

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra technologických zařízení staveb**



**Bakalářská práce**

**Zhodnocení současných metod energetického  
využití tuhých biopaliv s ohledem na životní  
prostředí**

**Evaluation of current methods of energy use of solid  
biofuels with regard to the environment**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.**

**Autor práce: Marek Dědina**

**© Praha 2012**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra technologických zařízení staveb

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Dědina Marek

Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

**Zhodnocení současných metod energetického využití tuhých biopaliv s ohledem na životní prostředí**

Anglický název

**Evaluation of current methods of energy use of solid biofuels with regard to the environment**

### Cíle práce

Seznámit se s problematikou technologie a techniky energetického využití tuhých biopaliv a zhodnotit jejich vliv na životní prostředí.

### Metodika

Na základě literárního rozboru technologie a techniky energetického využití tuhých biopaliv provést zhodnocení jednotlivých metod s ohledem na životní prostředí.

### Osnova práce

1. Úvod
2. Charakteristika tuhých biopaliv
3. Metody energetického využití tuhých biopaliv
4. Technologie a technika energetického využití tuhých biopaliv
5. Zhodnocení jednotlivých metod energetického využití tuhých biopaliv
6. Diskuse a závěry

### Rozsah textové části

50

### Klíčová slova

tuhá biopaliva, spalovací zařízení, tepelně-emisní vlastnosti paliv

### Doporučené zdroje informací

ČSN 14961-1: Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky. ÚNMZ, červen 2010, str. 54

Malaták, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3

Malaták, J.; Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 206 s., ISBN: 978-80-213-1810-6

Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s.

Pastorek Z., Kára J., Jevič P., 2004, Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha, 284 str., ISBN 80-86534-06-5

Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009 (OR. en)

### Vedoucí práce

Malaták Jan, doc. Ing., Ph.D.

### Termín zadání

listopad 2010

### Termín odevzdání

duben 2012



  
doc. Ing. Miroslav Příkryl, CSc.

Vedoucí katedry

  
prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 31.8.2011

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Zhodnocení současných metod energetického využití tuhých biopaliv s ohledem na životní prostředí" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 26.4.2012

---

Marek Dědina

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Malaťákovi, Ph.D. za spolupráci, za jeho podporu, odborné rady a věcné připomínky, které mi poskytl během zpracování mé bakalářské práce.

**Abstrakt:** Cílem této bakalářské práce bylo zhodnocení současných metod energetického využití tuhých biopaliv s ohledem na životní prostředí. V kapitole „Charakteristika tuhých biopaliv“ je nastíněno rozdělení biomasy na energetickou a odpadní biomasu a obecný dopad energetické biomasy na životní prostředí. Dále tato kapitola obsahuje samotné rozdělení tuhých biopaliv. V kapitole „Metody energetického využití tuhých biopaliv“ je výčet možných metod energetického využití biopaliv s následným zaměřením na termochemické metody. Kapitola „Technologie a technika energetického využití tuhých biopaliv“ obsahuje popis technologie a techniky termochemických metod spalování, zplyňování a pyrolýzy. V kapitole „Zhodnocení současných metod energetického využití tuhých biopaliv“ je nejprve obecné porovnání termochemických metod, následuje zhodnocení těchto metod z hlediska životního prostředí a výhřevnosti. Práce je ukončena diskuzí o dané problematice.

**Klíčová slova:** tuhá biopaliva, spalovací zařízení, tepelně-emisní vlastnosti paliv

### **Evaluation of current methods of energy use of solid biofuels with regard to the environment**

**Summary:** The object of this work was to evaluate current methods of energy usage of solid biofuels with respect to the environment. In the chapter "Characteristics of solid biofuels" is outlined on the division of biomass on energy and waste biomass and overall impact of energy biomass on the environment. In addition, this chapter contains division of solid biofuels. In the chapter "Methods of energy use of solid biofuels" is a list of possible methods of energy usage of biofuels with a subsequent focus on thermochemical methods. The chapter "Technology and equipment for energy use of solid biofuels" describes the technology and techniques of thermochemical methods of combustion, gasification and pyrolysis. In the chapter "Evaluation of current methods of energy use of solid biofuels" is at first a general comparison of thermochemical methods, followed by evaluation of these methods in terms of environmental and calorific values. The work is ended by discussions on that subject.

**Key words:** solid biofuels, combustion equipment, thermal emission properties of fuels

# Obsah

<i>Úvod</i> .....	<i>1</i>
<b>1 Charakteristika tuhých biopaliv</b> .....	<b>4</b>
<b>1.1 Definice biomasy</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2 Tuhá biopaliva</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 Energetická biomasa</b> .....	<b>5</b>
1.3.1 Ekologický význam energetické biomasy .....	6
<b>1.4 Odpadní biomasa</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Metody energetického využití tuhých biopaliv</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Spalování</b> .....	<b>9</b>
2.1.1 Charakteristika spalování.....	9
2.1.2 Procesy probíhající při spalování biomasy .....	10
2.1.3 Ekologie spalování .....	13
<b>2.2 Zplyňování</b> .....	<b>14</b>
2.2.1 Procesy při zplyňování .....	15
2.2.2 Možnosti čištění vzniklého plynu .....	17
<b>2.3 Pyrolýza</b> .....	<b>18</b>
<b>3 Technologie a technika energetického využití tuhých biopaliv</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1 Technologie spalování</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2 Spalovací zařízení</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3 Technologie a technika zplyňování</b> .....	<b>28</b>
3.3.1 Reakce probíhající ve zplyňovacích generátorech.....	28
3.3.2 Zplyňovací generátory biomasy .....	31
<b>3.4 Pyrolýzní technologie</b> .....	<b>36</b>
3.4.1 Pyrolýzní produkty .....	37
3.4.2 Jednotlivé pyrolýzní technologie .....	40
<b>4 Zhodnocení jednotlivých metod energetického využití tuhých biopaliv</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1 Porovnání základních termochemických metod</b> .....	<b>46</b>

4.2	Z hlediska životního prostředí .....	47
4.3	Z hlediska výhřevnosti.....	47
5	Závěr .....	49
6	Seznam literatury .....	51
7	Seznam obrázků a tabulek .....	57



## Úvod

Neustálý nárůst počtu obyvatel této planety a stále se rozvíjející lidská společnost vyžadují pro svou činnost stále větší množství energie. To je způsobeno zvyšující se průmyslovou výrobou, životní úrovní nejen ve vyspělých zemích, ale i v rozvojových zemích, které se snaží vyrovnat vyspělým společnostem.

V současné době je stále většina energie vyráběna z fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn), některé vyspělé státy si začínají uvědomovat fakt, že zásoby fosilních paliv nejsou nevyčerpatelné, navíc velmi zatěžují životní prostředí. Odhaduje se, že jejich zásoby by mohly ještě pokrýt energetické potřeby lidstva v následujících 200 letech. Vzhledem k hroící energetické krizi, související s vyčerpáním těchto zdrojů, je pozornost stále častěji upírána k obnovitelným zdrojům energie.

Mluvíme-li o obnovitelných zdrojích energie, máme především na mysli využívání přírodních energetických zdrojů k výrobě elektrické a tepelné energie. Jedná se o zdroje, které jsou v podstatě nevyčerpatelné a stále se obnovující, jako je slunce, voda, vítr a biomasa.

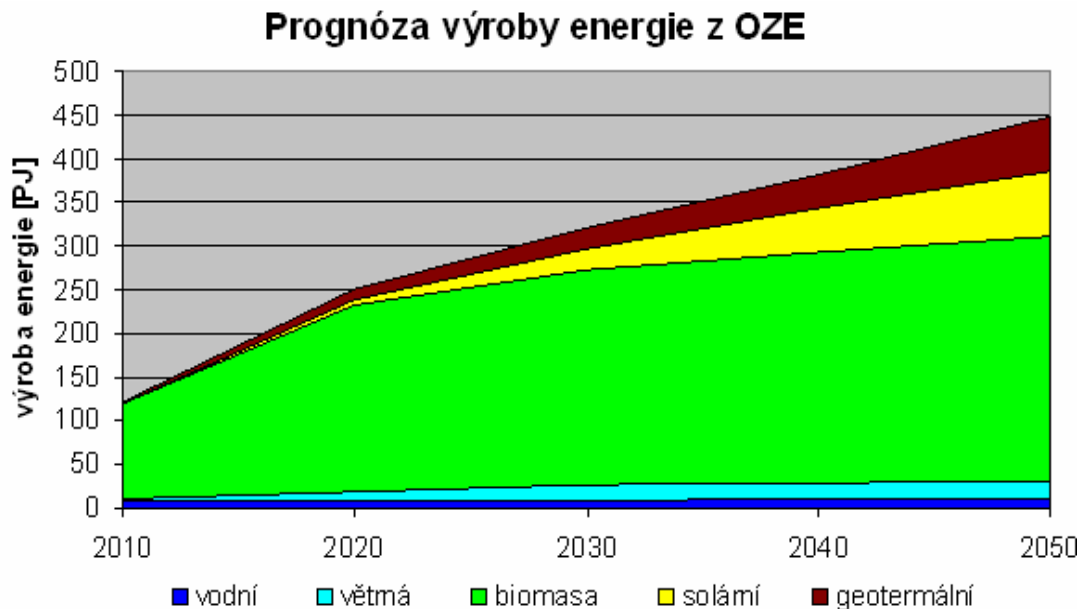
Většina obnovitelných zdrojů má původ ve slunečním záření, které dopadá na zemskou kuli. Výjimkou je geotermální energie, která vzniká různými procesy v nitru Země. Také energie přílivu a odlivu nepochází ze slunce, ale z přitažlivosti Měsíce a Země.

Veškeré sluneční záření dopadající na Zemi je dostačující, uvádí se, že za hodinu dopadne na zemskou kuli zhruba tolik solární energie, kolik činí veškerá spotřeba primárních zdrojů na celé planetě za rok. Roční spotřeba všech primárních zdrojů v ČR odpovídá sluneční energii, která dopadne za rok na 0,7 % plochy republiky.

Samotný potenciál je však omezen. Například není možné zabrat veškerou ornou půdu, lesy a další zemědělskou půdu pro energetické účely, ač tímto můžeme získat cca polovinu celkové energetické spotřeby. Ve skutečnosti potřebujeme půdu pro pěstování potravin a krmiv. Podobně nelze spálit všechno dřevo, které lesy poskytují, protože by stavební, nábytkářský a papírenský průmysl neměl z čeho vyrábět. V krajině existují i

další zájmy vyjádřené například ochranou území formou národních parků a CHKO. Reálný potenciál biomasy je tedy odhadován na cca 40 % teoretického potenciálu.

*Obr. 1 Prognóza výroby energie z OZE*



*Zdroj: [1]*

I když je potenciál obnovitelných zdrojů obrovský, zásadním problémem zůstává účinnost přeměny. Zejména u biomasy je účinnost velmi nízká – sklizené rostliny obsahují méně než jedno procento sluneční energie. To je dáno i tím, že rostliny využívají sluneční paprsky jen během několika měsíců vegetačního období. Účinnost se dále snižuje tím, že využíváme jen část biomasy.

Obnovitelné zdroje v současnosti pokrývají asi 5 % spotřeby primárních zdrojů. Teoretický potenciál obnovitelných zdrojů mnohokrát překračuje současnou spotřebu. Pro využití můžeme použít pouze ekonomicky dostupné technologie, což potenciál podstatně snižuje. Odhadované využití v roce 2030 ve výši 320 PJ by představovalo pokrytí 17 % dnešní spotřeby primárních zdrojů. V současnosti však primární zdroje využíváme jen s účinností 60 %. Spotřebu primárních zdrojů lze snížit například úsporami energií, vyšší účinností energetických procesů nebo snížením vývozu elektřiny. Potom mohou obnovitelné zdroje pokrýt vyšší podíl spotřeby [1].

V této práci je hlavním cílem zhodnotit možné metody energetického využití biomasy. Vhodných technologií pro výrobu tepla a elektrické energie z biomasy je mnoho. Vhodnost technologie závisí na její dostupnosti, ceně, spolehlivosti, efektivitě, vlivu na životní prostředí a dalších kritériích. Obsahem práce je především porovnání termochemických metod spalování, zplyňování a pyrolýza.

# 1 Charakteristika tuhých biopaliv

V této kapitole je nejprve nastíněn pohled na biomasu. Následuje samotné dělení tuhých biopaliv. Je zde také pohled na energetickou biomasu a její nesporný ekologický přínos. Na konci kapitoly je popis odpadní biomasy.

## 1.1 Definice biomasy

Biomasu lze definovat jako souhrn všech látek tvořících těla všech organismů, jak rostlin, bakterií, sinic a hub, tak i živočichů. Tímto pojmem se často označuje rostlinná biomasa využitelná pro energetické účely jako obnovitelný zdroj energie [2]. Zde je nutné podotknout, že za obnovitelný zdroj energie není možné považovat energii akumulovanou před dávnou dobou (uhlí, ropa, zemní plyn). Za biomasu budeme tedy považovat pouze materiál vzniklý činností rostlin nebo živočichů v době geologicky současné [3].

## 1.2 Tuhá biopaliva

Jsou biopaliva, která se v podmínkách, při nichž jsou skladována, dopravována a připravována pro energetické využití, nachází v tuhém stavu [4].

Tuhá biopaliva jsou vyráběna z biomasy:

- dřevní,
- ovocné,
- rostlinné,
- směsí a příměsí těchto surovin,
- směsí jsou záměrně smíchaná biopaliva,
- příměsí jsou nezáměrně smíchaná biopaliva [5].

### Dřevní biomasa

- lesní a plantážové dřevo (celé stromy s kořeny a bez kořenů, kulatina, zbytky po těžbě, pařezy, kůra, dřevní biomasa z péče o krajinu, směsi a příměsi),

- vedlejší produkty a zbytky z dřevozpracujícího průmyslu (chemicky neošetřené a chemicky ošetřené dřevní zbytky, vlákna a dřevní složky, směsi a příměsi),
- použité dřevo (chemicky ošetřené i neošetřené, směsi a příměsi),
- směsi a příměsi [5].

### **Bylinná biomasa**

- zemědělské a zahradní byliny (obilniny, traviny, olejniny na semeno, kořenoviny, luskoviny, květiny, bylinná biomasa z péče o krajinu – ze zahrad, parků, údržby krajnic silnic, vinic a skleníků, směsi a příměsi),
- biomasa z průmyslu zpracovávající byliny, vedlejší produkty a zbytky (chemicky neošetřené a chemicky ošetřené bylinné zbytky, směsi a příměsi),
- směsi a příměsi [5].

### **Ovocná biomasa**

- Sadové a zahradní plody (bobule, peckovice/jádroviny, ořechy a žaludy, směsi a příměsi)
- Biomasa z průmyslu zpracovávajícího ovoce, vedlejší produkty a zbytky (chemicky neošetřené a chemicky ošetřené ovocné zbytky)
- Směsi a příměsi [5]

### **Směsi a příměsi**

- Směsi
- Příměsi [5]

## **1.3 Energetická biomasa**

Je taková biomasa, která je pěstována výhradně pro energetické účely. V zásadě lze energeticky využít jakoukoliv plodinu, prakticky mají význam jen plodiny s určitými, pro energetické použití významnými vlastnostmi. Jsou to především:

- dobrá účinnost přeměny oxidu uhličitého na biomasu pomocí slunečního záření, a tedy i vysoká primární produkce,

- velký obsah sušiny (nízký obsah vody) v době sklizně,
- vysoká výhřevnost a nízký obsah popela,
- nenáročnost na vodu a živiny,
- odolnost proti chorobám a škůdcům [3].

Biomasa záměrně pěstovaná k tomuto účelu: cukrová řepa, obilí, brambory, cukrová třtina, olejniny, energetické dřeviny (vrby, topoly, olše a další) [6].

### **1.3.1 Ekologický význam energetické biomasy**

Význam biomasy pro získávání obnovitelného zdroje energie stále stoupá. Spočívá nejen v přímém využívání získané energie, ale má ekologický vliv. Při jejím spalování se znatelně sníží produkce emisí, které při spalování fosilních paliv značně zatěžují ovzduší. Dalším velmi důležitým faktorem je skleníkový efekt, který se plynule zvyšuje, tak jak se zvyšuje intenzita spalování fosilních paliv. Při spalování fosilních paliv se uvolňuje skleníkový plyn – oxid uhličitý, který byl v dávných dobách upoután právě vegetací tehdejších rostlin, ze kterých fosilní paliva postupně vznikla. Obecně je skleníkový efekt přírodní jev, bez kterého by nebyl současný život na zemi, ale cyklus oxidu uhličitého nesmí být narušen. Bohužel intenzivní spalování fosilních paliv v posledních dobách dodává do ovzduší příliš velké množství oxidu uhličitého, jeho přirozený cyklus se začíná narušovat, teplota na zemi se úměrně navyšuje s rostoucím skleníkovým efektem, který začíná být reálnou hrozbou narušení globálního klimatu. Při spalování biomasy se také uvolňuje oxid uhličitý, ale protože biomasa vzniklá v současné době, je tento plyn z ovzduší odčerpáván zpět vegetací rostlin a tak je jeho bilance v ovzduší vyrovnána [13].

## **1.4 Odpadní biomasa**

Odpadní biomasa je chápána jako biomasa, která již byla člověkem nějak využita (jinak než energeticky) nebo která slouží primárně k jiným účelům než je produkce energie [3].

Co považujeme za odpadní biomasu: rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajin, odpady z živočišné výroby, komunální organické odpady, organické odpady z potravinářských a průmyslových výrob, lesní odpady [6].

## 2 Metody energetického využití tuhých biopaliv

V této části se pokusím obecně přiblížit technologické možnosti energetického využití biomasy. Z energetického hlediska je stále nejvíce používané spalování, které probíhá buď přímo, nebo nepřímo spalováním plyných, nebo kapalných produktů [7]. Konečné využití stále ovlivňují mechanické a chemické vlastnosti biomasy. Dalším velmi důležitým faktorem je obsah sušiny v biomase. Hodnota 50% sušiny je přibližná hranice mezi mokrymi procesy (obsah sušiny pod 50%) a suchými procesy (obsah sušiny nad 50%) [6]. Z principiálního hlediska lze rozlišit několik způsobů získávání energie z biomasy a přípravy biomasy pro energetické využití:

- termochemická přeměna biomasy (suché procesy pro energetické využití biomasy)
  - spalování,
  - zplyňování,
  - pyrolýza.
- biochemická přeměna biomasy (mokrý procesy pro energetické využití biomasy)
  - alkoholové kvašení,
  - metanové kvašení.
- fyzikální a chemická přeměna biomasy
  - mechanicky (štípání, drcení, lisování, briketování, peletování, mletí apod.),
  - chemicky (esterifikace surových olejů).
- získávání odpadního tepla při zpracování biomasy (např. při kompostování, aerobním čištění odpadních vod, anaerobní fermentaci pevných organických odpadů apod.) [6].

Tato práce je zaměřena na tuhá biopaliva, tedy hlavním záměrem je zhodnotit termochemické, neboli suché procesy. V další části se budu zabývat pouze spalováním, zplyňováním a pyrolýzou.



## 2.1 Spalování

Spalování je stále nejvíce využívaný proces energetického využívání biomasy, jedná se tedy o termickou přeměnu biomasy za dostatečného přístupu vzduchu. Jak bylo již dříve zmíněno může se jednat o přímé spalování, nebo spalování plyných či kapalných produktů jejího zpracování. Samotná technologie spalování je dnes dokonale zpracována a pro investory nepředstavuje žádné riziko, oproti jiným termickým metodám, které jsou ve stádiu vývoje. Výsledným produktem je tepelná energie, využitelná hlavně pro vytápění, technologické procesy nebo elektrickou energii [7].

### 2.1.1 Charakteristika spalování

Spalování je chemický pochod, kde se slučují hořlavé prvky obsažené v hořlavině paliva s kyslíkem a dochází k uvolňování tepla. Následující rovnice a úvahy jsou z důvodu stejného charakteru hořlavých tuhých a kapalných paliv a podobnému složení stejné [6].

Spalovací reakce, kde se slučují hořlavé prvky s kyslíkem jsou exotermické, neboli při reakci vydávají teplo. Probíhají podle chemických vztahů:

- $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{teplo}$  /1/
- $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O + \text{teplo}$  /2/
- $S + O_2 \rightarrow SO_2 + \text{teplo}$  /3/

Tyto reakce jsou spíše teoretické, nevyjadřují přesné poměry při spalování. Ve skutečném ohništi se spalování neuskutečňuje pouze s čistým kyslíkem, ale za přítomnosti vzduchu, který obsahuje také dusík. Spalovací reakce tedy lépe vystihují tyto opravené vztahy:

- $C + O_2 + N \rightarrow CO_2 + N + \text{teplo}$  /4/
- $H_2 + 1/2 O_2 + N \rightarrow H_2O + N + \text{teplo}$  /5/
- $S + O_2 + N \rightarrow SO_2 + N + \text{teplo}$  /6/

Dusík, který se reakcí přímo neúčastní, přechází jako balastní složka do odpadních kouřových plynů nebo se může slučovat s kyslíkem a vytvářet škodlivé složky NO a NO<sub>2</sub>. Z toho vyplývá, že kouřové plyny jsou směs vzdušného dusíku a produktů spalování hořlaviny což mohou být: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, vodní páry

vzniklé z vlhkosti paliva a z vlhkosti vzduchu nebo dalších složek ve velmi malém nebo stopovém množství [6].

### 2.1.2 Procesy probíhající při spalování biomasy

Důležitou vlastností biomasy je, že při spalování nad 200°C se její značný podíl zplyňuje. Biomasa má velký podíl tzv. prchavé hořlaviny. To má za následek tvorbu dlouhého plamene, což trochu komplikuje konstrukci topenišť na spalování biomasy [3]. Spalování biomasy lze tedy nazvat jako vícestupňové spalování: zplyňování + spalování plynů [9].

Tab. 1 Obsah prchavé hořlaviny

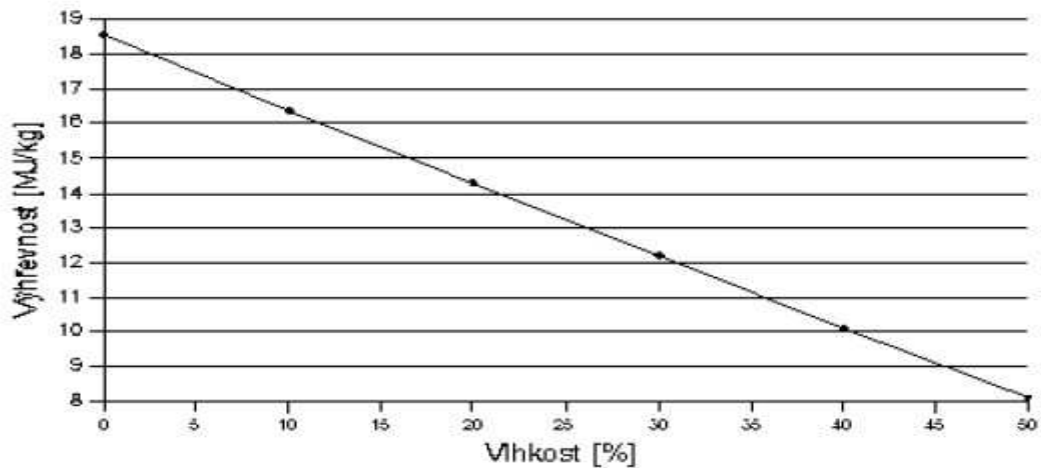
Palivo	Výhřevnost [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	Prchavá hořlavina [%]
Koks	28,5	1,5
Černé uhlí	28	20
Hnědé uhlí	17	55
Dřevo	18	75
Sláma	18	80

Zdroj: [3]

Kdyby prchavá hořlavina přicházela do prostoru ohniště bez dokonalého promísení se spalovacím vzduchem, nedojde k jejímu dokonalému vyhoření [6], z tohoto důvodu musí být zaveden pokud možno horký sekundární vzduch, jinak neprohoří vzniklý CO, který na chladných místech vylučuje uhlík vytvářející saze a mění se na CO<sub>2</sub>. Poměr primárního vzduchu, ten určuje spolu s palivem výkon topeniště, k sekundárnímu, který určuje kvalitu hoření a obsah škodlivých emisí, bývá 1:1 až 1,5:1 [10].

Další velmi důležitou vlastností při spalování biomasy je její vlhkost, která má zásadní vliv na výhřevnost dřeva. Vlhkost je spojena s hydroskopičností biomasy (náchylnost k vlhnutí i po vysušení). Uhlí při skladování může zcela promoknout a nedojde k nijak velkému poklesu jeho výhřevnosti. Naopak u biomasy ve vlhkém stavu přijdeme při spalování o značnou část obsaženého tepla [3].

Obr. 2 Závislost vlhkosti na výhřevnosti biomasy



Zdroj: [8]

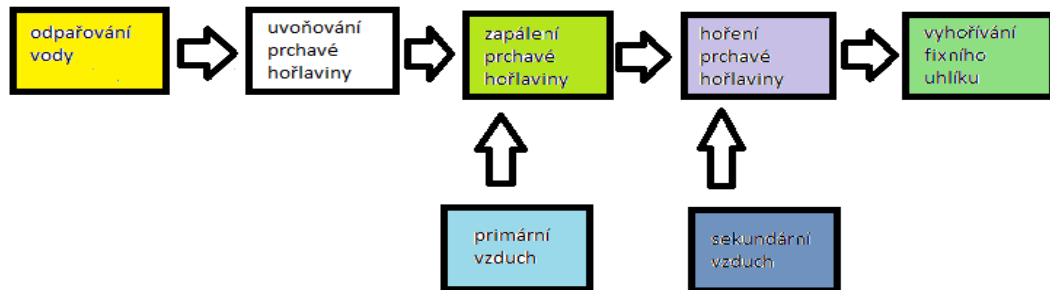
Všeobecně se doporučuje vlhkost alespoň pod 30%, za optimální se považuje vlhkost pod 20%, protože té lze ještě dosáhnout sušením pod přístřeškem [11].

Princip hoření dřeva (obecněji biomasy) začíná ohřevem dřeva a jeho vysoušením za zvýšené teploty v ohništi. Vlhkost se odpařuje při zahřívání na vyšší teplotu až dosáhne bodu varu. Teplota bodu varu při normálním tlaku je 100 °C, ve vnitřních vrstvách polen musí však vznikající pára překonávat odpor dřevní hmoty, než se dostane na povrch polena. Tento potřebný a zvýšený tlak páry má za následek zvyšování bodu varu vody, takže ve vnitřních vrstvách polen dojde k odpaření vody až při teplotě téměř 150°C (to je pěkně vidět u táboráků, kde z konců silnějších hořících větví vycházejí bílé obláčky páry). Stoupající teplota přehřáté vody, která je vyšším tlakem udržována v kapalném stavu i během pokračujícího ohřevu v topeništi neustále zvyšuje tlak až do porušení soudržnosti dřeva vznikem trhliny. Touto vzniklou trhlinou unikne pouze malá část přehřáté vody, která se při expanzi do nižšího tlaku vypařuje. Objem páry je totiž 1250x větší než objem vody. Tímto se sníží tlak a veškerá přehřátá voda se velmi rychle změní na páru. Tento jev je provázen zvukovými efekty, které známe např. jako praskání dřeva při spalování. Má-li dřevo jemnou granulaci, piliny nebo pórovitou strukturu jako pelety a brikety, jsou právě tyto zvukové efekty výrazně potlačeny, tzn. při spalování pelet neuslyšíme praskání typické pro spalování polen [12].

Po odpaření vody začne docházet k uvolňování prchavých látek a k tepelnému rozkladu jednotlivých látek. Tím vzniká směs hořlavých plynů, kde je akumulováno přes polovinu energie v dřevě obsažené a na roštu zbývá dřevěné uhlí. Hořlavé plyny s přiváděným vzduchem hoří ve formě dlouhého plamene. Zde ovšem nedojde k úplnému spálení plynů, z důvodu nedostatečného množství vzduchu nebo nedostatečně vysoké teploty. Jestli je pod rošt přiváděno příliš mnoho vzduchu dojde k ochlazení plamene a naopak, když je vzduchu málo, nedojde k dostatečné oxidaci (až na oxid uhličitý). Proto je dobré zajistit dostatečné teplo ve spalovací komoře (aby byla dostatečně izolována). Zde má význam právě sekundární vzduch, který umožní dostatečné vyhoření plynů a uvolnění zbylé energie z paliva, následně zůstane pouze oxid uhličitý, vodní pára a ze vzduchu zůstane nespotřebovaný dusík. Právě z délky plamene a nutnosti zajistit jeho vysokou teplotu vyplývá důležitost použít větší ohniště, aby teplosměnné plochy byly až za koncem plamene, aby nedocházelo k ochlazení plamene, jinak by docházelo k tvoření sazí, které zanášejí a snižují účinnost spalování (saze jsou uhlík, tedy část paliva). Z tohoto důvodu musí být kotle na biomasu rozměrnější a je obtížné vyrobit malé kotle s dobrou účinností [3].

Na roštu zbývá žhavé uhlí, které se spaluje daleko pomaleji a nevytváří tak dlouhý plamen. Většinou zde z části vzniká oxid uhelnatý, který se spálí až v místě přívodu sekundárního vzduchu. Pokud v topeništi zůstává již jen dřevěné uhlí (došlo k uvolnění veškerých těkavých složek) je možné regulovat výkon v širokém rozsahu a to přívodem primárního vzduchu [3].

Obr. 3 Schéma spalovacího procesu



Zdroj: vlastní tvorba

### 2.1.3 Ekologie spalování

Jak již bylo dříve zmíněno, skleníkový efekt, globální oteplování a klimatické změny jsou v současné době skutečností, kterou potvrzuje řada vědců, meteorologická měření, ale i nárůst pojišťovacích škod v důsledku narůstající frekvence nepředvídatelných jevů (např. povodně a tornáda). Příčinou je zejména spalování fosilních paliv, při kterých se produkuje skleníkový plyn  $\text{CO}_2$ . Zvyšující se koncentrace tohoto plynu a dalších skleníkových plynů (metanu, oxidu dusného, freonů) v atmosféře omezují vyřazování nahromaděného tepla na zeměkouli zpět do vesmíru, což má právě za následek globální oteplování. Intenzivní využívání fosilních paliv začíná být pro trvale udržitelný rozvoj lidské společnosti neúnosné a řada států se snaží podíl fosilních energií nahradit obnovitelnými energiemi, hlavně energií solární, větrnou, geotermální, vodní, nejvyšší potenciál má však energie z biomasy. Při spalování biomasy je stále uvolňován oxid uhličitý, který však skleníkový efekt nenavyšuje a to z důvodu, že rostliny ze svého růstu odebírají z ovzduší  $\text{CO}_2$  a při spalování jej opět vracejí [25], uvádí se tedy, že spalování biomasy je z hlediska emisí oxidu uhličitého neutrální, to je ovšem zjednodušený pohled, neboť stromy rostou desítky let a dřevo z nich se spálí okamžitě. Navíc při spalování biomasy vznikají i další škodliviny, a to některé velmi nebezpečné jako polyaromatické uhlovodíky, případně dioxiny [26].

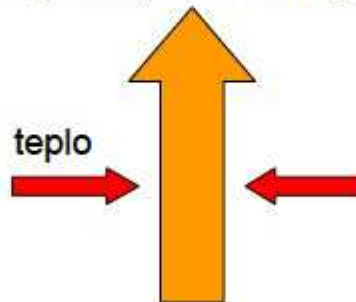
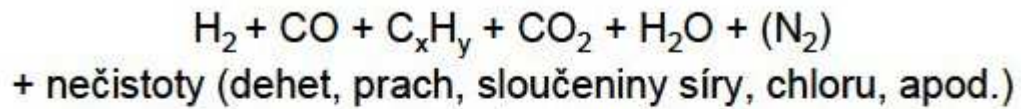
Při spalování se zpravidla dosahuje pozoruhodně nízkých hodnot škodlivých emisí. Spalování tuhé biomasy v rozmezí teploty plamene 900 až 1100°C při dostatečném přívodu vzduchu s přebytkem kyslíku a s dostatečně velkým a

neochlazovaným dohořívajícím prostorem plamene se obsah CO často blíží k nule. Emise oxidu siřičitého jsou rovněž zanedbatelné. Stopy síry se u tuhých biopaliv vyskytují jen výjimečně, např. v kůře dřevin. Emise oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) dosahují cca polovinu emisních limitů, mohou se však zvýšit při překročení teploty plamene nad  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Také biomasa obsahující vyšší obsah dusíku než 1,5 % v sušině může překročit emisní limit  $\text{NO}_x$ . Dále v případě energetických rostlin hnojených průmyslovými hnojivy s obsahem chloru se mohou ve spalínách objevovat emise chlorovodíku. Nečekanou překážkou rozvoje energetického využívání biomasy se stala měření obsahu polychlorovaných dibenzodioxinů a dibenzofuranů (PCDD/F) ve spalínách biomasy [25]. Dioxin je prudce jedovatý vedlejší produkt při výrobě pesticidů. Patří k nejjedovatějším látkám na zemi vůbec, dokonce ještě v koncentracích jedna ku miliardě jsou životu nebezpečné, navíc jsou látkami karcinogenními a teratogenními (schopnými ohrožovat lidský plod). Z výsledků několika pokusných měření vyplývá, že emise těchto látek není příliš závislá na typu paliva. Podstatné snížení těchto látek bude s největší pravděpodobností možné hlavně úpravou spalovacích podmínek a konstrukcí spalovacích zařízení. Přibližně řádové překročení emisního limitu pro tyto látky není zásadní a dává oprávněný předpoklad k úspěšnému technickému řešení na jejich snížení pod emisní limit [27].

## 2.2 Zplyňování

Zplyňování je termochemická přeměna uhlíkatého materiálu, může být v pevném či kapalném skupenství, na výhřevný energetický plyn, a to za přívodu podstechiometrického množství vzduchu či jiného oxidovadla, při teplotách okolo  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Na obrázku (obr. 4) je jednoduše znázorněn schématický princip spalování. Produktem zplyňování je plyn obsahující výhřevné složky ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  a další minoritní sloučeniny), dále doprovodné složky ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ) a v neposlední řadě některé znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chlóru, alkálie a další) [14, 18].

Obr. 4 Princip zplyňování



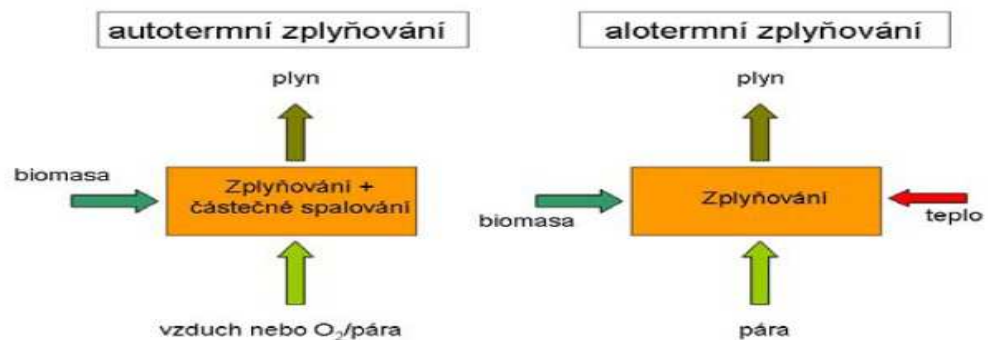
Zdroj: [14]

### 2.2.1 Procesy při zplyňování

Zplyňování je komplexní proces, ve kterém je obsažena celá řada reakcí. Z obecného hlediska se jedná o čtyři základní procesy: sušení, pyrolýza, redukce a oxidace [14].

První tři procesy, sušení, pyrolýza a redukce, jsou endotermní (spotřebovávají teplo). Toto teplo může být získáváno přímo v reaktoru oxidací (hořením) části paliva, nebo může být přivedeno z okolního prostředí. Pokud je použit první způsob, tedy pokrytí tepelné potřeby spálením části paliva přímo v reaktoru, používá se termín autotermní, neboli přímé zplyňování, zdali je teplo přiváděno z okolí do reaktoru, používá se termín alotermní, neboli nepřímé zplyňování [14, 15, 16]. Na následujícím obrázku (obr. 5) je znázorněn princip autotermního a alotermního zplyňování.

Obr. 5 Autotermní a alotermní zplyňování



Zdroj: [14, 17]

Při autotermním zplyňování musí být do reaktoru přiváděn kyslík, aby docházelo k potřebným spalovacím exotermním reakcím, které pokrývají potřebu tepla pro zplyňování. Jako nejčastější okysličovadlo je používán vzdušný kyslík, což má ale za následek naředění výsledného plynu dusíkem a tím i snížením obsahu výhřevných složek. Výhřevnost samotného plynu při autotermním zplyňování se pohybuje v rozmezí 2,5 – 8,0 MJ.m<sup>-3</sup>. Naředění generátorového plynu dusíkem při autotermním zplyňování lze předejít použitím čistého kyslíku, což má ale za následek zvýšení provozních a investičních nákladů na jeho výrobu. Obecně pro pokrytí tepelných nároků bývá v reaktoru spáleno přibližně 20 – 25 hm. % paliva [14].

Při alotermním (nepřímém) zplyňování je produkován plyn o vyšší výhřevnosti (až 14 MJ.m<sup>-3</sup>) a zároveň se širšími možnostmi využití. Ovšem nevýhodou je nutnost zajistit přísun tepla, což vyžaduje složitější zařízení a zároveň vyšší pořizovací náklady. Jako oxidovadlo (zplyňovací medium) při alotermním zplyňování bývá nejčastěji vodní pára. Prísun potřebného tepla pro alotermní zplyňování bývá zajištěn předehřevem zplyňovacího média a paliva, otopem stěn reaktoru nebo přenosem tepla inertním materiálem (např. pískem) přímo do reaktoru [14, 15, 19, 20, 21, 22]. V následující tabulce (tab. 2) jsou uvedeny příklady výhřevnosti a složení plynu ze zplyňování vzduchem, čistým kyslíkem s vodní párou (autotermní procesy) a zplyňování samotnou vodní párou (alotermní procesy).



Tab. 2 Příklady složení výsledného plynu (dřevo, obsah vody < 20 hm. %)

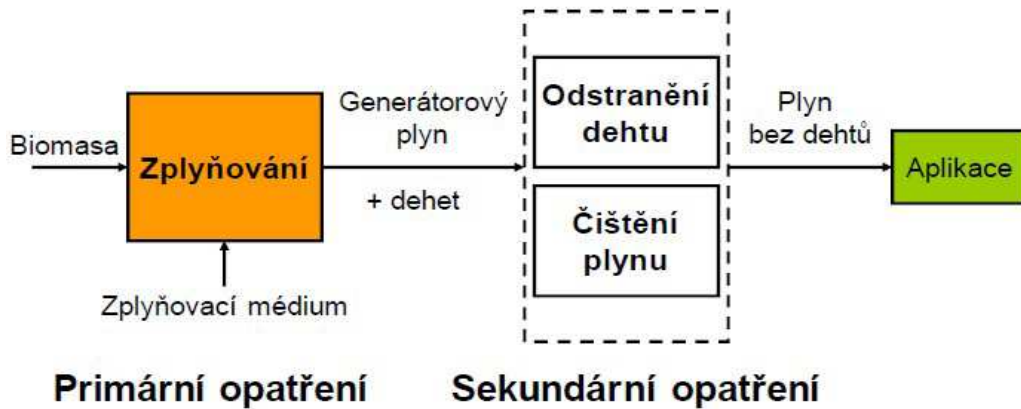
	Zplyňování vzduchem (autotermní)	Zplyňování parokyslíkovou směsí (autotermní)	Zplyňování parou (alotermní)
Výhřevnost [MJ.m <sup>-3</sup> ]	4 - 6	12 - 15	12 - 14
H <sub>2</sub> [%]	11 - 16	25 - 30	35 - 40
CO [%]	13 - 18	30 - 35	25 - 30
CO <sub>2</sub> [%]	12 - 16	23 - 28	20 - 25
CH <sub>4</sub> [%]	3 - 6	8 - 10	9 - 11
N <sub>2</sub> [%]	45 - 60	< 1	< 1

Zdroj: [14, 23, 24]

### 2.2.2 Možnosti čištění vzniklého plynu

Vyráběný generátorový plyn je vždy doprovázen znečišťujícími látkami, které je nutné z plynu odstranit. Jedná se převážně o pevné částice, dehet, sloučeniny dusíku (NH<sub>3</sub>, HCN), síry (H<sub>2</sub>S, COS, CS<sub>2</sub>) a další. Množství nečistot v plynu je závislé na technologii zplyňování a na složení biomasy. Technologie určené k výrobě alternativních paliv vyžadují plyn o vysoké čistotě a určitém poměru jednotlivých složek plynu. Obecně jsou dva základní přístupy k čištění plynu, které se vzájemně doplňují. Jedná se o primární opatření a sekundární opatření (viz. Obr. 6). Primární metody jsou metody, které se týkají samotného procesu zplyňování, uplatňují se přímo v generátoru a jsou to např. volba vhodného zplyňovacího média, vhodné teploty zplyňování, tlaku zplyňování atd. U fluidních generátorů se naskýtá možnost ovlivňovat kvalitu generátorového plynu použitím katalyzátorů ve fluidním loži. Sekundární opatření je rozuměno použitím návazných čistících technologií, jako jsou např. cyklóny, filtry, katalytické reaktory, atd. [14, 19, 28].

Obr. 6 Primární a sekundární opatření



Zdroj: [14, 28]

Sekundární opatření se dá rozlišit do dvou základních přístupů čištění plynu, a to nízkoteplotní a vysokoteplotní čištění. Nízkoteplotní čištění zahrnuje kontakt plynu s kapalinou, většinou olejem nebo vodou. Plyn je tedy ochlazen až pod bod varu těchto kapalin. Pro výrobu tepla a elektřiny pomocí plynové turbíny nebo vysokoteplotního palivového článku a pro výrobu alternativních paliv musí být plyn následně znovu zahřán na vyšší teplotu. Aby se dalo předejít ochlazování a následnému zahřátí plynu je možné použít vysokoteplotní čištění plynu, při kterém jsou nečistoty odstraňovány pomocí sorpčních a katalytických metod za vyšších teplot [14, 29].

## 2.3 Pyrolýza

Pyrolýzou rozumíme termický proces, který je na rozdíl od zplyňování a spalování založen na termickém rozkladu organických materiálů bez přístupu oxidačních médií (vzduch, oxid uhličitý, vodní pára), jež vede ke vzniku jednotlivých plynných, kapalných a pevných frakcí [18].

Podstatou pyrolýzy je, že při vyšších teplotách jsou organické sloučeniny méně stabilní, vysokomolekulární látky se rozkládají na nízkomolekulární, což vede k jejich rozkladu na těkavé produkty a koks. Tento proces probíhá v oblasti teplot 150°C až 1000 °C.

Podle použitých teplot se obvykle rozlišuje na:

- nízkoteplotní pyrolýzu (reakční teploty  $< 500^{\circ}\text{C}$ ),
- středněteplotní pyrolýzu (reakční teploty  $500^{\circ}\text{C}$  až  $800^{\circ}\text{C}$ ),
- vysokoteplotní pyrolýzu (reakční teploty  $> 800^{\circ}\text{C}$ ) [18].

V závislosti na dosažené teplotě, lze při pyrolytickém procesu pozorovat řadu dějů, které je možné rozdělit do 3 teplotních intervalů. V Oblasti teplot do  $200^{\circ}\text{C}$  dochází k sušení a tvorbě vodní páry fyzikálními odštěpeními vody. Tyto procesy jsou silně endotermické. V rozmezí teplot  $200^{\circ}\text{C}$  až  $500^{\circ}\text{C}$  následuje oblast suché destilace. Zde nastává odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek a přeměna makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík. Ve fázi tvorby plynu v oblasti teplot  $500^{\circ}\text{C}$  až  $1200^{\circ}\text{C}$  jsou produkty vzniklé suchou destilací dále štěpeny a transformovány. Přitom jak z pevného uhlíku, tak i z kapalných organických látek vznikají stabilní plyny, např.  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  [30].

Dodávání tepla se v technologické praxi řeší buďto zevním otopem (přes stěnu reaktoru) a nebo otopem vnitřním, realizovaným částečným spálením těkavých produktů pyrolýzy (případně přídavného paliva) přímo v pyrolýzním prostoru nebo přestupem tepla z teplotního média (inertním materiálem), kterým mohou být: horký písek, horké spaliny, ocelové kuličky, taveniny solí a kovů nebo žhnoucí uhlíkové částice. Probíhající chemické reakce jsou závislé na struktuře a textuře vstupního materiálu a jeho obsahu vody, teplotě a době zdržení produktů pyrolýzy v reaktoru [31].

Produkty pyrolýz jsou nejčastěji plyny, kapaliny a uhlí. Složení těchto produktů závisí na pyrolýzní metodě zpracování a na reakčních parametrech. Rychlá nebo blesková pyrolýza je používána pro maximální produkci plynů a kapalných produktů, poskytující především tepelný užitek. Pomalá pyrolýza je známa jako karbonizace a používá se především pro produkci dřevěného uhlí (v tabulce číslo 3 jsou znázorněny energetické výnosy) [32].

Pyrolýza je v současnosti velmi atraktivní, protože tuhá biomasa, která má sama o sobě relativně malou výhřevnost (energetickou hodnotu) je velmi náročná na přepravu a skladování a pomocí pyrolýzy může být snadno přeměněna na kapalný produkt. Tyto

pyrolýzní produkty, jako kapaliny nebo směsi, jsou právě velmi vhodné pro přepravu, skladování a flexibilitu produkce a prodeje [32].

*Tab. 3 Parametry rychlé a pomalé pyrolýzy*

	Pyrolýza	
	Pomalá	Rychlá
<b>Velikost přísunu suroviny</b>	jakýkoliv	malý
<b>Vlhkostní obsah</b>	nízký	velmi nízký
<b>Teplota [°C]</b>	400 – 600	450 - 900
<b>Tlak [Mpa]</b>	0,001 – 0,1	0,1
<b>Výnos plynu [%]</b>	do 40	do 70
<b>Výhřevnost [MJ.m<sup>-3</sup>]</b>	5 - 10	10 - 20
<b>Výnos kapaliny [%]</b>	do 30	do 75
<b>Výhřevnost [MJ.m<sup>-3</sup>]</b>	23	23
<b>Výnos pevné látky [%]</b>	30	do 15
<b>Výhřevnost [MJ.m<sup>-3</sup>]</b>	30	30

*Zdroj: [32]*

## 3 Technologie a technika energetického využití tuhých biopaliv

V této kapitole jsou popsány jednotlivé termochemické metody z hlediska technologie a techniky. Nejprve je popsána metoda spalování, následuje zplyňování a pyrolýza.

### 3.1 Technologie spalování

Technologie spalování využívá několik principů spalování:

- spalování na roštu,
- spalování se spodním přívodem paliva,
- speciální hořáky, hořákové provedení,
- spalování ve fluidní vrstvě [52].

#### Spalování na roštu

Roštové kotle mají dlouhou historii, uplatnily se při spalování fosilních paliv a nyní se uplatňují také při využívání biomasy téměř ve všech jejích formách. Ovšem pro spalování na roštu nejsou vhodné druhy s jemnou frakcí.

Roštové ohniště slouží k spalování kusových pevných paliv v klidné vrstvě tzv. filtračním způsobem. Základní části roštového ohniště jsou: spalovací prostor vymezený stěnami a přední a zadní klenbou a na dně roštem, palivová násypka, popelník a zařízení pro přívod a regulaci spalovacího vzduchu [52].

Princip roštu:

- zajistit přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých míst plochy roštu, aby spalování probíhalo při optimálním přebytku vzduchu,0
- možnost postupného vysušení, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření paliva,
- shromažďovat tuhé zbytky po spalování, případně jejich odvod z ohniště,

- měnit výkon zařízení [43].

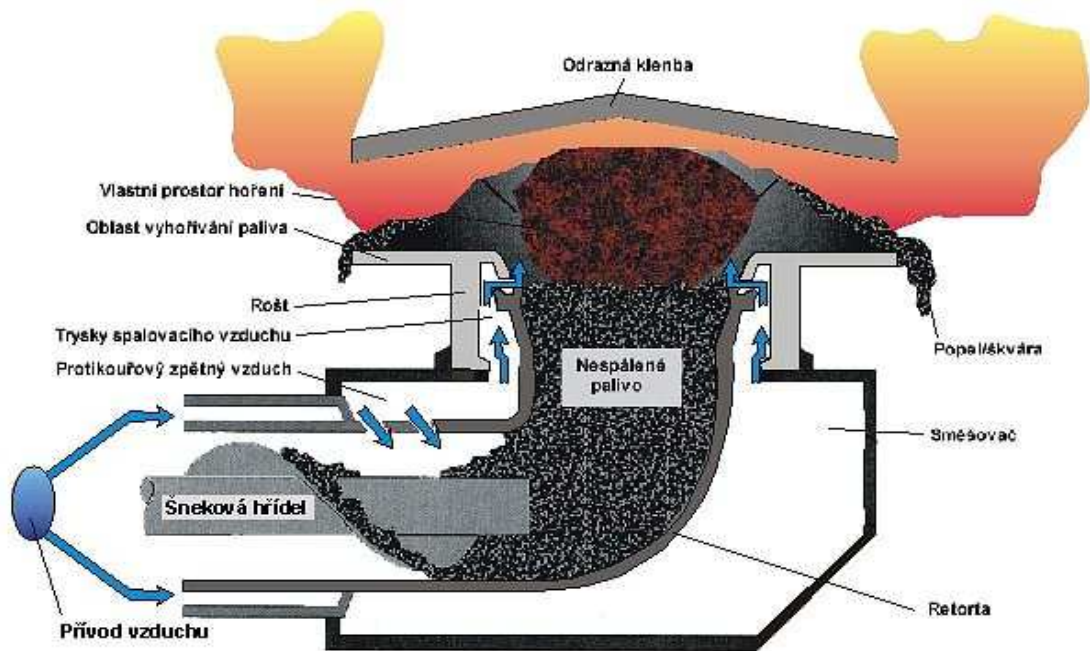
Pro lepší odvod zbytků po spalování může mít rošt vibrační nebo pohyblivý mechanismus.

### **Spalování se spodním přívodem paliva**

Příkladem hořáku se spodním přívodem paliva je ohniště kotle s (dis) kontinuálním přívodem paliva, jehož schéma je na obrázku č. 7, který byl vyvinut firmou CRE v Anglii [52].

Proces spalování začíná již v dopravním žlabu. Palivo se v čase mechanického transportu v dopravním žlabu bez přístupu vzduchu předežívá a termicky rozkládá. Uvolněná prchavá hořlavina se v horní části vytlačeného paliva mísí se vzduchem, vznítí se a hoří. Hoření této plynné směsi v porovnání s hořením dřeva na roštu se vyznačuje velmi krátkou délkou plamene. Intenzivní uvolňování tepla vzniklého hořením prchavé hořlaviny v dutinách a pórech spalovaného dřeva na jedné straně iniciuje sušení a termický rozklad a na druhé straně udržuje pásmo vysokých teplot v horních vrstvách vytlačené hořící masy z dopravního žlabu. Pod tlakem dalšího paliva se dřevěné uhlí odhrnuje do stran na roštnice, kde vlivem proudícího vzduchu intenzivně hoří [53].

Obr.7 Schéma ohniště kotle CRE

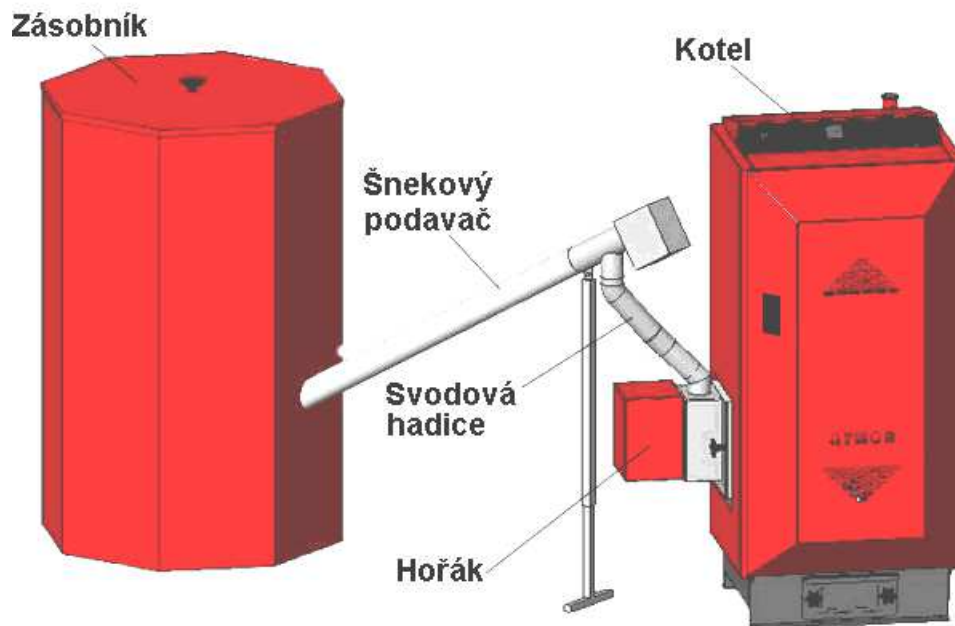


Zdroj: [53]

### **Speciální hořáky, hořákové provedení**

Speciální hořáky na biomasu byly vyvinuty ve Švédsku a jsou s dobrými výsledky provozovány především na zemědělských farmách. Mohou se v nich spalovat jak suché obilí (nejlepší výsledky jsou se spalováním ovsa), tak pelety [43]. Při spalování zrní se tvoří asi 7 % popela, proto je vhodné aplikovat jej do kotlů s velkým popelníkovým prostorem, případně s automatickým vynašečem popela. Na obrázku č. 8 je princip spalovacího zařízení. Šnekový podavač podává palivo do hořáku přes svodovou hadici, která plní částečně i funkci mezi-zásobníku. Hořák má čidlo pro zjištění množství paliva v hořáku, a pokud signalizuje nedostatek, podavač naplní hořák a část hadice. Hořáky jsou vybaveny žhavicí spirálou, která umožňuje automatické zapálení paliva [52].

Obr. 8 Schéma kotle s hořákem a se zásobníkem



Zdroj: [53]

Po jednoduché demontáži hořáku lze kotel opět provozovat na kusové dřevo. Tyto systémy s aplikacemi hořáků do stávajících kotlů jsou poměrně dosti rozšířeny ve skandinávských zemích [52].

### **Spalování ve fluidní vrstvě**

Při fluidním spalování je palivo spalováno ve fluidní vrstvě vytvořené z inertního materiálu. Vysoká tepelná kapacita fluidní vrstvy je schopna absorbovat změny vlastností paliv způsobené především jejich různým obsahem vlhkosti. Tyto kotle jsou vhodné pro spalování různých druhů biomasy i odpadů [53].

Samotné spalování probíhá ve vznosu, palivo je udržováno ve fluidním stavu prouděním vzduchu, kdy odpor proudícího média odpovídá tíže částic a hmota částic se chová jako kapalina. Zvětšení rychlosti proudícího média znamená zvětšení výšky fluidní vrstvy. Částice zůstává v ohništi tak dlouho, dokud nevyhoří, případně se do ohniště vrací. Výkon kotle se reguluje výškou fluidní vrstvy, do které jsou ponořeny teplosměnné plochy, nejčastěji jako výparník. U kotlů s externím výměníkem množstvím materiálu ve výměníku. Fluidní kotel dovoluje spalování drceného paliva (u biomasy do 15 mm), částice intenzivně kmitají v rovnovážné poloze, což má za



následek velké přestupy tepla (asi 2-3krát víc než u konvekčních ploch běžného kotle). Fluidní kotle jsou běžně konstruovány pro větší výkony, cca od 8 MW až po stovky MW. Mají velký regulační obsah, nízké spalovací teploty 800 - 900°C (vhodné pro emise NO<sub>x</sub> – do 200 mg/m<sup>3</sup>) a možnost spalovat velké množství druhů biopaliv [53].

### **3.2 Spalovací zařízení**

Za spalovací zařízení považujeme v případě zdrojů pro vytápění lokální topeniště – krby a kamna, kotle pro ústřední vytápění v mnoha různých provedení, teplovodní a horkovodní kotle pro lokální centralizované systémy, parní kotle pro kogeneraci tepla a elektřiny [43].

Základní požadavky na spalovací zařízení: jednoduchá obsluha a snadná údržba, zavážení paliva, odstraňování popela, vysoká kvalita spalování, nízké emise, vysoká účinnost, co největší rozsah regulovatelnosti výkonu při zachování kvality hoření, dlouhá životnost, bezpečnost provozu, nízké náklady – provozní, investiční [9].

#### **Kamna a sporáky**

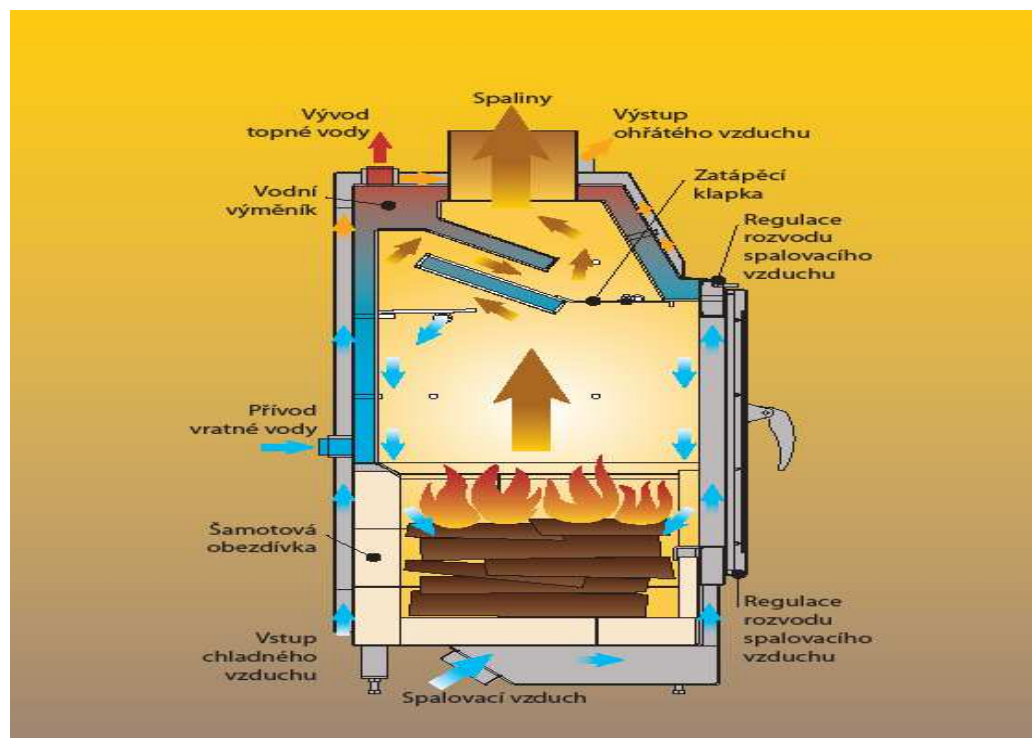
Kamna a sporáky představují nejjednodušší lokální topidla s ohništěm propalování tuhých paliv. Dno ohniště je tvořeno pevným roštem, kterým je k hořícímu palivu přiváděn spalovací vzduch, jehož množství lze regulovat dvířky popelníku, umístěným pod roštem. Tento druh ohniště klade minimální nároky na kvalitu paliva. Při spalování kvalitního kusového dřeva a častějším přikládáním po malých dávkách, se lze vyhnout nedokonalému spalování, projevujícím se tmavým aromatickým kouřem. Bohužel většinou zájem uživatele bývá počet přikládání minimalizovat [53]. Předností obou druhů kamen je jednoduchá konstrukce, snadná obsluha a nízká cena. Z pohledu kvality spalování a tvorby škodlivin je lze s výhradou doporučit pouze pro spalování kvalitních paliv. Běžný provoz znamená vždy vysoké emisní koncentrace oxidu uhelnatého, uhlovodíků a dalších škodlivin.

#### **Krby a krbová kamna**

Lokální vytápění dřevem, spalovaným v krbech a krbových kamnech, se těší velké oblibě. Krby jako zdroj tepla mají velkou historii a tradici. Současné technické možnosti dovolují uzavřít ohniště sklem a regulovat pak množství spalovacího vzduchu,

a tak mohou současné krby a krbová kamna dosahovat špičkové účinnosti až 80 % [43]. Na obrázku č. 9 je znázorněna konstrukce krbových kamen.

Obr. 9 Krbová kamna, konstrukce ohniště



Zdroj: [53]

### **Kachlová kamna**

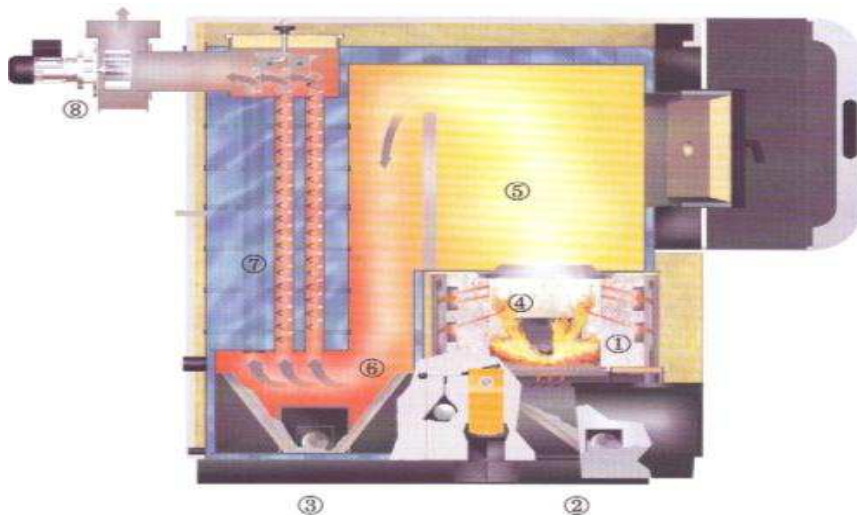
Vedle krbů je to nejstarší způsob vytápění, jehož předností je vysoká efektivita, daná možností využívat akumulace tepla. Z dnešního pohledu je jejich velikou předností také poměrně spolehlivé zabezpečení dokonalého spalování, a proto tedy nízká produkce škodlivin [43].

### **Kotle pro ústřední vytápění**

Lze rozdělit na kotle s manuálním příkládáním a automatické a automatizované kotle. Kotle s manuálním příkládáním jsou klasickým a dosud nejrozšířenějším konstrukčním řešením. Velkoobjemové ohniště, do kterého lze pro co nejdelší periodu příkládání přiložit najednou velké množství paliva. U těchto kotlů dochází vlivem nerovnoměrného hoření k nedokonalému spalování a tvorbě typických škodlivin, značně obtěžující okolí. Samozřejmě a bohužel jsou stále nejpoužívanější [43].

Automatické a automatizované kotle na spalování biomasy používají systém kontinuálního přívodu paliva do ohniště. Automatické kotle (schéma na obr. 10) mohou využívat pro ústřední vytápění jak spalování na roštu, tak speciálních hořáků či hořákového provedení spalovací komory, dále spodního přívodu paliva nebo zplyňování. Nejčastěji se u automatických kotlů objevuje systém se spodním přívodem paliva. Jejich výhodou je velký regulační rozsah [43].

*Obr. 10 Schéma automatického kotle, 1 – automatický rošt, 2 – šnekový vynašeč popele ze spalovací komory 3 – šnekový vynašeč popele z trubkového výměníku tepla, 4 – spalovací komora s regulací přívodu vzduchu, 5 – velká spalovací komora, 6 – velká komora 2. tahu kotle, 7 – trubkový výměník tepla s automatickým čištěním, 8 – spalínový ventilátor.*



*Zdroj: [43]*

### **Zplyňovací kotle**

Spalování každého tuhého paliva probíhá nejdříve ve fázi zplyňování, kdy se tuhá hořlavina přemění na hořlavé plyny, a po ní následuje fáze spalovací, ve které hořlavé plyny dohoří. U zplyňovacích kotlů jsou tyto dvě fáze od sebe prostorově odděleny, což umožní lepší řízení celého procesu a dosažení vysoké účinnosti spalování. Jsou konstruovány tak, že vrchní část kotle slouží jako zásobník paliva a spodní část jako spalovací komora a popelník. Mezi nimi je umístěna zplyňovací část. Ve zplyňovacích kotlích, které dosahují účinnosti 85 – 90 %, lze docílit výrazné úspory

paliva oproti klasickým systémům prohořívání paliva. Podmínkou je však použití suchého dřeva s vlhkostí do 20 % [53].

### **Průmyslové kotle**

Mezi průmyslové kotle řadíme kotle vyšších výkonů. Vyrábějí se buď sériové, a to pro menší a střední výkony, konstrukce dovoluje modulové sestavení, kdy je celý systém sestaven z modulů vhodných pro dané palivo, způsob dopravy či teplotnosné médium. Průmyslové kotle velkých výkonů vycházejí z výrobního programu a konstruují se až v místě aplikace. Teplotnosným médiem průmyslových kotlů je horká voda, pára nebo horký vzduch. Průmyslové kotle využívají nejčastěji systémů se spodním přívodem paliva, a to pro menší a střední výkony, dále spalování na roštu a ve fluidní vrstvě [43].

## **3.3 Technologie a technika zplyňování**

V této části je nejprve bližší seznámení s reakcemi které probíhají při zplyňování, jejich jednotlivý popis. Následně jsou popsány zařízení ve kterých proces zplyňování probíhá tzv. zplyňovací generátory.

### **3.3.1 Reakce probíhající ve zplyňovacích generátorech**

Veškeré zplyňovací reaktory obsahují čtyři základní zóny, ve kterých probíhají charakteristické reakce [36]. Souhrnem těchto reakcí dostáváme po výstupu z reaktoru hlavní produkt, kterým je syntézní plyn. Jak již bylo dříve zmíněno, tyto zóny se nazývají:

- sušení,
- pyrolýza,
- redukce,
- oxidace (spalování) [35].

Z reakčního hlediska jsou nejdůležitější zóny redukce a oxidace [36]. V reaktorech probíhají procesy endotermické, tak i exotermické [37]. Kdy teplo získané oxidací paliva je využíváno probíhajícími endotermickými reakcemi. Dojde-li

v reaktoru k vyrovnání množství spotřebovaného a vyrobeného tepla, vzniká uvnitř reaktoru tzv. energetická rovnováha.

K nejdůležitějším dějům probíhajícím v reaktoru patří spalování (reakce mezi hořlavinou a kyslíkem), reformování (konverze páry a uhlíku) a reakce produktů vzniklých předchozími dvěma ději [37].

### **Oxidační zóna**

Klíčovými reakcemi spalovací zóny jsou reakce oxidační [36, 38, 39]. K těm dochází reakcí hořlavých složek vstupní suroviny s kyslíkem obsaženým ve zplyňovacím médiu. Hlavními produkty těchto reakcí probíhajících v této zóně jsou oxid uhličitý, oxid uhelnatý a voda [40]. Proces popisují následující reakce:

- $C + O_2 \rightarrow CO_2$  /7/
- $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$  /8/
- $2 C + O_2 \rightarrow 2 CO$  /9/

Reakce probíhající ve spalovací zóně jsou reakce exotermické (vydávají teplo). Toto teplo je využíváno následně probíhajícími endotermickými reakčními procesy [38]. Oxidační reakce spalovací zóny probíhající při teplotě okolo 1450°C [36]. Jako zdroj kyslíku je nejčastěji používán vzduch, z důvodu nízkých nákladů a bezrizikovosti.

### **Redukční zóna**

Nejprve zde probíhají tyto reakce:

- $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$  /10/
- $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$  /11/

Zde se jedná již o reakce endotermické (spotřebovávají teplo), které probíhají za nižších tlaků, vyšších teplot (okolo 700 °C) a bez přítomnosti katalyzátoru [41]. Tyto reakce mají zásadní vliv na konečnou transformaci polokoksu. Následuje:

- $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$  /12/

Rovnice popisuje reakci vodního plynu, při níž se zvyšuje poměr vodíku k oxidu uhelnatému [38, 39, 41]. Reakce je exotermická, probíhá za přítomnosti katalyzátoru a mírně zvýšené teploty (cca 260 °C) [40]. Další důležitou reakcí je tzv. metalizační reakce:

- $C + 2 H_2 \rightarrow CH_4$  /13/

Jedná se o exotermní reakci, probíhá nejčastěji při teplotě okolo 1100°C za zvýšeného tlaku. K urychlení reakce je také využíván katalyzátor [40].

### **Pyrolýzní zóna**

Pyrolýza vstupní biomasy je prvním krokem k získání syntézního plynu, k pyrolýze dochází za podstatně nižších teplot (500 – 600 °C), než k samotnému zplyňování (750 - 1100 °C) [35, 36, 42]. Poměr produktů vznikajících při pyrolýze ovlivňují zejména následující faktory: rychlost ohřevu suroviny, konečná teplota dosažená v reaktoru a množství kyslíku ve zplyňovacím médiu [39].

### 3.3.2 Zplyňovací generátory biomasy

Proces zplyňování biomasy probíhá v tzv. zplyňovacích generátorech. Dle vzájemného kontaktu média a paliva lze zplyňovací generátory rozdělit do následujících skupin:

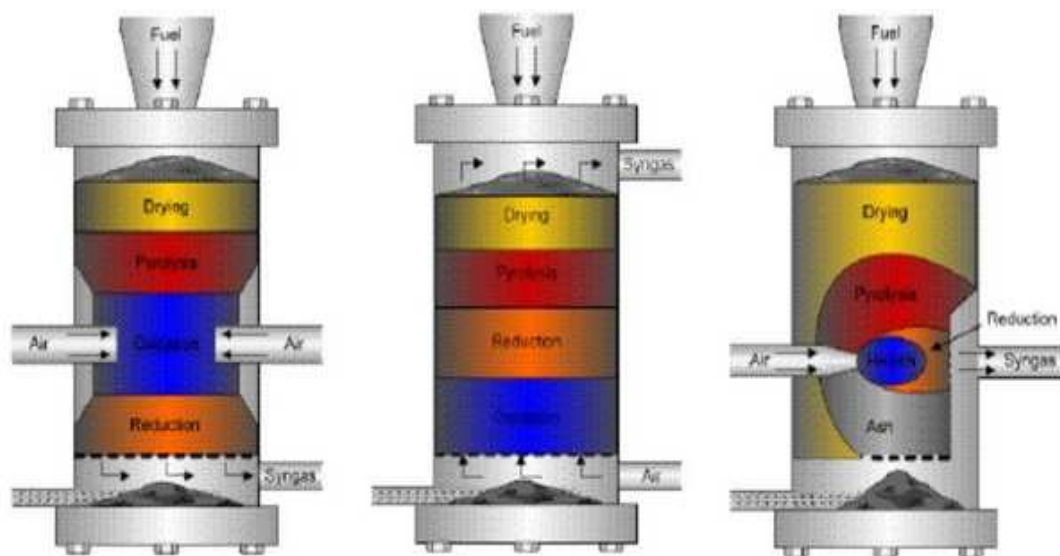
- generátory s pevným ložem,
- generátory s fluidním ložem,
- unášivé lože [41].

Moderní technologie zplyňování biomasy jsou v ČR ve stádiu demonstračních a pilotních projektů, a podobně je tomu i v ostatních vyspělých zemích [43].

#### Zplyňovací generátory s pevným ložem

Mezi základní výhody těchto zplyňovacích generátorů patří jednoduchá konstrukce a obsluha během provozu. Mají široké uplatnění a jsou hojně rozšířené v technické praxi [41]. Generátory s pevným ložem se dále dělí podle způsobu, jakým se uvnitř generátoru navzájem stýkají pevné částice paliva a zplyňovací médium [36]. Z tohoto důvodu rozlišujeme generátory protiproudé, souprroudé a křížové, na obrázku č. 11 jsou znázorněny jednotlivé generátory.

Obr. 11 Zleva: protiproudý, souprroudý a křížový generátor



Zdroj: [44]

Při rozhodování, který z generátorů bude pro danou věc nejvhodnější, má zásadní vliv druh, kvalita a velikost částic tvořících vstupní surovinu [36, 41]. Dalším důležitým kritériem je obsah vlhkosti a popeloviny v použitém palivu.

**Protiproudá konstrukce:** jedná se o nejjednodušší typ, biomasa je dodávána vrcholem reaktoru a pohybuje se směrem dolů vlivem zplyňování a odvodu popela. Vzduchový přívod je na dně a plyn opouští reaktor vrchem reaktoru [43]. Výhody: zpracování biomasy i s vyšším obsahem vlhkosti, vyšší teploty ničí některé toxiny a mohou likvidovat usazeniny minerálů a kovů, vyšší obsah dehtu zvyšuje výhřevnost, dobrá tepelná účinnost. Nevýhody: vyšší obsah dehtu může způsobit poškození motorů, rošt je vystaven vysokým teplotám a musí být chráněn nebo chlazen, velká citlivost na vlhkost v palivu, dlouhá doba najíždění [36, 41, 45].

**Souproudá konstrukce:** U souproudé konstrukce je palivo dodáváno zpravidla také vrchem a přívod vzduchu je nahoře nebo ze strany. Plyn je odváděn dnem reaktoru, takže plyn a biomasa mají stejný směr pohybu, což je podstatné [43]. Výhody: Nižší obsah dehtu a částic v syntézním plynu umožňuje využití produktu v některých motorech bez dalšího čištění plynu, rošt není vystaven vysokým teplotám, pružné přizpůsobení výroby plynu k zátěži. Nevýhody: Poměrně vysoká konstrukce, biomasa musí mít malou vlhkost (menší než 20 %), výsledný plyn je horký a musí být chlazen, cca 5 % suroviny je nepřeměněno a zůstává v popelu, nevhodná pro paliva tvořená malými částicemi [36, 41, 45]. Pro optimalizaci jednotlivých zón bylo vyvinuto několik konstrukcí, kde jsou spalování, zplyňování a pyrolýza odděleny pomocí oddělených nádob, tzv. víceetapový souproudý zplyňovač [44].

**Křížová konstrukce:** je původně navržen pro zplyňování dřevěného uhlí [43]. Biomasa je dávkována shora, pohybuje se směrem dolů. Vzduch je zaveden ve spodní části a pohybuje se napříč ložem. Výsledný plyn je extrahován naproti vzduchové trysce na roštu. Výhody: silnější cirkulace v horké zóně, nižší teploty umožňují použití levnějších konstrukčních materiálů, malá konstrukční výška, velmi krátká doba najíždění, flexibilní výroba plynu. Nevýhody: složitější obsluha, vysoká hladina uhlíku v popelu (33 %), velmi vysoká citlivost k tvorbě strusky, vysoké ztráty tlaku [36, 41, 45].



Z celkového pohledu generátorů s pevným ložem lze říci, že mají jednoduchý design, snadnou obsluhu, krátkou dobu najíždění a poměrně levné konstrukční materiály [41, 45].

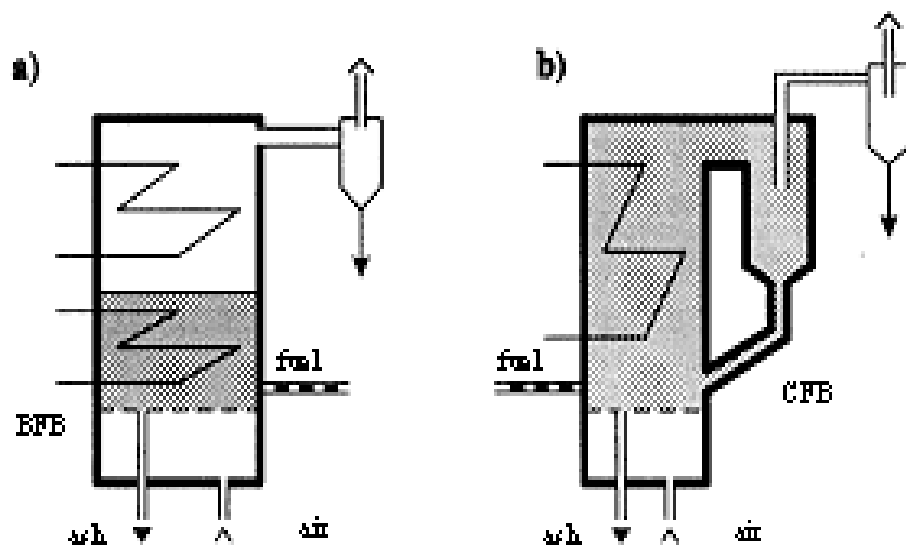
### **Zplyňovací generátory s fluidním ložem**

Spolu s generátory s pevným ložem jsou zplyňovací generátory s fluidním ložem dvěma nejvyužívanějšími typy zplyňovacích generátorů [46].

V generátorech s fluidním ložem dochází nejprve k fluorizaci částic paliva vhodným médiem (vzduch, pára atd.) [45]. Až následně dochází k samotnému zplyňování, které je založeno na stejných procesech jako v reaktorech s pevným ložem, avšak tyto reaktory nabízejí vyšší výkon, ten je však spojen s vyššími náklady a složitější konstrukcí generátoru [47].

Dle konstrukčního řešení generátorů s fluidním ložem lze dále rozdělit na generátory s bublinkovým ložem a generátory s cirkulujícím ložem [45]. Schématicky znázorněny na obrázku č. 12.

*Obr. 12 a) generátor s bublinkovým ložem, b) generátor s cirkulujícím ložem*



Zdroj: [48]

Generátor s bublinkovým ložem (BFB – bubbling fluidised bed): Stacionární vrstva má zřetelné rozhraní mezi vrstvou a prostorem nad vrstvou, tedy fluidní vrstva je ukončena hladinou. Úroveň dehtů se pohybuje od 1 do 2 %. Průměr reaktoru je dán rychlostí plynu nad vrstvou, tím se vyhneme úletu částic [43]. Výhody: široké využití, produkuje kvalitnější plyn, možnost přímého a nepřímého ohřevu. Nevýhody: vyšší nároky na úpravu paliva, nezanedbatelná tvorba dehtů [47].

Generátor s cirkulujícím ložem (CFB – circulating fluidised bed): Generátory s cirkulující fluidní vrstvou nemají zřetelnou hladinu vrstvy, vrstva je omezena stropem reaktoru. Vrstva má po výšce odlišnou hustotu, u dna je nevyšší, u stropu naopak nejnižší. Unášené částice jsou zachyceny v cyklónu a vracejí se zpět přes sifon do dna fluidní vrstvy. Konverze paliva je tak dokonalejší a vyhoření uhlíku je mnohem větší než u generátoru s bublinkovou fluidní vrstvou [43]. Výhody: velká možnost použití, produkuje kvalitnější plyn. Nevýhody: nezanedbatelná tvorba dehtů, vyšší nároky na úpravu paliva [47].

Obecně mezi největší výhody generátorů s fluidním ložem patří výroba kvalitnějších produktů a možnost přímého i nepřímého ohřevu. Nevýhodami jsou zvýšená tvorba dehtu a zvýšené požadavky na úpravu vstupního paliva [47].

V současné době je jako palivo pro zplyňovací generátory používána především dřevní hmota. Využití bylinné a stébelnaté biomasy je pro tuto aplikaci zatím ve fázi výzkumu. Největší potíže pro aplikaci nedřevní biomasy činí nízká teplota měknutí popele [49].

### **Zplyňovací generátory s unášivým ložem**

U tohoto typu generátoru je použito jemné rozemleté palivo, uhelný prášek do 100  $\mu\text{m}$  nebo kapičky oleje, přiváděno vrchem do reaktoru spolu s kyslíkem nebo parou, popel je odváděn ve formě tekuté strusky. Tento typ generátoru je charakteristický krátkou dobou zdržení částic v reaktoru (cca 1 sekunda), vysokou teplotou v reaktoru 1300 - 1600  $^{\circ}\text{C}$ , vysokým tlakem 2,5 – 6 MPa a velkými výkony – nad 100 MW [43]. Tento typ generátoru však stále není v praxi příliš rozšířen [41]. Schéma zplyňovacího generátoru s unášivým ložem je znázorněno na obrázku č. 13.



- Produkty vystupující z reakce budou mít vysoký tlak potřebný pro další zpracování,
- Možnost použít produkt pro palivové články [51].

### 3.4 Pyrolýzní technologie

Pyrolýza je již prakticky používána po staletí pro produkci dřevěného uhlí. Při výrobě dřevěného uhlí je použita pomalá reakce při nízkých teplotách pro dosažení maximálního výnosu. Nejnovější studie však navrhují cesty podstatně měnících se změn ve složení plynných, kapalných a pevných produktů (možnosti pyrolýzního zpracování jsou znázorněny v tabulce č. 4). To je dosaženo především ve stupni rozehrátí a v reakční teplotě.

Tab. 4 Možnosti a charakteristika z pyrolýzního zpracování

	Pomalá pyrolýza	Rychlá pyrolýza	
		Nízkoteplotní	Vysokoteplotní
<b>Teplota [°C]</b>	400 - 600	450 – 600	700 - 900
<b>Tlak [Mpa]</b>	0,001 – 0,1	0,1	0,1
<b>Výnos plynu [%]</b>	do 60	do 30	do 80
<b>Výhřevnost [MJ.m<sup>-3</sup>]</b>	5 – 10	10 - 20	15 - 20
<b>Výnos kapaliny [%]</b>	do 30	do 75	do 20
<b>Výhřevnost [MJ.m<sup>-3</sup>]</b>	20	23	22
<b>Výnos pevné látky [%]</b>	do 30	do 15	do 15
<b>Výhřevnost [MJ.m<sup>-3</sup>]</b>	30	30	30

Zdroj: [32]

#### Pomalá pyrolýza

Je charakterizována nízkou rychlostí výhřevu ( $< 10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ) nízkou teplotou reakce ( $< 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a dlouhou dobou setrvání těkavých látek a tuhých uhelnatých zbytků v reaktoru (od hodiny po několik dní). Primární prchavé látky biomasy jsou zadrženy v reaktoru a štěpí se dále na sekundární produkty za vzniku plynů a dehtů. Tuhé zbytky se přemění ve výsledném produktu v dřevěné uhlí [32].

#### Rychlá pyrolýza

Rychlá pyrolýza je vysokoteplotní proces, při kterém je biomasa velmi rychle zahřána v prostředí bez přístupu kyslíku. Výslednými produkty jejího rozkladu jsou

páry, aerosoly a karbonizační zbytek, což je dřevěné uhlí. K produkci kapalného podílu je potřeba velmi krátké doby zdržení par v reaktoru okolo jedné sekundy, aby se zabránilo sekundárním reakcím. Přijatelných výnosů lze dosáhnout při době zdržení do pěti sekund, pokud je teplota par držena pod 400 °C. Po zchlazení a kondenzaci par je získána tmavě hnědá kapalina, která má výhřevnost odpovídající asi polovině běžné motorové nafty. Výzkumy ukázaly, že nejvíce dehtu vzniká při teplotách asi 500 °C. Dehet je směsí polárních organických sloučenin (cca 75 – 80 % hm.) a vody (20 – 25 % hm.) [33].

Samotnou produkci dehtu pomocí pyrolýzy lze uskutečnit z libovolného biopaliva. Procesy rychlé pyrolýzy jsou intenzivně vyvíjeny řadou institucí a výrobců zejména během posledních 10 let. Biomasu je nutné před vstupem do reaktoru rozdělit na požadovanou velikost (různou dle typu reaktoru), což zabezpečuje rychlý ohřev částic a snadnou separaci vzniklých pevných částí. Ohřev pyrolyzovaného materiálu může být proveden různými způsoby, např. recyklováním horkého písku, plynů nebo přídatným materiálem [34].

### **3.4.1 Pyrolýzní produkty**

Produkty z termických procesů musejí mít větší využitelnost než je nezpracovaná biomasa a musí být hodnotnější. Primární produkty pyrolýz mohou být využívány přímo nebo po dalším zpracování pro širší využití a nebo pro hodnotnější sekundární suroviny chemického průmyslu [32].

Procesy v pyrolýze jsou složité, ale nejuznávanější teorie je, že primární páry jsou prvním produktem a jsou přímo závislé na velikosti teplot. Právě tyto primární páry, než se přemění na sekundární dehet a na plyny, když zůstanou ve vysokých teplotách, jejich sekundární reakce probíhají v delším časovém intervalu. Hodnoty a charakteristiky těchto sekundárních produktů jsou závislé na teplotách a době zdržení v reakční komoře. Výnosy kapalin z pyrolýz může ovlivňovat stupeň reakce. Rychlý pyrolýza v teplotách mezi 450 – 650°C poskytuje vyšší kapalinové produkce. Při rostoucí velikosti teplot, poskytuje pyrolýza vyšší plynové výnosy na úkor nižších kapalinových výnosů. To vše je důležité pro odlišení mezi primárními a sekundárními produkty a na ohodnocení rozdílu mezi pyrolýzní produkty. Primární oleje s nízkou

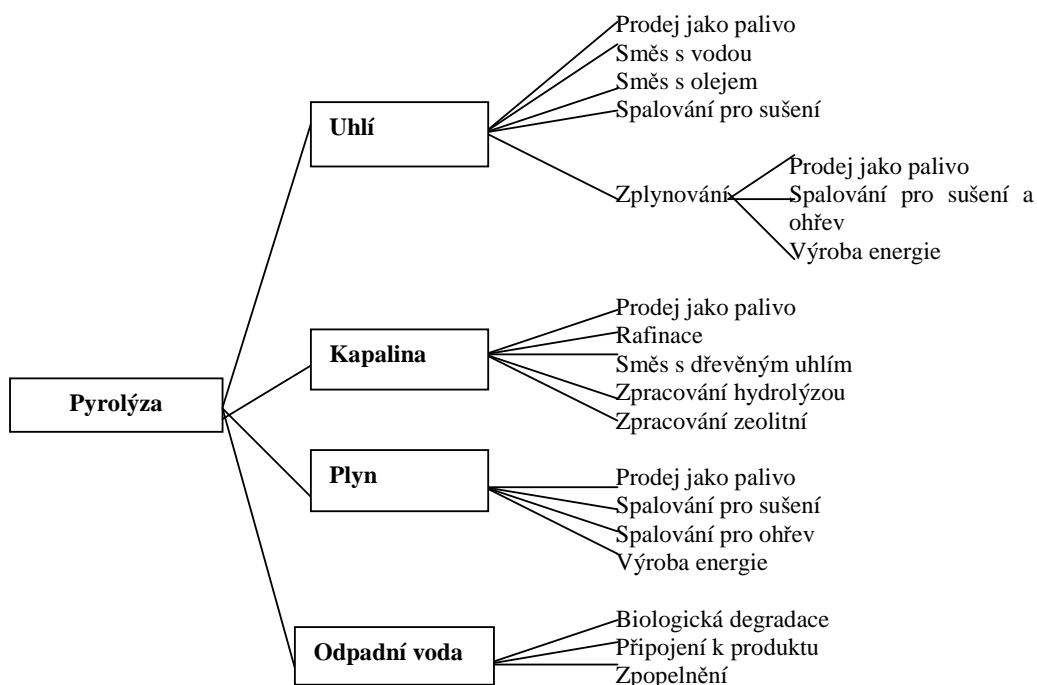
viskozitou bývají stabilnější za vnějších podmínek, méně citlivější na kontaminaci vody a větší stejnorodost [32].

### **Primární a sekundární produkty**

Primárními produkty mohou být plyny, kapaliny nebo pevné látky, závisující na technologii zpracování biomasy. Mohou být využity přímo nebo mohou být přeměněny v dalších chemických procesech na produkci kvalitnějších a cennějších paliv nebo přímo pro výrobu chemických produktů. Primární produkty a jejich možné využití je znázorněno na obrázku č. 14 [32].

Sekundárních produktů je celá řada odvozená z primárních produktů. Sekundární produkty zahrnují uhlovodíková paliva, výrobu energie, chemické sloučeniny včetně vodíku, čpavku a speciálních chemických sloučenin. Některé z těchto procesů jsou již komerčně přístupné a použitelné, zatímco ostatní jsou stále ve vývoji. Vývoj nových technologií vyžaduje čas a zkušební provoz pro ověření komerčního využití. To závisí na ceně fosilních paliv a na tržním postavení fosilních paliv [32].

*Obr. 14 Primární produkty a jejich využití*



*Zdroj: [32]*

Technologie, které se zabývají především termochemickou přeměnou na kapalné produkty s vysoce energetickým obsahem je tento energetický obsah snižován skladováním a přepravou, ale přesto jsou tyto kapalné produkty do budoucna náhradou za veškerá současná kapalná paliva. Pyrolýzní oleje a jejich směsi mají čistou výhodu při zpracování dřevní štěpky a slámy, a to především pro jejich poměrně vysokou energetickou účinnost [32].

Vzniklý pyrolýzní plyn je médium s vysokou výhřevností plynného paliva. Může být využit přímo pro vytápění nebo pro výrobu elektrické energie. Při produkci plynu se získává CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> a významné množství nasycených i nenasycených uhlovodíků. Tyto produkty mohou být fyzikálně a chemicky upraveny na více hodnotnější produkty. Kapalina získána z biomasy v základním složení, je složena z velmi složitých oxidačních uhlovodíků. Skladba kapaliny vzniká z její degradace a ze širokého spektra neřízeného chemického zpracování. Kapalina, zvláště z rychlé pyrolýzy, je často určena jako olej nebo bio-olej, ale také se může podobat dehtu, především při pomalých pyrolýzních procesech. Tato pyrolýzní kapalina z rychlých pyrolýzních procesů je nízko viskozitní, tmavě hnědé barvy a s obsahem vody do 15 až 20 %. Při pomalých pyrolýzních procesech je kapalina silně černě nadehtována s obsahem vody do 20 % a s viskozitou pohybující se v oblasti plynových olejů a v oblasti těžkých palivových olejů [32].

Pevným produktem z těchto pyrolýzních produktů je uhlí. V alternativní záměně pyrolýzních uhlí na kapalné produkty spočívá především v drcení a sloučení s vodou a se stabilizátorem. Směs může být také složena z bio-olejů a uhlí, oproti tomu je horší určit celkové materiálové složení směsi. Stabilní a proměnlivé směsi s koncentrací dřevěného uhlí do 60 % je poměrně hojně užíváno v praxi. Směsi také mohou být vyráběné z oleje a s maximální koncentrací dřevěného uhlí do 25 %. Směsi z oleje, dehtu a vody nemají ještě vyřešen problém se stabilitou [32].

Voda v pyrolýzních produktech je jednak produkována z vlhkosti obsažené v biomase a jako reakční produkt z pyrolýz, ta často obsahuje velmi vysokou úroveň organických složek. Tato voda významně ovlivňuje celkový návrh technologického procesu [32].

### **Kapalné produkty pyrolýzy**

Jedná se o vysoce oxidační uhlovodík se znatelným podílem vody z vlhkosti zpracovávané suroviny a ve zpracovávaném produktu. Může obsahovat také pevné uhlí. Tento produkt je také relativně nestabilní v chemických a termo-fyzikálních vlastnostech, což může být příčinou problémů v jeho využití v dalším zpracování. Kapalný produkt bio-olej, může být přímo spalován, ale i používán pro jiné účely. Problémy ve využití kapalných produktů jsou zejména v uskladnění, kde se jednotlivé frakce oddělují, polymerizují a mohou korozivně napadat nádrže. Přidáním vyšších oxigenátorů s obsahem vody je neslučitelné s tvorbou paliv, ačkoli této přeměny se může užit i v jiné aplikaci. Přeměna nebo úprava oxigenátorů a vody spočívá v jejich odstranění a stabilizování. Tyto úpravy jsou nezbytné pro produkci paliv, takto upravená paliva jsou poté plně slučitelná se syntetickými palivy. Obsah vody ne nezbytný pro příznivé efekty, a to delší teplotní hodnoty, efekt pH, snížení viskozity, zvýšení chemické a fyzikální stability, snížení případného znečištění a možný efekt na následující upravující procesy. Vzájemné působení obsahu vody na pyrolýzní produkty jsou ještě neověřené. Velké množství vody je nevhodné a to z důvodu jejího následného snížení. Při vypařování nebo destilaci, za účelem snížení obsahu vody, při normální teplotě okolo 100°C nebo i při vyšších teplotách může dojít k fyzikálním a chemickým nenávratným změnám v těchto pyrolýzních kapalinách. Nízké sušící teploty nejsou příznivé na vlastnosti v souvislosti s vodou a organickým složením pyrolýzních kapalin. Tento úkaz také vytváří nároky na obsah vody a oxidačních vlastnostech kapalin v nestabilitě sušiny, ačkoli nedávné výzkumy směřovaly právě k takovým problémům. Užití problémů se zřetelem na obsah vlhkosti se zdá být velice citlivé [32].

### **3.4.2 Jednotlivé pyrolýzní technologie**

Zde je výčet možných pyrolýzních technologií. Převážně z vyspělých zemí, většina je stále ve stádiu pilotních jednotek.

#### **Pyrolýzní reaktor Vortex-Solar Energy Research Institute**

Systém Vortech je určen pro konverzi tuhých organických látek a biomasy především na kapalné produkty. Zařízení je vyvinuto v SERI (Solar Energy Research Institute) v Coloradu (USA). Proud zpracovávaného materiálu je veden tangenciálně do

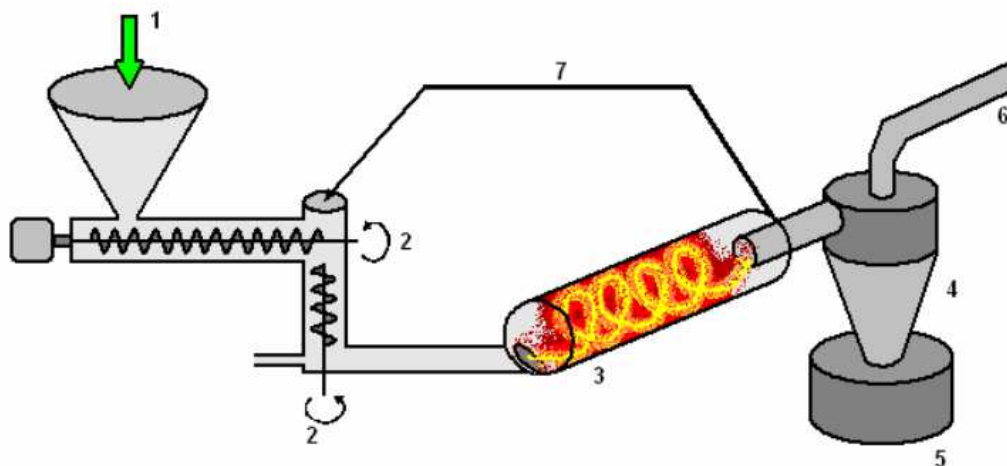


reakčního prostoru, kde kontaktem s horkou stěnou pyrolyzéro a díky obvodové rychlosti přes  $350 \text{ m.s}^{-1}$  dochází k rychlé pyrolýze za teploty stěny  $625^\circ\text{C}$ . Zatímco postup tuhých částic reaktorem je zpomalován intenzivním třením o jeho stěny, vznikající pyrolýzní plyn odchází středem zařízení s velmi krátkou dobou zdržení. Systém byl testován na měkkém suchém dřevu a na měkkých před drcených peletách RDF (Refuse Derived Fuel) [30]. Schéma zařízení je na obrázku č.15.

Z dřeva bylo při hmotnostním toku suroviny  $10,6 \text{ kg.h}^{-1}$  vyprodukováno 10 – 12 % tuhých zbytků, 13 - 16 % vody a reálně 54 % kapalného organického produktu. Z RDF bylo stejným způsobem vyrobeno 44,1 – 41,6 % kondenzátu. Převedení zařízení do provozního měřítká stále naráží na problémy spojené se zanášením reaktoru částicemi s vysokou hustotou a s vysokou energií způsobenou tvrdými anorganickými komponentami přítomných zejména v RDF [54].

*Obr. 15 Schéma pyrolýzní jednotky Vortex*

*1 – vstup suroviny, 2 – šnekový podavač, 3 – reaktor s tangenciálním vstupem, 4 – cyklon, 5 – kolektor tuhého zbytku, 6 – odtah pyroplynu, 7 – recykl prachových částic*



*Zdroj: [30]*

### **Alten (Alternative Energy Technologies)**

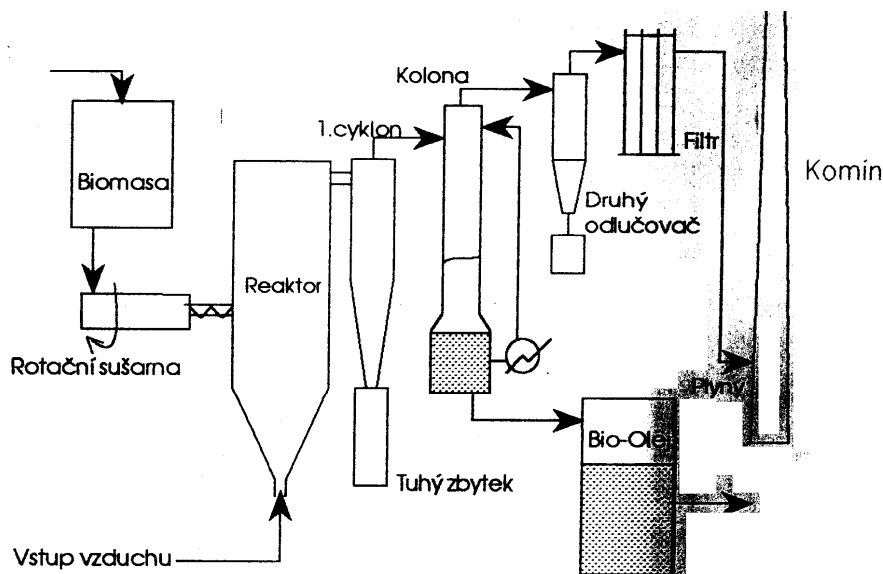
V rámci projektu LEBEN (Large European Biomass Energy Network) bylo financováno studium procesu výroby bio-olejů z biomasy nejdříve v laboratorním

měřítka, později byla vykonstruována pilotní jednotka o kapacitě  $300 - 500 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  na pyrolýzu dřeva a zemědělských odpadů pro výrobu plynu nebo bio-oleje a tuhého uhelného zbytku. Účelem projektu byla alimentace elektrárny o kapacitě 27 MW v Avezzanu (Itálie) [32].

Vybrané a vytříděné biomasy (štěpky, piliny atd.) jsou sušeny v rotační sušárně a vstupují šnekem do fluidního reaktoru s bublacím ložem (schéma pyrolýzního zařízení je znázorněno na obrázku č. 16) . Teplo potřebné pro reakci je dodáno částečným zplyňováním biomasy vzduchem ve spodní části reaktoru. Pyrolýza probíhá za atmosférického tlaku a teplotě kolem  $500^\circ\text{C}$ . Těkavé látky spolu s plyny a uhelnými zbytky vystupují z hlavy reaktoru, projdou cyklónem kde se odloučí tuhé zbytky a dále vstupují do kondenzační sprchové kolony. Těkavé látky se kondenzují proudem vráceného vodního podílu a separovaný bio-olej vstupuje do zásobníku. Plyny se odprašují v druhém cyklónu, následně ve filtru a spalují se v komíně [32].

V demonstračním měřítku by část odcházejícího plynu recyklovala a vstoupila do sušárny pro sušení vstupního materiálu, další část plynu by se ochladila na teplotu  $30^\circ\text{C}$  a vstoupila by do motorů na výrobu elektrické energie. Tuhý zbytek separovaný v cyklónu by byl spálen ve spalovací komoře a použit jako zdroj tepla pro reaktor [32].

Obr. 16 Schéma pyrolýzního zařízení



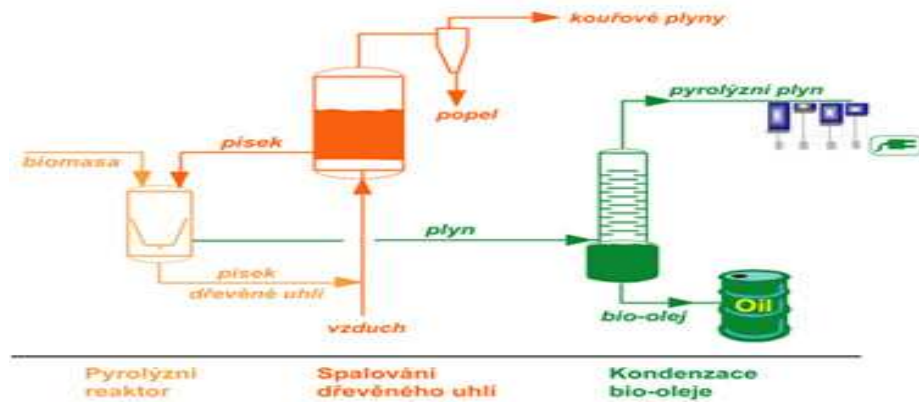
Zdroj: [32]

Procentuální obsah vytěženého bio-oleje se pohybuje mezi 20 – 25 % a je přibližně ve stejném poměru jako tuhý zbytek 20 %. Bio-olej má hnědočernou barvu je viskózní a obsahuje asi 10 % tuhého nedopalu a 15 % vlhkostí. Výhřevnost tuhého zbytku je  $29,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . Největší komplikace, které nastaly, byly: udržení konstantních teplot v reaktoru, udržení konstantní rychlosti fluorizace, přítomnost tuhého zbytku v bio-oleji, odpadní voda [32].

### **Technologie BTG**

Tato technologie je patentována společností BTG je založena na intenzivním promíchávání biomasy s horkým pískem ve speciálním rotujícím kuželovém reaktoru (schéma technologie je na obrázku č. 17). V takto navrženém reaktoru není nutné profukovat biomasu inertním plynem, důkladné promíchání vstupní biomasy je dosaženo mechanickým mícháním. Díky tomu je celý systém zjednodušen a minimalizován, navíc nedochází k naředění plynů vznikajících v reaktoru. Inovační reaktor je výsledkem výzkumu prováděném na nizozemské universitě Twente, jehož koncept společnost BTG rozvinula a zoptimalizovala. Plyn z reaktoru je následně prudce zchlazen v kondenzátoru, čímž vznikne pyrolýzní olej a menší množství pyrolýzního plynu. Primárními produkty procesu jsou pyrolýzní olej, kterého může být až 75 % váhového množství vstupní suroviny, tuhá složka (dřevěné uhlí) a pyrolýzní plyn využitelný pro energetické účely. Biomasa je přeměněna během několika sekund. Písek je společně s dřevěným uhlím dopraven do spalovacího zařízení, kde je spálením dřevěného uhlí ohřát na původní teplotu, a následně znovu použit v reaktoru [55].

Obr. 17 Schéma technologie BTG



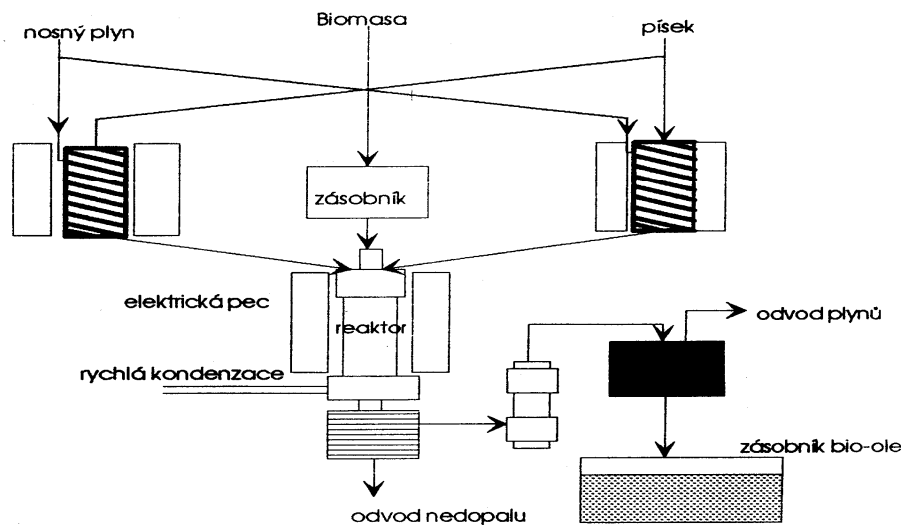
Zdroj: [55]

### **Ensyn (Engineering Associates Inc, Canada)**

Jedná se o projekt transportního reaktoru na výrobu plynů a kapalin, začal již v roce 1986 konstrukcí malého jeden metr dlouhého reaktoru vyhřívaného elektrickou pecí s kapacitou až  $1 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  (schéma pilotní jednotky je znázorněno na obrázku č. 18). Pyrolytický proces byl založen na principu URP (Ultra – rapid Fluidised reaktor). V tomto systému je používáno předem vyhřívaného horkého písku, jako medium pro přestup tepla do částic biomasy, který je spolu s biomasou smíchán v turbulentním režimu hned na vstupu do reaktor. Reakce probíhala při  $650 - 1000^\circ\text{C}$  a doba setrvání částic se pohybuje kolem  $50 - 900 \text{ ms}$ . Zhruba 500 zkoušek bylo prováděno na různých materiálech: celulóza, IEA topol, červený javor, lignin atd. [32].

V rámci programu Evropské společnosti JOULE, roku 1993, směřovaného na tepelnou přeměnu biomasy, Italská společnost ENEL CRT (Ente Nazionale di Energia Elettrica – Centro di Ricerta Termica) ve spolupráci se zemědělskou společností ESAU (Ente di svillupo Agricolo della Regione Umbria), projektovala demonstrační jednotku schopnou zpracovávat  $600 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  biomasy. Dodavatelem technologie se stala firma Enzym, která projektovala, konstruovala, postavila a vyzkoušela toto zařízení v Kanadě. Dnes bude transportována a lokalizována přes ENEL Bastardov oblasti Gualdo Cattaneo, Perugia Itálie). Jiná demonstrační jednotka o kapacitě  $1 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$  je dodáváno do USA [32].

Obr. 18 Schéma pilotní jednotky



Zdroj: [32]

Vysušené a slisované 3x2 cm výlisky jsou vyvezeny ze skladu do velkého zásobníku, jehož kapacita je cca 15 m<sup>3</sup> a stačí pro kontinuální chod asi na pět hodin. Ze zásobníku je biomasa doprovázena dopravníkem a navážena do vnějšího zásobníku, který je šnekovým podavačem spojen s fluidním reaktorem. Biomasa vstupuje do horkého proudu fluidního média (písek je fluidizován plynem získaným spalováním tuhého uhelného zbytku ve spalovací komoře). V generátoru probíhá pyrolýza při 500 °C. Všechny produkty spolu s pískem odcházejí z horní části generátoru. Vzniklé těkavé páry, plyny a tuhé zbytky spolu s pískem vystupují z generátoru a přicházejí do cyklónových odlučovačů. Zde se pevná frakce odděluje a vstupuje přes šnekový podavač do spalovací komory, kde je spálením uhlíku (nedopalu) vzduchem ve fluidním režimu získána tepelná energie potřebná k zahřátí písku a přenosu tepla k pyrolýze biomasy. Plynné a těkavé látky vystupují z druhého odlučovače a vstupují do první a druhé kondenzační kolony. Kondenzovaný kapalný podíl je čerpán ze spodní části kolony, chlazen ve výměníku a recyklován zpět do kolony, kde probíhá kondenzace vstupních těkavých par a plynů. Zbylé kapičky se oddělí v odkapávači a plyn se ještě odpráší ve filtru. Vyrobený čistý plyn je komprimován kompresorem: část plynu je vrácena, spalována ve spalovací komoře a část je recyklována do pyrolytického reaktoru [32].

## 4 Zhodnocení jednotlivých metod energetického využití tuhých biopaliv

Tato kapitola obsahuje zhodnocení jednotlivých metod energetického využití tuhých biopaliv. Nejprve je zde nastíněno porovnání základních termochemických metod, následuje porovnání z hlediska životního prostředí a výhřevnosti. Nejdůležitější data jsou shrnuta v tabulkách.

### 4.1 Porovnání základních termochemických metod

Následující tabulka (tab. 5) porovnává základní termochemické metody zpracování biomasy, z hlediska technologie, předchozích kroků, spotřeby kyslíku, množství vzduchu, teploty, doby setrvání paliva, produktů a využití výsledných produktů.

Tab. 5 Porovnání termochemických metod

	Spalování	Zplyňování	Pyrolýza
<b>Popis technologie</b>	Chemický pochod, kde se slučují hořlavé prvky obsažené v hořlavině paliva s kyslíkem a dochází k uvolňování tepla	Termochemická přeměna uhlíkatého materiálu za pomoci zplyňovacího média	Termický rozklad v palivu obsažených organických prvků bez vzduchu
<b>Předcházející kroky</b>	Sušení, zplyňování, spalování plynů	Sušení, pyrolýza, redukce, oxidace (spalování)	Sušení, suchá destilace, fáze tvorby plynu
<b>Spotřeba kyslíku</b>	Stechiometrická až nadstechiometrická	Podstechiometrická	Nulová
<b>Přebytek vzduchu</b>	$\geq 1$	$> 1$ (0,2 – 0,5)	0 (teoreticky) < 0,2 (prakticky)
<b>Teplota [°C]</b>	800 - 1300	700 - 900	400 – 700 (1000)
<b>Doba setrvání paliva</b>	Hodiny až dny	Minuty až hodiny	Sekundy
<b>Produkty</b>	Spaliny, popel, struska	Syntézní plyn, dehty, popel, struska	Pyrolýzní plyn, pyrolýzní olej, odpařené voda, koks

<b>Využití</b>	Výroba horké vody pro topení, nebo páry a horkých plynů pro výrobu elektrického proudu	Syntézní plyn jako základ, příklad využití jako palivo	Plynová turbína, bio-olej jako náhrada za motorová paliva, vytápění
----------------	--	--	---

*Zdroj: Vlastní tvorba*

## 4.2 Z hlediska životního prostředí

Z hlediska životního prostředí se ukazuje zplyňování jako šetrnější metoda, má hned několik výhod oproti spalování. Nejprve emise síry a oxidy dusíku a stejně tak i částice, které vznikají při zplyňování, jsou výrazně redukovány díky nutnosti čištění výsledného plynu. Vznikající sloučeniny dusíku a síry jsou odstraněny v navazujících procesech produkující čistý plyn, z důvodu jeho dalšího využití. Z toho vychází, že výsledný plyn, který je spálen v plynové turbíně na výrobu elektřiny nebo v kotli na výrobu tepelné energie, má výrazně nižší produkci oxidů síry a dusíku. Další významnou výhodou je, že se při zplyňování neformuje furan a PCB s dioxinovými sloučeninami. Spalování biomasy je značným zdrojem těchto vysoce toxických a karcinogenních látek. U bio-oleje produkovaného hlavně rychlou pyrolýzou je důležitý faktor obsah vody, který se pohybuje v rozmezí 15 – 30 %, voda snižuje viskozitu, což usnadňuje samotnou přepravu a čerpání, hlavní funkcí obsažené vody je však zvýšit stabilitu a snížit teplotu spalování, čímž docílíme snížení emisí během spalování. Během pyrolýzního postupu se dá říci, že nevznikají žádné emise, ty mohou nastat až v následném využívání výsledných produktů pyrolýz.

## 4.3 Z hlediska výhřevnosti

U spalování může výhřevnost zcela zdravého a suchého dřeva dosahovat až  $18,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . To je asi necelá polovina výhřevnosti ropných paliv. Ve skutečnosti však biomasa vždy obsahuje nejméně 10 % vody, v průměru má dřevo i štěpka provětrávané a skladované pod střechou asi 30 % vlhkosti. Při hoření se tato voda odpařuje a tím snižuje základní výhřevnost sušiny biomasy. Při obsahu vody 10 % je výhřevnost u dřeva  $14,3 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , u 30 % vody je výhřevnost  $12,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$  [6].

Výhřevnost výsledného plynu u zplyňování biomasy je dána nejen obsahem vody, ale i použitou technologií. Při autotermním zplyňování (přímé zplyňování) musí být do reaktoru přiváděn kyslík, aby docházelo k potřebným spalovacím exotermním reakcím, které pokrývají potřebu tepla pro zplyňování. Nejčastěji je používán vzdušný kyslík, což má ale za následek naředění produkovaného plynu dusíkem ze vzduchu a tedy i snížení obsahu výhřevných složek. Výhřevnost plynu při autotermním zplyňování se tedy pohybuje v rozmezí 2,5 – 8 MJ.kg<sup>-1</sup> (u dřeva obsah vody < 20 %). Při alotermním (nepřímém) zplyňování je produkován plyn o vyšší výhřevnosti až 14 MJ.kg<sup>-1</sup>. Nevýhodou je nutnost zajistit přísun tepla, což vyžaduje složitější zařízení s vyššími investičními náklady. Zplyňovací médium je v tomto případě nejčastěji vodní pára [14].

Pyrolýzu dále dělíme na rychlou a pomalou pyrolýzu. Přičemž předmětem rychlé pyrolýzy je dosažení vysokého obsahu kapalného podílu (až 75 % hmot.) při relativně nízkých teplotách (okolo 500°C), zde je výhřevnost výsledné kapaliny 17 - 23 MJ.kg<sup>-1</sup>. Případně vysokého obsahu plynného podílu (70 – 80 % hmot.) při vyšších teplotách (800-900°C), zde je výhřevnost výsledného plynu 10 – 20 MJ.kg<sup>-1</sup> [32]. Nejčastější využití pomalé pyrolýzy je pro výrobu dřevěného uhlí (35 % hmot.). Pomalá pyrolýza má teplotu reakce menší než 400°C [53]. Výhřevnost dřevěného uhlí je cca 30 MJ.kg<sup>-1</sup>.

*Tab. 6 Porovnání výhřevnosti jednotlivých technologií*

Technologie	produkty	výhřevnost [MJ.kg <sup>-1</sup> ]
Spalování		12,2 – 18,5
Zplyňování - autotermní	Plyn	2,5 – 8
Zplyňování – alotermní	Plyn	až 14
Rychlá pyrolýza – nízkoteplotní	Kapalina	17 - 23
Rychlý pyrolýza – vysokoteplotní	Plyn	10 - 20
Pomalá pyrolýza	Dřevěné uhlí	30

*Zdroj: Vlastní tvorba*



## 5 Závěr

Po přečtení této bakalářské práce by měl být čtenář seznámen se základy termochemických metod zpracování tuhé biomasy. V práci je obsažen základní přehled těchto metod, jedná se zejména o spalování, zplyňování a pyrolýzu.

Spalování je stále nejvyžívanější metoda energetického využívání biomasy. Technologie spalování je dokonale zpracována a pro investory představuje minimální riziko. Nespornou výhodou spalování biomasy je, že nevyžaduje předběžnou speciální úpravu biomasy.

U zplyňování mluvíme o přeměně tuhého paliva na plyn, čímž zvyšujeme použitelnost paliva pro různé tepelné stroje, ale zároveň usnadňujeme přepravu a skladování. Lze tedy říci, že hlavní výhoda zplyňování spočívá v přeměně druhotných surovin na užitečný plyn. I přes tyto nesporné výhody se stále používá přímé spalování, protože zplyňování není dokonalé. Produkovaný plyn je nutné složitě čistit z důvodu produkce dehtů. Stále hlavním důvodem, proč se neupustilo od přímého spalování, je cena zplyňovacích zařízení.

Pohled na pyrolýzu se v poslední době radikálně změnil a většina prací publikovaných v této oblasti sleduje cíl maximalizovat výtěžnost kapalných produktů. Koks a plynné produkty se považují za vedlejší nebo dokonce nežádoucí. Z tohoto důvodu se jako nejpreferovanější skupinou technologií stává rychlá pyrolýza. Proces výroby bio-olejů pyrolytickou cestou je dnes zvládnutelný. Ovšem produkovaný bio-olej nemá zatím zcela komerční charakter, protože je stále ve fázi výzkumu a zkoušení. Avšak jeho ekonomická bilance se zdá být perspektivní. Jedná se o stabilní kapalné biopalivo, které lze, na rozdíl od biomasy nebo jiných objemných energetických surovin, snadno skladovat a přepravovat. Jeho energetická hustota je 4 – 5x vyšší než u vstupní suroviny, což výrazně usnadňuje logistiku. Zatím je hlavní využití bio-oleje v oblasti biochemie, probíhá výzkum jeho užití i jako náhradního paliva, např. po úpravě pro pohon pomaloběžných lodních a podobných dieselových motorů nebo spalovacích turbín.

Co se týče emisí vznikajících při energetickém využití biomasy, je množství produkovaných emisí závislých především na kvalitě spalovacího procesu, méně pak na

typu paliva. Podstatné snížení emisí bude s největší pravděpodobností možné hlavně úpravou spalovacích podmínek a konstrukcí spalovacích zařízení. Případnou další cestou ke snižování emisí je právě hledání nových technologií, které přinášejí zjednodušení samotného spalovacího procesu. Zde se jako nejvhodnější technologie jeví rychlá pyrolýza a zplyňování s následným spalováním vzniklých produktů. Spalování plyných a kapalných paliv je procesem daleko méně náročným a konstrukčně jednodušším.

## 6 Seznam literatury

- [1] *Ministerstvo životního prostředí* [online]. © 2008 - 2012 [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: <[www.mzp.cz](http://www.mzp.cz)>.
- [2] Biomasa. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 22. 12. 2011 [cit. 2012-03-07]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Biomasa>>.
- [3] MURTINGER, K., BERANOVSKÝ J. *Energie z biomasy*. Brno: Computer press a.s., 2011, 106 s. ISBN 978-80-251-2916-6
- [4] Biopalivo. *Sluko energy* [online]. 2011 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z: <<http://www.slukoenergy.cz/biopalivo>>.
- [5] ČSN 14961-1. *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv: Část 1: Obecné požadavky*. ÚNMZ, červen 2010, 54 s.
- [6] PASTOREK, Z., KÁRA J., JEVIČ P. *Biomasa - obnovitelný zdroj energie*. FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5
- [7] JAKUBES, J., BELLINGOVÁ H. ŠVÁB M. *Moderní využití biomasy: Technologické a logistické možnosti*. [online]. 2006, 61 s. [cit. 2012-01-12]. Dostupné z: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf>>.
- [8] BALÁŠ, M, MOSKALÍK J. *Měření vlhkosti paliv*. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“, VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
- [9] MATUŠKA, T. *Biomasa* [online]. 2011 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <[http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/P9-biomasa\\_spalovani.pdf](http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/P9-biomasa_spalovani.pdf)>.
- [10] SLADKÝ, V. *Metody a principy spalování biopaliv*. [online]. [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: <<http://stary.biom.cz/biom/8/02.html>>
- [11] MURTINGER, K. *Dřevo a jeho spalování*. In: [online]. 2006 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <<http://www.topenidrevem.cz/index.php?page=clanek&rid=5359ebbbcaa94bf171c951f2614090d88&cid=4524cab599676>>.
- [12] TOMAN, Z. Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>>. ISSN: 1801-2655

- [13] PETŘÍKOVÁ, V. Biomasa – významný zdroj ekologické energie. *Biom.cz* [online]. 2001-11-08 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-vyznamny-zdroj-ekologicke-energie>>. ISSN: 1801-2655
- [14] POHOŘELÝ, M., JEREMIÁŠ M. *Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění*. Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie, OZE, 2010.
- [15] KNOEF, H.A.M., *Handbook Biomass Gasification*, 2005, BTG biomass technology group BV, The Netherlands, 378 s.
- [16] POHOŘELÝ M., JEREMIÁŠ M., SKOBLJA S. *Alotermní fluidní zplyňování biomasy*. Paliva 1, 2009.
- [17] HOFBAUER: *Fluidized Bed Gasification – State of Technology*. International Conference on Biomass gasification for an efficient provision of electricity and fuels - state of knowledge, Leipzig, 2007.
- [18] OBROUČKA, K. *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001. 140 s. : il. ISBN 80-248-0009-8
- [19] STEVENS, Don J. *Hot Gas Conditioning: Recent Progress With Larger-Scale Biomass Gasification Systems*, NREL Report (NREL/SR-510-29952), USA, 2001.
- [20] HOFBAUER H. *Vergasung - ein Baustein zur Realisierung von Polygeneration*. Symposium Polygeneration, Güssing, 2005.
- [21] POHOŘELÝ M., VOSECKÝ M., HEJDOVÁ P., PUNČOCHÁŘ M., SKOBLJA S., STAF M., VOŠTA J., KOUTSKÝ B., SVOBODA K.: *Gasification of Coal and PET in Fluidized Bed Reactor*. 2006. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236106001542>>.
- [22] JEREMIÁŠ M., POHOŘELÝ M., VOSECKÝ M., SKOBLJA S., KAMENÍKOVÁ P., SVOBODA K., PUNČOCHÁŘ M. *The Influence of Addition of Carbon Dioxide to the Gasification Medium During the Atmospheric Steam Fluidized Bed Gasification on Sand and Limestone*. Energetika a biomasa 2009, Sborník přednášek, 80–93, Praha, 2009.
- [23] HOFBAUER H: *Biomass Steam Gasification – Industrial Experience and Future Prospects*. [online]. 2010 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <[http://www.sgc.se/gasification/resources/01\\_Hermann\\_Hofbauer.pdf](http://www.sgc.se/gasification/resources/01_Hermann_Hofbauer.pdf)>.

- [24] GIL J., AZNAR M.P., CABALLERO M.A., FRANCÉS E., CORELLA J. *Biomass gasification in Fluidized Bed at Pilot Scale with Steam-Oxygen Mixtures*. Product Distribution for Very Different Operating Conditions, *Energy & Fuels* 11, 1109-1118, 1997.
- [25] VÁŇA, J. Ekologická hlediska spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2003-06-30 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/ekologicka-hlediska-spalovani-biomasy>>. ISSN: 1801-2655
- [26] MOTLÍK, J., ŠAMÁNEK L., ŠTEKL J., VÁŇA J., BAŘINKA R., ŠAFAŘÍK M. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice*. In: [online]. 2003 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <[http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/pdf/Obnovitelne\\_zdroje\\_v\\_CR.pdf](http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/pdf/Obnovitelne_zdroje_v_CR.pdf)>.
- [27] KOUTSKÝ, M., MACHNÍKOVÁ, E., HENKEL, M., DITTRICH, M., VOŠTA, J. Emise při spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2002-08-07 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy>>. ISSN: 1801-2655
- [28] DEVI L, PTASINSKI K, FRANS J: *A Review of the Primary Measures for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes*, *Biomass and Bioenergy* 24, str 125-140, 2003.
- [29] VOSECKÝ M., KAMENÍKOVÁ P., POHOŘELÝ M., SKOBLJA S., PUNČOCHÁŘ M. *Vysokoteplotní čištění plynu ze zplyňování biomasy na niklovém prereformingovém katalyzátoru*. Sborník Energie z biomasy IX., Brno, 2008 str. 108-113
- [30] STAF, M. Výzkum termické konverze odpadní biomasy na plynná a kapalná paliva. *Biom.cz* [online]. 2005-01-12 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyzkum-termicke-konverze-odpadni-biomasy-na-plynna-a-kapalna-paliva>>. ISSN: 1801-2655
- [31] BARGER, A. *Pyrolýza biomasy*. Praha, 2008. Bakalářská práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Buryan, DrSc.
- [32] MALAŤÁK, J., JEVIČ P. *Přehled pyrolýzních technologií pro zpracování biomasy* [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://odpady.tf.czu.cz/p/pz.pdf>>.
- [33] BRIDGWATER, A., MEIER, D., RADLEIN, D. *An overview of fast pyrolysis of biomass*. *Organic Geochemistry*. 1999, 30 s. 1479 – 1493.

- [34] MOTLÍK, J., VÁŇA, J. Biomasa pro energii (2) Technologie. *Biom.cz* [online]. 2002-02-06 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energii-2-technologie>>. ISSN: 1801-2655
- [35] JUCHELKOVÁ, D., RACLAVSKÁ, H. *Energetické využití biomasy*. [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2009. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <[http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD\\_Biomasa\\_nove/Index.html](http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Index.html)>.
- [36] RAJVANSHI, Anil K. *Alternative Energy in Agriculture*. [online]. India: CRC Press, 1986. Biomass gasification, pgs. 83-102. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://nariphaltan.virtualave.net/gasbook.pdf>>.
- [37] REZAIYAN, J. *Gasification technologies*. [online]. India: CRC Press, 2005. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z www: <<http://books.google.cz/books?id=GdOP5mrKT-oC>>.
- [38] BAJUS, M. *Energia z biopalív druhej generácie a biorafinérií*. [online]. 2008, 12 s. Aprochem 2008 – odpadové fórum. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <[http://www.petroleum.cz/upload/aprochem2008\\_ap\\_05.pdf](http://www.petroleum.cz/upload/aprochem2008_ap_05.pdf)>.
- [39] HIGMAN, CH., van der BURGHT, M. *Gasification*. [online]. Amsterdam: Gulf professional publishing, 2008. [cit.2012-02-14]. Dostupné z: <[http://books.google.cz/books?id=IjIMBi\\_Q6kIC](http://books.google.cz/books?id=IjIMBi_Q6kIC)>.
- [40] HAVRÁNKOVÁ, E. *Odpady obsahující uhlík jako alternativa biomasy - obnovitelného surovinového zdroje pro chemický průmysl*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Doc. RNDr. Pavel Pazdera, CSc.
- [41] BASU, P. *Combustion and gasification in fluidized beds*. [online]. India: CRC Press, 2006. [cit. 2011-17-12]. Dostupné z: <<http://books.google.cz/books?id=E1M7eiCNZN4C>>.
- [42] SKÁLA, Z., OCHODEK, T. *Energetické parametry biomasy*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007, 91 s. ISBN-978-80-214-3493-6
- [43] OCHODEK, T., KOLONIČNÝ J., BRANC M. *Metodická příručka ke studiu: Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy* [online]. 1. vydání. Ostrava, 2007, 30 s. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <<http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka2.pdf>>.
- [44] OLOFSSON I., NORDIN A., SODERLING U. *Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for most-efficient medium-scale gasification for biomass to liquid fuel*, University of Umeå, 2005, ISSN 1653-0551

- [45] U. S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. *Biomass Combined Heat and Power Katalog of Technologies* [online]. 2007, 123 s, pgs. [cit. 2011-28-11]. Dostupné z: [http://www.epa.gov/chp/documents/biomass\\_chp\\_catalog.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/biomass_chp_catalog.pdf).
- [46] VÁŇA, J. Biorafinerie – zařízení pro trvale udržitelný život na této planetě. *Biom.cz* [online]. 2004. [cit. 2012-02-6]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biorafinerie-zarizeni-pro-trvale-udrzitelny-zivot-na-teto-planete>. ISSN: 1801-2655
- [47] SPEIGHT, J. *Synthetic fuels handbook: Properties, process and performance* [online]. USA: The McGraw-Hill Companies, 1976. [cit. 2011-28-04]. Dostupné z www: <http://books.google.cz/books?id=E3pgqnGgHjIC>. ISBN-978-0-07-149023-8
- [48] KOVÁCS, J. *What are the main characteristics of fluidised bed combustors?* [online]. 1. vyd. 2001 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.handbook.ifrf.net/handbook/cf.html?id=87>.
- [49] SKUPINA ČEZ: *Obnovitelné zdroje energie a jejich možnosti uplatnění v České Republice* [online]. [cit. 2012-26-3]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vzdelavani/pro-profesionaly/odborne-publikace.html>.
- [50] U. S. Environmental Protection Agency. *Biomass conversion technologies* [online]. [cit. 2012-05-3]. Dostupné z: [http://www.epa.gov/chp/documents/biomass\\_chp\\_catalog\\_part5.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/biomass_chp_catalog_part5.pdf).
- [51] MOZAFFARIAN, M., DEURWAARDER, E. P., KERSTEN, S. R. A. „Green gas“ (SNG). *Production by supercritical gasification of biomass*. [online]. 2004, 71 pgs. [cit. 2011-14-12]. Dostupné z: <http://www.biosng.com/fileadmin/biosng/user/documents/reports/c04081.pdf>.
- [52] KOLONIČNÝ, J., HORÁK J., PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ S. *Kotle malých výkonů na pevná paliva* [online]. 1. vyd. Ostrava, 2011 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.iczt.cz/cs/doc/kotleMV.pdf>. ISBN 978-80-248-2542-7
- [53] OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., BRANC, M. *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*. VŠB-TU Ostrava, 2007, 230 s. ISBN 978-80-248-1426-1

- [54] LADOMERSKÝ, J., DZURENDA L., PAJTÍK J., LONGAUER. J. *Spalovanie drevného odpadu z ekologického a energetického kladiska*. 1. vyd. Technická univerzita vo Zvolene, 1993, 68 s. ISBN 80-228-0285-9
- [55] DIEBOLD, J. *Fast Pyrolysis of RDF to produce oils, char and metal-rich by-products*. Ibid. 61
- [56] Technologie BTG pro rychlou pyrolýzu. *BTG central europe* [online]. 2009 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <<http://www.btg.cz/cz/o-biomase/rychla-pyrolyza/technologie-btg-pro-rychlou-pyrolyzu>>.



## 7 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1. <i>Prognóza výroby energie z OZE</i> .....	2
Obrázek 2. <i>Závislost vlhkosti na výhřevnosti biomasy</i> .....	11
Obrázek 3. <i>Schéma spalovacího procesu</i> .....	13
Obrázek 4. <i>Princip zplyňování</i> .....	15
Obrázek 5. <i>Autotermní a alotermní zplyňování</i> .....	16
Obrázek 6. <i>Primární a sekundární opatření</i> .....	18
Obrázek 7. <i>Schéma ohniště kotle CRE</i> .....	23
Obrázek 8. <i>Schéma kotle s hořákem a se zásobníkem</i> .....	24
Obrázek 9. <i>Krbová kamna, konstrukce ohniště</i> .....	26
Obrázek 10. <i>Schéma automatického kotle</i> .....	27
Obrázek 11. <i>Zplyňovací generátory s pevným ložem</i> .....	31
Obrázek 12. <i>a) generátor s bublinkovým ložem, b) generátor s cirkulujícím ložem</i> .....	33
Obrázek 13. <i>Schéma unášivé lože</i> .....	35
Obrázek 14. <i>Primární produkty a jejich využití</i> .....	38
Obrázek 15. <i>Schéma pyrolýzní jednotky Vortex</i> .....	41
Obrázek 16. <i>Schéma pyrolýzního zařízení</i> .....	42
Obrázek 17. <i>Schéma technologie BTG</i> .....	44
Obrázek 18. <i>Schéma pilotní jednotky</i> .....	45
Tabulka 1. <i>Obsah prchavé hořlaviny</i> .....	10
Tabulka 2. <i>Příklady složení výsledného plynu</i> .....	17
Tabulka 3. <i>Parametry rychlé a pomalé pyrolýzy</i> .....	20
Tabulka 4. <i>Možnosti a charakteristika z pyrolýzního zpracování</i> .....	36
Tabulka 5. <i>Porovnání termochemických metod</i> .....	46
Tabulka 6. <i>Porovnání výhřevnosti jednotlivých technologií</i> .....	48