníží objem fermentorů a skladu digestátu a s tím spojené náklady, dále klesnou náklady na vstupní surovinu, míchání substrátu ve fermentoru, a další. Pomocí spalínového výměníku tepla u kogenerační jednotky (KGJ) je získána potřebná tepelná energie pro technologii extruze. Hendriks a Zeeman (2009) publikují, že rozmělněním fytomasy lze dosáhnout zvýšení účinnosti hydrolýzy o 5 až 25%, s předpokládaným snížením doby zdržení ve fermentoru o 23 až 59 %.

Pokud bychom diskutovali o aplikaci modifikovaného extrudéru na BPS Týnec (podnik AGROFARMA TÝNEC s. r. o., viz. Příloha 4 a 5) přicházejí v úvahu 2 varianty. Doplnění stávající technologie o technologii extruze, což by pro dosažení maximálního zisku znamenalo výměnu stávající KGJ za výkonnější. Problém by mohl nastat, pokud provozovatel distribuční a přenosové soustavy neumožní podniku větší dodávky elektřiny. Pokud budeme uvažovat o novostavbě BPS s modifikovaným extrudérem, je třeba upravit ekonomickou bilanci investice.

Tabulka 3: Ekonomická bilance novostavby. Ceny BPS s extrudérem byly úměrně sníženy dle dostupných informací.

	Stávající BPS (tis. Kč)	BPS s extrudérem (tis. Kč)
Fermentory	16400	12200
Sklad digestátu	9400	6900
Kogenerační jednotka	19700	19700
Potrubní a čerpací síť	2100	2100
Řídicí systém a technická místnost	4000	4000
Extrudér	0	18000
Bezpečnostní hořák	1300	1300
Krmící vůz	4000	0
Skladovací prostor včetně komunikace	21500	16500
Směšovací jímka		2500
Trafostanice	4800	4800
Výkopové a další práce	8400	6000
Projekt a další náklady	2400	2400
Náklady celkem	94000	96400
Dotace	26600	26600
Vlastní investice	67400	69800

Zdroj: AGROFARMA TÝNEC s. r. o., 2012

Pokud budeme uvažovat použití technologie BPS s extrudérem, při zachování stejného výkonu KGJ, vlastní investice se zvýší o 3,5 %. Úsporu představuje zejména realizace menších fermentorů a skladu digestátu až o 30 % vzhledem

ke stávající technologii. S tím souvisejí i výkopové práce a terénní úpravy. Dále se sníží potřeba plochy pro skladování vstupního substrátu (dosavadní technologie je založena na silážování kukuřice a cukrovarnických řízků do vaků). Slámu lisovanou do velkých balíků lze dobře vršit a tím šetřit místo. Alternativou je skladování balíků na poli a postupné navážení ke zpracování. Pokud bychom produkci bioplynu komponovali pouze na fermentaci slámy, odpadá potřeba krmícího vozu. V případě kombinace několika vstupních substrátů lze taktéž využít extrudéru k úpravě substrátu. Nejprve je třeba provést sérii simulací a nalézt optimální parametry pro jednotlivé substráty, jako tomu bylo v případě pšeničné slámy. Po zjištění vhodného poměru substrátů a jednotlivých parametrů extruze, dochází k homogenizaci extrudátů ve směšovací jímce, ze které je tato směs čerpána do fermentoru. Pořizovací náklady modifikovaného extrudéru představují cca 18000 tis. Kč (Biomass Technology a.s., Hulín, ČR).

Provozní náklady se také značně liší, zejména u vstupních substrátů (Tabulka 4). Cena vstupních substrátů vychází z vnitropodnikové kalkulace (Příloha 4 a 5), taktéž ostatní provozní náklady. Pro variantu BPS s extrudérem bude kalkulováno pouze s pšeničnou slámou, jako jediným vstupním substrátem. Z výše uvedených poznatků je počítáno s produkce 270 m³ CH₄ z tuny sušiny (85 % objemových). Obsah CH₄ v bioplynu je 58 %. Roční spotřeba stávající BPS je 3756 tis. m³ bioplynu s obsahem 51,5 % CH₄. To představuje roční potřebu cca 1940 tis. m³ CH₄. Z těchto údajů vyplývá roční potřeba pšeničné slámy v množství cca 8500 t. Při vysokém výnosu slámy z hektaru (6 t), který je pro oblast diskutovaného podniku typický, je potřeba cca 1400 ha plochy pšenice. Náklady na tunu slámy se různí. Skládá se z ceny manipulace a dopravy a také z cen obsažených živin (N, P, K, ceněná organická hmota). Pro tento účel je stanovena průměrná cena 750 Kč*t⁻¹ slámy. Servisní a materiálové náklady byly sníženy z důvodu celkového zmenšení areálu BPS, méně pohyblivých a opotřebitelných dílů. Servisní smlouva se týká KGJ, jedná se o paušální platbu, z které jsou hrazeny případné poruchy a plánované údržby.

Příjmy jsou tvořeny prodejem elektřiny (Tabulka 5), podnik využívá zelených bonusů a prodeje silové elektřiny. Potřeba elektrické energie na provoz extrudéru je kompenzována vyšší náročností stávající BPS kvůli energeticky náročnějšímu

dávkování, míchání a přečerpávání substrátu. Ovšem na provoz extrudéru lze uplatnit zelený bonus. Pro tuto kalkulaci je to ovšem zanedbatelná položka.

Tabulka 4: Provozní náklady (vychází z dat Přílohy 5).

Náklady	Stávající BPS (tis. Kč)	BPS s extrudérem (tis. Kč)
Materiál (filtry, provozní kapaliny, maziva, aj.)	650	600
Servisní náklady včetně servisní smlouvy	2000	1900
Substráty	9400	6375
Mzdy, pojištění, odpisy režie	4250	4250
Celkem	16300	13125

Tabulka 5: Příjmy a ekonomická bilance (vychází z dat Přílohy 5).

Příjmy	Stávající BPS (tis. Kč)	BPS s extrudérem (tis. Kč)
Tržby z prodeje elektřiny	30162	30162
Náklady celkem	16300	13125
Zisk	13860	17037

Jako hlavní srovnávací kritérium byl zvolen diskontující finanční ukazatel čisté současné hodnoty investice (NPV). NPV představuje rozdíl mezi aktualizovanou (nebo současnou) hodnotou peněžních příjmů z investice a aktualizovanou hodnotou kapitálových výdajů na investice. Pro výpočet NPV je použita úroková míra 5 %, doba životnosti 15 let, předpokládané Cash Flow (CF) je kalkulováno bez velkých nákladů na opravy. Asi po 15 letech provozu dosáhne většina hlavních komponent BPS konce životnosti a je nutno počítat s vyššími náklady na opravy, výměny a údržbu.

Tabulka 6: NPV pro stávající BPS a novostavbu BPS s extrudérem.

Rok	Odúročitel	Současná hodnota Cash flow Stávající BPS (Kč)	Současná hodnota Cash flow BPS s extrudérem (Kč)
1	1,050	13201905	16225714
2	1,103	12567543	15446056
3	1,158	11970639	14712435
4	1,216	11399671	14010691
5	1,276	10863636	13351881
6	1,340	10344776	12714179
7	1,407	9852168	12108742
8	1,477	9385240	11534868
9	1,551	8937460	10984526
10	1,629	8509515	10458564
11	1,710	8106433	9963158
12	1,796	7718263	9486080
13	1,886	7349947	9033404
14	1,980	7001010	8604545
15	2,079	6667629	8194805
Σ		143876 tis. Kč	176829 tis. Kč
Vlastní investice		67400 tis. Kč	69800 tis. Kč
NPV		76476 tis. Kč	107029 tis. Kč

6. Závěr

Z výše definovaných simulací byly složeným logaritmickým polynomem třetího řádu aproximovány optimální parametry extruze pšeničné slámy pro maximální produkce metanu (CH_4). Pro mezofilní anaerobní fermentaci ($38\text{ }^\circ\text{C}$), při které funguje většina zemědělských BPS, se jako zcela dostatečný jeví tlak $1,3\text{ MPa}$, doba zdržení v extrudéru 210 s a hydromodul $1:7$. Tyto extruzní parametry respektují biochemické projevy, technologická omezení, legislativu, finanční ukazatele, logistiku a další manažerské faktory s přihlédnutím na ekologické dopady. Při těchto extruzních parametrech je aproximací odhadován výnos 270 a více $\text{m}^3\text{ CH}_4$ (z tuny sušiny). Pro teplotu fermentace $48\text{ }^\circ\text{C}$ byl aproximován optimální tlak $1,25\text{ MPa}$ a doba zdržení 180 s .

Experimentálně bylo dokázáno, že vhodně zvolené parametry extruze zlepšují přístupnost celulózových vláken pro enzymatickou hydrolýzu a následnou produkci bioplynu. Doba zdržení substrátu ve fermentoru se sníží až o 30% . Zavedení technologie vysokotlakého extrudéru dle UV CZ 21314 je možné nejen k novostavbě, ale i ke stávající BPS. U novostavby lze kalkulovat se sníženými investičními náklady na fermentory, sklady digestátu, výkopové práce a další. Při aplikaci extrudéru k stávající BPS je vhodné řešit zvýšení výkonu KGJ. V případě modelové BPS Týnec se zavedením extrudéru zvýšily investiční náklady o $3,5\%$, ovšem roční provozní náklady klesly o $19,5\%$. Jako hlavní srovnávací kritérium byl zvolen diskontující finanční ukazatel NPV, přičemž výpočet celistvě zohlednil veškeré manažerské, legislativní i technologické limity analyzovaných biologických projevů. U BPS s extrudérem došlo k nárůstu NPV o 40% oproti stávající technologii. Z těchto zjištění vyplývá, že extruze pšeničné slámy je zajímavou, nekonvenční a rentabilní technologií pro produkci bioplynu.

7. Použitá literatura

ALVIRA, P., Tomas-Pejo, E., Ballesteros, M., Negro, M.J.: Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology* 101, 2010, str. 4851-4861.

CELJAK, Ivo: Biomasa je nezbytná součást lidského života. *Biom.cz* [online]. 2008-12-22 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-je-nezbytna-soucast-lidskeho-zivota>>. ISSN: 1801-2655

DALE, Bruce E., BALAN, Vankatesh. Process for producing sugars from cellulosic biomass : Patent application title [online]. [2008] [cit. 2012-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.faqs.org/patents/app/20090011474>>.

DELONG, E. A., et al. *Method of molding lignocellulosic material and product so produced*. Patent number: 4751034. Uděleno 14.6.1988. Zapsáno 13.3.1987. Dostupné z WWW: <http://www.google.com/patents?id=Xi8yAAAAEBAJ&pg=PA2&dq=1,096,374&hl=en&sa=X&ei=BFBaT-72LYj64QSTnc20Dw&ved=0CDoQ6AEwAg#v=onepage&q=1%2C096%2C374&f=false>

DOHÁNYOS, M.: Zvyšování efektivity fermentace - nejnovější poznatky ve výzkumu a praxi. *Biom.cz* [online]. 2009-02-25 [cit. 2011-12-22]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zvysovani-efektivita-fermentace-nejnovejsi-poznatky-ve-vyzkumu-a-praxi>>. ISSN: 1801-2655.

EVANS, John R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia* [online]. 1989, 78, [cit. 2011-12-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/j7780882340u67p4/>>.

HAMELINCK, C.N., VAN HOOIJDONK, G., FAALJ, A.P.C. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy* 28, 2005, str. 384-410.

HAN, G., et al. Effect of steam explosion treatment on characteristics of wheat straw. *Industrial Crops and Products*. 2010, roč. 31, č. 1, 28-33.

HOLTZAPPLE, Mark, T., et al., Calcium hydroxide pretreatment of biomass, Patent number: 5693296, Filingdate: Sep 6, 1994, Issue date: Dec 2, 1997. [cit. 2012-01-18]. Dostupný z WWW: <http://www.google.com/patents?id=RdwlAAAAEBAJ&printsec=abstract&zoom=4#v=onepage&q&f=false>

HORN, S., J., et al. *Screening of steam explosion conditions for glucose production from non-impregnated wheat straw*. Biomass and bioenergy. 2011, roč. 35, 4879-488.6

HUBER, George W., DALE, Bruce E. Grassoline at the Pump. Scientific American. 2009, vol. 16, is. 6, s. 52-59.[cit. 2012-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.chems.msu.edu/system/files/content/Grassoline-at-the-Pump.pdf>>

CHANDRA, R., et al. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, roč. 16, č. 3, 1462–1476.

JAKUBES, J., et al. *Moderní využití biomasy: Technologické a logistické možnosti*. Praha: ČEA, 2006.

KIM, J., YUN, S. Discovery of cellulose as a smart material. *Macromolecules*. 2006, 39: 4202–4206 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma060261e>

KOUDELA, Vladimír, SCHEJBALOVÁ, Barbara. *Ekonomická efektivnost investic*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000. 86 s. ISBN 80-7078-825-9

KRÁTKÝ, Lukáš. Zařízení pro předúpravu surovin při výrobě biopaliv. In: *Procesní technika 2010: Sborník konference, 9. června 2010, Praha = conference proceedings, June 9th, 2010, Prague* [online]. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2010 [cit. 2012-04-15]. ISBN 978-80-01-04580-0. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt2010/docs/sbornik7.pdf>

KUMAR, P., et al. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial* [online]. 2009-04-15, roč.

48, č. 8, s. 3713-3729 [cit. 2012-04-15]. ISSN 0888-5885. DOI: 10.1021/ie801542g.
Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie801542g>

LAMBERS, H., CHAPIN, F. S., PONS T. L. *Plant physiological ecology* [online].
2nd ed. New York: Springer, 2008, 604 s. [cit. 2012-04-02]. ISBN 9780387783406.
Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/978-0-387-78340-6/#section=140605&page=1>

LAUREANO-PERRÉZ, L., et al. *Understanding factors that limit enzymatic hydrolysis of biomass*. Appl. Biochem. Biotechnol. 2005, 121, 1081–1099.

LEE, J. *Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol*. Journal of Biotechnology 56, 1997, str. 1–24.

MAROUŠEK, J. *Produkci bioplynu lze zvýšit dezintegrací vstupní fytomasy*. Energie 21, 2011, 1

MAROUŠEK, J. *Projektování modifikovatelných extrudérů k bioplynovým stanicím*. Konstrukce, 2011 [cit. 2012-1-14]. Dostupný z WWW: <http://www.konstrukce.cz/clanek/projektovani-modifikovatelnych-extruderu-k-bioplynovym-stanicim/>

MAROUŠEK, J. *SOUČASNOST A VÝHLED PROBLEMATIKY ZEMĚDĚLSKÝCH BIOPLYNOVÝCH STANIC V ČESKÉ REPUBLICE: Posílení spolupráce mezi MZLU v Brně a dalšími institucemi v terciárním vzdělávání a výzkumu (CZ 1.07/2.4.00/12.0045)*. ZD Opařany, 2010, 16 s. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty/files/6/6-bioplynky_marousek.pdf

MAROUŠEK, J. *Srovnání hydrolyzy vybraných druhů fytomasy*. Dizertační práce, České Budějovice. ZF-JCU, 2009, 98 s

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

MERVART, V., *Extruze krmiv*. [online]. 2005 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.farmet.cz/news/Extruze_krmiv.pdf

MONIRUZZAMAN, Mohammed. *Effect of steam explosion on the physicochemical properties and enzymatic saccharification of rice straw*. Applied Biochemistry and

Biotechnology [online]. 1996, **58**(3) [cit. 2012-01-27]. DOI: 10.1007/BF02783570.
Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/4041m8rx0588784w/>

MURRAY, Robert K., et al. *Harperova Biochemie: a LANGE medical book*. 23. vyd., V ČR 3. vyd., V nakl. H. Jinočany, 1998, 872 s. ISBN 80-857-8738-5.

NWT a.s. *Biotechnologie: Obnovitelné zdroje energie*. ČR, 2010 [cit. 2012-02-22].
Dostupné z WWW: <http://www.nwt.cz/lang_cs/clanek/4/49/21.html>.

OCHODEK, T., J. KOLONIČNÝ, M. BRANC a P. JANÁSEK. *Ekonomika při energetickém využívání biomasy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008.

PHARMIX s.r.o. In: *Vybudování vývojového inovačního centra hydrolyzy biomasy* [online]. 2010 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <http://www.pharmix.cz/vive/>

RUIZ, E., et al. *Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks*. *Enzyme and Microbial Technology*. 2008, vol. 42, is. 2, s. 160-166.

SAHA, Badal C. *Hemicellulose bioconversion*. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* [online]. 2003, 30, 5, [cit. 2011-12-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/w34ajdcby9be1uuf/>>.

SÁNCHEZ, Ó.J., CARDONA, C.A. *Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks*. *Bioresour. Technol.*, 99, 2008, str. 5270–5295

SCHELL, D. J., HARDWOOD, CH., *Milling of lignocellulosic biomass*. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 45/46, 1994, str. 159–168, DOI: 10.1007/BF02941795

Směrnice EU. In *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/28/ES* [online]. Štrasburk, EU, 23. 4. 2009 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:cs:PDF>>.

STOKLASA, K. *MAKROMOLEKULÁRNÍ CHEMIE I*. UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, 2005.

STRAKA, František, et al. *Bioplyn*. Příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů. 2. rozš. Vyd., Praha, GAS s.r.o., 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.

SUN, Y., CHENG, J. *Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review*. *Bioresource Technology* 83, 2002, str. 1–11.

TAHERZADEH, J. M., KARIMI, K., Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production. *International Journal of Molecular Sciences*, 2008, 9, s. 1621-1651.

The Nobel Prize in Chemistry 1961: Melvin Calvin. In: *Nobelprize.org* [online]. Stockholm, 1961 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1961/calvin-bio.html

TRÁVNÍČEK, S. a J. SZOMOLÁNYIOVÁ. *Investování a strategie hospodárného užití energie*-část I. Příručka: Jak postupovat při přípravě projektů v energetice. Praha: Česká energetická agentura, 1997.

VANHOLME, R., et al. Lignin Biosynthesis and Structure. *Plant physiology*. 2010, roč. 153, č. 3, s. 895-905. ISSN 0032-0889. Dostupné z: <http://www.plantphysiol.org/content/153/3/895.full.pdf+html>

VALACH, J. et al. *Investiční rozhodování a dlouhodobé financování*. Třetí, přepracované a rozšířené vydání. Praha: Ekopress, s.r.o., 2010. ISBN 978-80-86929-71-2

VERNER, D. *Nakládání s digestátem zemědělských bioplynových stanic*. Bakalářská práce, České Budějovice. ZF-JCU, 2010

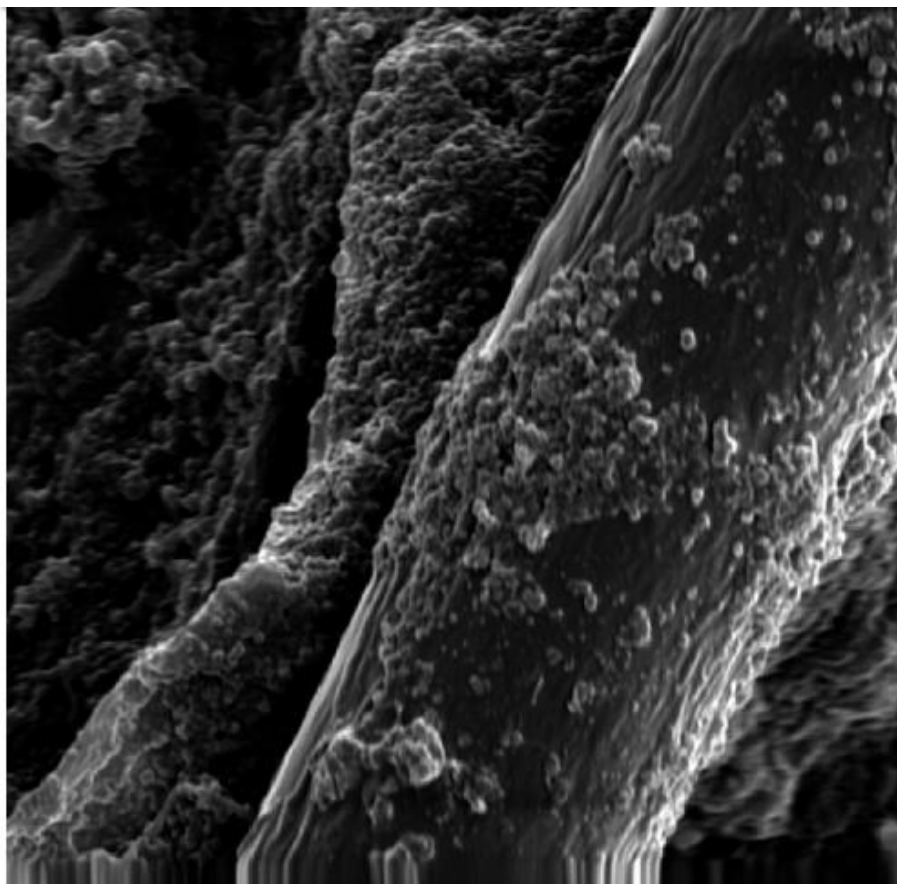
WEGER, J. Biomasa jako zdroj energie. *Biom.cz* [online]. 2009-02-02 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-jako-zdroj-energie>>. ISSN: 1801-2655.

ZHANG, Luan-hui, et al. Effect of steam explosion on biodegradation of lignin in wheat straw. *Bioresource Technology*. 2008, roč. 99, č. 17, 8512–8515.

ZHENG, Y., PAN, Z., ZHANG, R. *Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production*. *Int J Agric & Biol Eng*, 2009; 2(3): str. 51 – 68.

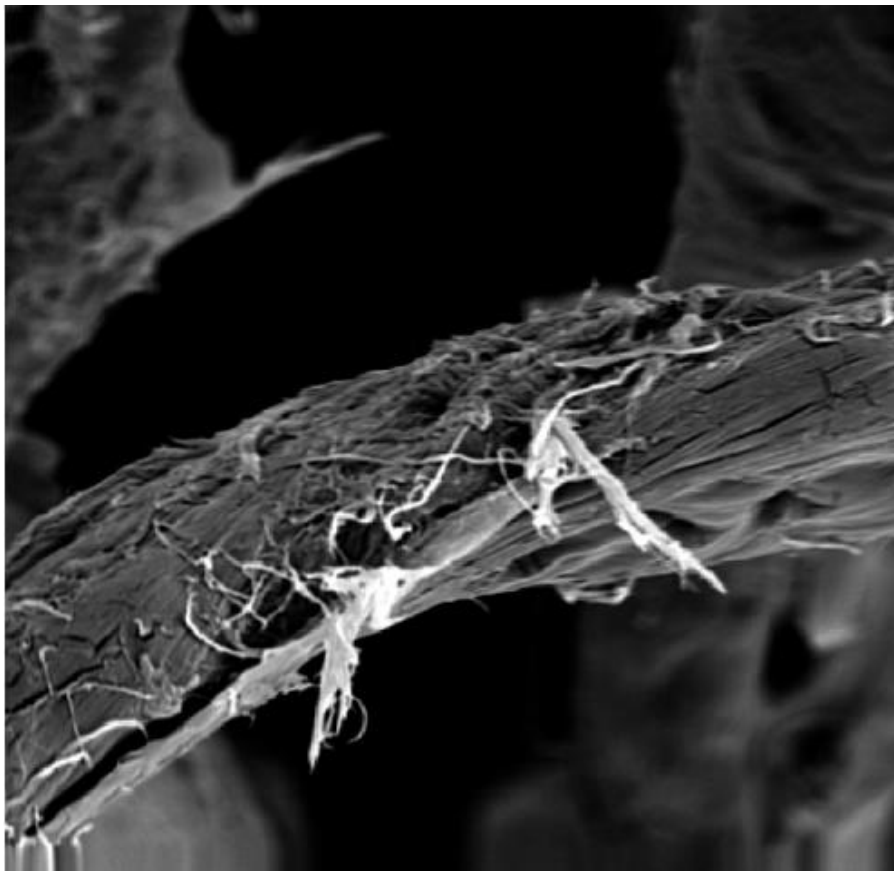
8. Přílohy

Příloha 1: Rostlinná hmota v surovém stavu.



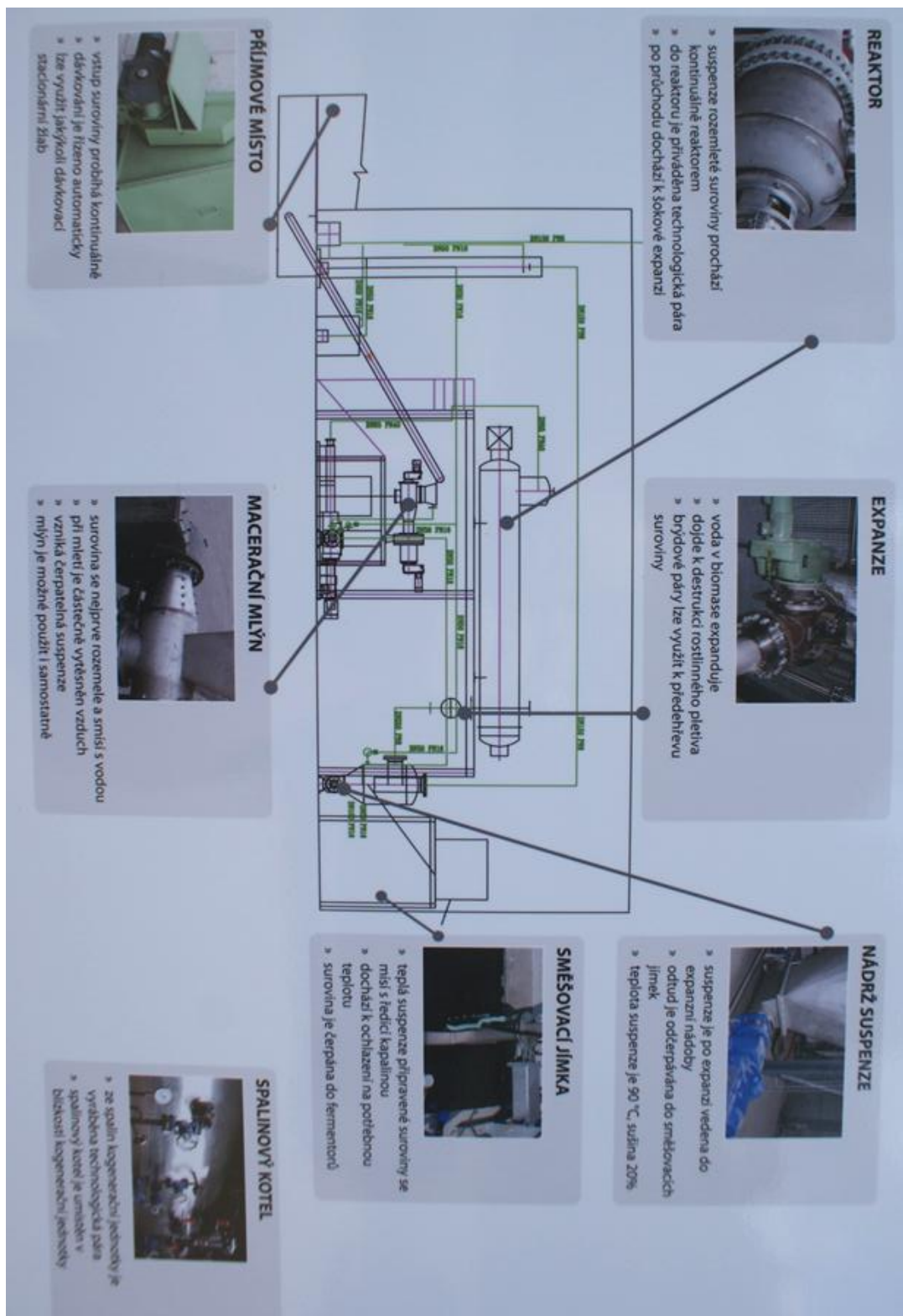
Zdroj: Maroušek (2011)

Příloha 2: Rostlinná hmota po extruzi.



Zdroj: Maroušek (2011)

Příloha 3.: Schéma principu termotlaké přípravy fytomasy (BPS Pěčín)



Zdroj: autor

Příloha 4: Popis a hodnocení modelových bioplynových stanic.

Jako modelové byly vybrány spřízněné BPS Žabovřesky (ZS DUBNÉ a. s.) a BPS Týnec (AGROFARMA TÝNEC s. r. o.).

BPS Žabovřesky je v provozu od začátku roku 2010. Pro účely DP byla poskytnuta provozní data za rok 2011. Areál BPS vznikl na zelené louce vedle stájí skotu. Je tvořen dvěma primárními fermentory (P1, P2), dofermentorem a dvěma sklady digestátu, vše zastřeženo plachtovými střechami s plynojemy. Substráty jsou dávkovány pomocí dvou stacionárních krmných vozů. Do P1 přichází kukuřičná siláž a kejda skotu, do P2 potom hnůj a senáž. Obsahy fermentorů jsou vzájemně částečně přečerpávány a přepadem nebo čerpadlem přepouštěny do dofermentoru v určitém poměru, který je nastaven dle provozních poznatků, analýz laboratoře atd.

Bioplyn je spalován v kogenerační jednotce. Vzniklé teplo se používá na temperování fermentorů, ohřev užitkové vody ve stájích, vytápění dílen, kanceláří a dalších přilehlých objektů. Využití tepla je kalkulováno do příjmů BPS, protože podniku odpadly náklady na zemní plyn a elektřinu. Podnik využívá zelených bonusů, protože taktéž využívá část vyrobené elektřiny pro vlastní spotřeby areálu. Silovou elektřinu prodávají smluvně za 1240 Kč/kWh. Další údaje popisuje příloha 5.

BPS Týnec byla uvedena do provozu v březnu 2011 a pro DP byla poskytnuta data za 12 měsíců plného provozu. Je tvořena primárním fermentorem, dofermentorem a skladem digestátu, vše zastřeženo plachtovými střechami s plynojemy. Kukuřičná siláž z vlastních zdrojů a cukrovarnické řízky z nedalekého cukrovaru jsou dávkovány stacionárním krmným vozem v poměru cca 1:3. Bioplyn je spalován v kogenerační jednotce. Tepla je využito pro ohřev fermentorů a vytápění areálu. V letních měsících je teplo nevyužito. V horizontu několika let se uvažuje o sušárně obilnin a řepky. Podnik taktéž využívá zelených bonusů a smluvně prodává silovou elektřinu za 1250 Kč/kWh.

Příloha 5: Provozní a ekonomická bilance vybraných BPS.

Sledované ukazatele za rok 2011		BPS Týnec	BPS Žabovřesky
instalovaný výkon KGJ	kW	889	998
elektrická účinnost	%	41,7	40,6
vytížení instalovaného výkonu	%	97,7	93,9
roční výroba el. energie	MWh	7608,5	8207,4
vlastní spotřeba BPS	%	7	7,4
transformační ztráty	%	1,5	0,8
vlastní spotřeba areálu mimo BPS	MWh	28,5	506,36
prodej silové elektřiny do sítě	MWh	6961,8	6728,036
zelený bonus (3070 Kč/MWh)	MWh	6990,3	7234,4
roční produkce bioplynu	m ³	3756000	4336200
obsah CH ₄	%	51,5	50,5
objem fermentoru	m ³	2x2500	2x2300, 1x 2900
koncový sklad digestu	m ³	6000	2x 3400
roční potřeba vstupních surovin			
kukuřičná siláž	t	14000	11000
cukrovarnické řízky	t	4000	0
senáž	t	0	2000
chlévká mrva	t	0	2000
kejda skotu	m ³	0	12000
vnitropodniková cena kukuřice	Kč/t	600	700
vnitropodniková cena cukr. řízků	Kč/t	250	0
vnitropodniková cena chlévké mrvy	Kč/t	0	150
vnitropodniková cena senáže	Kč/t	0	550
vnitropodniková cena kejdy skotu	Kč/m ³	0	80
celkové investiční náklady mil.	tis. Kč	94000	108600
dotace	tis. Kč	26600	28600
investice vlastní	tis. Kč	67400	80000
délka úvěru	roky	10	11,5
úrok	%	5	5
tržby celkem	tis. Kč	30162	35462
náklady celkem	tis. Kč	16300	19557
zisk	tis. Kč	13862	15905
NPV	tis. Kč	76476	85085

Zdroj: AGROFARMA TÝNEC s. r. o., ZS DUBNÉ a. s., 2012