

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta tropického zemědělství



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta tropického
zemědělství**

Analýza procesu pyrolýzy rostlinné biomasy

Bakalářská práce

Praha 2016

Vedoucí bakalářské práce:
Ing. Tatiana Ivanova, Ph.D.

Vypracovala:
Karolína Jičínská

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza procesu pyrolýzy rostlinné biomasy“ vypracovala samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce. Veškerou použitou literaturu a další zdroje jsem uvedla v referencích.

V Praze dne.....

.....

Poděkování

Ráda bych věnovala poděkování Ing. Tatianě Ivanové, Ph.D. za podporu při psaní této bakalářské práce a za cenné rady.

Abstrakt

Analýza procesu pyrolýzy rostlinné biomasy

Spotřeba fosilních paliv v současné době roste a jejich spalováním se uvolňuje velké množství škodlivých látek do ovzduší. Znečištěné prostředí a rychlé vyčerpávání fosilních paliv vede k vzrůstajícímu využívání obnovitelných zdrojů energie. Mezi tyto zdroje patří biomasa, která může být pomocí termochemických a biochemických procesů přeměněna na materiál/produkt s vyšší energetickou hodnotou. Slibným termochemickým procesem je právě pyrolýza. Je to proces, kde na materiál působí teplota bez přístupu medií obsahující kyslík.

Tato bakalářská práce na téma „Analýza procesu pyrolýzy rostlinné biomasy“ byla napsána formou literární rešerše na základě vyhledávání a analýzy informací především z vědeckých článků ze světových databází. V práci jsou shrnuty základní poznatky o pyrolýze, dále analyzovány a porovnány různé pyrolýzní procesy. Hlavními procesy jsou především pyrolýza pomalá a rychlá, ale také pražení. Tyto procesy jsou zhodnoceny a popsány včetně technologií (reaktorů), které jsou v současné době využívány. Procesem pyrolýzy lze zpracovat různé druhy materiálů na bázi uhlíku, ale nejčastěji se využívá biomasa. Práce zahrnuje konkrétní příklady vědeckých studií rostlinné biomasy, u kterých byl zkoumán potenciál využití a výstupní produkty. Výstupním materiálem procesu pyrolýzy jsou vždy tři produkty a to kapalný, pevný a plynný produkt. Nejžádanějším produktem pyrolýzy je kapalný produkt tzv. bio olej, který má širokou škálu využití. V poslední části této práce jsou shrnuty výhody, ale také nevýhody procesu pyrolýzy, její energetické a ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova: bio olej, biopaliva, biouhel, pyrolýzní produkty, pyrolýzní technologie, termochemický proces

Abstract

Analysis of the pyrolysis process of plant biomass

Nowadays, there is an increasing consumption of fossil fuels however their combustion is associated with release of great amount of harmful substances into the atmosphere. Polluted environment and the rapid depletion of fossil fuels lead to increasing utilization of renewable energy sources. Biomass, one of these sources, can be transformed by thermochemical and biochemical processes into material/product with a higher energy value. The promising thermochemical process is pyrolysis. It is a process where the temperature heats material without access of media containing oxygen.

This Bachelor Thesis entitled "Analysis of the pyrolysis process of plant biomass" was written as a literary review based on search and analysis of information for scientific articles from the well-known databases. The present Thesis summarized basics of pyrolysis as well as analyzed and compared various pyrolysis processes. The main processes are represented by slow and fast pyrolysis and also torrefaction. These processes are reviewed and evaluated, including technologies (reactors) that are nowadays applied. By pyrolysis process various kinds of carbon-based materials can be treated, however biomass is most commonly used for these purposes. Specific examples of scientific studies of plant biomass, which tested a potential use and output products, are also presented. The output of pyrolysis process consists of three products, namely liquid, solid and gaseous substances. The most desired output of pyrolysis is a liquid product, called as biooil, which has a wide range of utilization. In the last part of the Thesis advantages and disadvantages of the pyrolysis process and its energy and economic evaluation are presented.

Keywords: biooil, biofuels, biochar, pyrolysis products, pyrolysis technology, thermochemical process

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíle práce	2
3. Metodika	2
4. Literární rešerše	3
4.1. Základy pyrolýzy – pyrolýzní technologie	3
4.1.1. Pomalá pyrolýza - karbonizace.....	4
4.1.1.1. Technologie pro pomalou pyrolýzu	4
4.1.2. Rychlá pyrolýza - zkapalňování	6
4.1.2.1. Technologie pro rychlou pyrolýzu	6
4.1.3. Blesková pyrolýza	11
4.1.4. Hydropyrolýza	11
4.1.5. Vakuová pyrolýza.....	12
4.1.6. Středněteplotní pyrolýza.....	12
4.1.7. Pražení - torrefakce.....	13
4.1.7.1. Technologie pro proces pražení	14
4.2. Děje probíhající při procesu pyrolýzy	16
4.2.1. Procesy pyrolýzy biomasy	17
4.3. Produkty pyrolýzy	17
4.3.1. Pevný zbytek	17
4.3.2. Pyrolýzní plyn	18
4.3.3. Kapalný produkt	18
4.4. Vhodné materiály pro pyrolýzu	20
4.4.1. Biomasa	20
4.4.2. Studie procesu pyrolýzy rostlinné biomasy	21
4.5. Zhodnocení procesu pyrolýzy – ekonomické a energetické hledisko	26
4.5.1. Výhody	26

4.5.2. Nevýhody	28
5. Závěry.....	29
6. Reference.....	30

Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnutí vlastností reaktorů pomalé pyrolýzy.....	6
Tabulka 2: Shrnutí vlastností reaktorů pro rychlou pyrolýzu.....	11
Tabulka 3: Vlastnosti materiálů vhodných pro spoluspalování s biomasou	13
Tabulka 4: Shrnutí vlastností reaktorů pro pražení	16

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma šnekového reaktoru	5
Obrázek 2: Schéma rotačního kuželového reaktoru	7
Obrázek 3: Schéma technologie BTG	8
Obrázek 4: Schéma fluidního reaktoru	9
Obrázek 5: Schéma ablační pyrolýzy	10
Obrázek 6: Schéma Torbed technologie.....	14
Obrázek 7: Schéma MHF technologie.....	15

1. Úvod

Energie je jednou ze základních potřeb v našem každodenním životě a hraje významnou roli v průmyslových odvětvích jako je doprava a výroba, a i pro mnoho dalších sektorů. Je také důležitá pro vývoj jakékoliv země (Silitonga *et al.*, 2011; Tripathi *et al.*, 2016). Fosilní paliva jsou hlavním zdrojem energie na celém světě. Současná poptávka po fosilních palivech (ropě) činí okolo 94 milionů barelů denně a tato spotřeba nadále roste se zvyšujícím se počtem obyvatel. Přímým spalováním fosilních paliv se uvolní velké množství oxidu uhličitého (CO₂), oxidů dusíku (NO_x) a dalších látek do ovzduší (Chen *et al.*, 2015). Znečištění životního prostředí a rychlé vyčerpávání fosilních palivových zdrojů vede k vyhledávání a využívání obnovitelných zdrojů (Anex *et al.*, 2010). Mezi obnovitelné zdroje energie patří sluneční, větrná, vodní, energie přílivu, geotermální a energie z biomasy, tyto zdroje mohou přispět ke zmírnění skleníkových plynů (Mohammed *et al.*, 2015).

Biomasa je jeden z největších a trvale udržitelných zdrojů energie na světě (Zhang *et al.*, 2010). Velkým potenciálem biomasy je, že jako jediná z dostupných obnovitelných zdrojů obsahuje uhlík. A proto může být přeměněna na kapalné palivo (Mohammed *et al.*, 2015), které je velice žádané díky své široké škále použití. Přeměny biomasy může být dosaženo především pomocí termochemických nebo biochemických procesů. Jedním z termochemických procesů je pyrolýza. Právě tento proces dokáže vyprodukovat tři hlavní produkty jako je pevný, kapalný a plynný produkt (Patel *et al.*, 2016). Pyrolýza je slibná technologie pro přeměnu biomasy k energetickým účelům, pro výrobu chemikálií a především paliv (Johansson *et al.*, 2016).

2. Cíle práce

Cílem práce bylo shrnout a přiblížit základy pyrolýzy a různé pyrolýzní procesy. Dále pak tyto pyrolýzní procesy zhodnotit a porovnat pyrolýzní technologie, které se využívají ve světě, a to s ohledem na technologické řešení, využívané materiály, výstupní produkty a ekonomicko-energetické požadavky.

3. Metodika

Sepsaná literární rešerše se skládá ze tří hlavních částí a to ze základů pyrolýzy, vhodných materiálů a zhodnocení procesu pyrolýzy. Práce byla napsaná podle manuálu pro psaní bakalářské práce FTZ a veškerá literatura je citována podle závazných pravidel FTZ.

Při psaní práce se postupovalo podle následujících metodických kroků:

- 1) Vyhledání odborných článků pomocí klíčových slov jako je bio olej, biopaliva, biouhel, pyrolýzní produkty, pyrolýzní technologie, termochemický proces
- 2) Sepsání literární rešerše na základě studia a analýzy literárních zdrojů, především vědeckých článků z databází Scopus, Web of Science, ScienceDirect a to hlavně z vědeckých časopisů jako je Journal of Analytical and Applied pyrolysis, Fuel Processing Technology, Biomass Bioenergy, Bioresouce Technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews a dalších
- 3) Zhodnocení výhod a nedostatků technologie pyrolýzy biomasy pro energetické účely na základě získaných informací

4. Literární rešerše

4.1. Základy pyrolýzy – pyrolýzní technologie

Pyrolýza spadá do skupiny termických a reduktivních procesů. Je to technologie, kde na materiál působí teplota, která přesahuje rozmezí chemické stability určitého materiálu a zároveň je tento proces bez přístupu médií obsahující kyslík. Je to tedy fyzikálně-chemický proces, při kterém dochází k rozkladu určité suroviny na nízkomolekulární látky a tuhý zbytek (Šejvl, 2013). Pyrolýza se skládá ze tří procesů a to sušení, karbonizace a tvorby plynu (Tripathi et al., 2016). Tímto procesem vzniká materiál, který má vyšší energetickou hodnotu než vstupní materiál. Vždy jsou vyráběny tři produkty, ale jejich poměr se může měnit podle nastavení parametrů pyrolýzy (Akhtar a Amin, 2012). Cílem pyrolýzy je maximální výtěžek kapalných produktů, tedy pyrolýzního oleje. Mezi vedlejší a někdy i nežádoucí produkty patří pevné a plynné produkty (Zámostný a Kurc, 2011), ale i tyto produkty mají své uplatnění. Jednou z výhod pyrolýzy je, že se může provádět i při nižších teplotách než při zplyňování (> 700 °C) nebo spalování (> 900 °C) (Demirbas, 2004).

Proces pyrolýzy je energeticky náročný a velkým potenciálem je, že tímto procesem lze zpracovávat různé druhy materiálů (Prokeš, 2011). Podle Xu *et al.* (2011) lze tepelnou účinnost (TÚ) procesu pyrolýzy vypočítat pomocí následující rovnice:

$$TÚ (\%) = \frac{\text{výhřevnost produktů (bio olej + biouhel + pyrolýzní plyn)}}{\text{výhřevnost vstupního materiálu + spotřeba energie}} \times 100$$

Pyrolýza může být rozdělena podle více kritérií a do několika různých skupin. Teplotní rozmezí může být až do 2 000 °C, a podle Molka (2015) lze proces pyrolýzy rozdělit na několik teplotních rozmezí:

- nízkoteplotní (teplota se pohybuje do 500 °C),
- středněteplotní (v rozmezí 500 – 800 °C),
- vysokoteplotní (teplota je vyšší než 800 °C).

Tripathi, *et al.* (2016) rozdělují procesy pyrolýzy na:

- pomalou pyrolýzu,
- rychlou pyrolýzu,
- blesková pyrolýzu,
- hydropyrolýzu,
- vakuovou pyrolýzu,
- středněteplotní pyrolýzu,
- pražení.

4.1.1. Pomalá pyrolýza - karbonizace

Při pomalé pyrolýze neboli karbonizaci je dosahováno rozmezí teplot 400 °C až 600 °C a tlaku od 0,001 MPa do 0,1 MPa (Molek, 2015). Pomalá pyrolýza se využívá k produkci dřevěného uhlí, k výrobě tepla a elektrické energie (Madsen, 2015). Tento proces je charakterizován pomalou rychlostí ohřevu a dlouhé doby zdržení. Doba zdržení páry je v rozmezí 10 – 30 sekund (Bridgwater, 2012) a rychlost ohřevu je 0,1 – 1 °C za sekundu po dobu pohybující se v rozmezí mezi 5 a 30 minut (Demirbas a Arin, 2002). Technologie pro pomalou pyrolýzu jsou levné a velkou výhodou je, že dokáží zpracovat různé druhy vstupního materiálu. Využití ve větším rozsahu je složité, protože celý proces trvá dlouho díky pomalému přenosu tepla. Pro pomalou pyrolýzu se nejčastěji využívá válcová pec a šnekový reaktor (Trávníček *et al.*, 2015).

4.1.1.1. Technologie pro pomalou pyrolýzu

Válcová pec

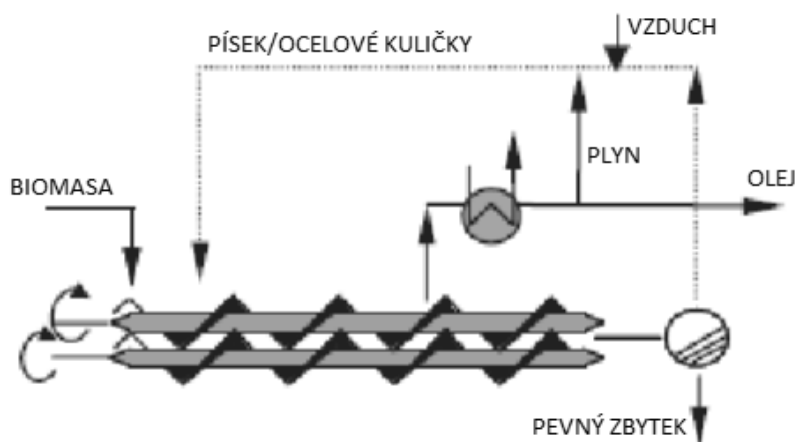
Válcová pec je zařízení pro nepřetržitý provoz. Tato technologie se využívá pro mnoho druhů aplikací jako například spalování nebezpečných odpadů. Stěny reaktoru jsou ohřívány přímo a to párou ohřívané spalinami, anebo nepřímo plynovým nebo elektrickým ohřevem. Tato technologie se také využívá pro proces pražení (Trávníček *et al.*, 2015).

Šnekový reaktor

Tato technologie je také pro nepřetržitý provoz. Zařízení se skládá z jednoho nebo více šnekových šroubů, které mechanicky promíchávají vstupní materiál. Reaktor se ohřívá nepřímou a to pomocí otopné kapaliny. Doba zdržení vstupního materiálu závisí na délce reaktoru a rychlosti otáčení šroubu. Tato technologie je finančně méně náročná než ostatní (Henrich *et al.*, 2016). Výtěžek bio oleje může být v rozmezí 30 – 50 % (Zámostný a Kurc, 2011). Výhodou tohoto reaktoru je, že se mohou použít ocelové kuličky jako medium pro přenos tepla (Joubert *et al.*, 2015).

Šnekový reaktor je využit v technologii Bioliq, která byla vyvinuta v Německu. Pyrolýzní proces probíhá ve dvojitém šnekovém reaktoru, kde se promíchává biomasa s teplotnosným mediem a to buď pískem, nebo ocelovými kuličkami. Výstupní produktem je slurry. Slurry je kapalný produkt s jemnými částicemi polokoxsu. Tento produkt je následně přeměněn pomocí zplyňování na syntézní plyn (Jílková *et al.*, 2012).

Na obrázku 1 je schéma šnekového reaktoru.



Obrázek 1: Schéma šnekového reaktoru

Zdroj: upraveno podle Jílkové *et al.*, 2012

V tabulce 1 je uvedeno shrnutí vlastností reaktorů pro pomalou pyrolýzu.

Tabulka 1: Shrnutí vlastností reaktorů pomalé pyrolýzy

Válcová pec	způsob ohřevu	vzniklou párou nebo elektrickým / plynovým ohřevem
	výhody	více možností využití (proces pražení, spalování nebezpečných odpadů)
	nevýhody	vznikání jemných částic
Šnekový reaktor	způsob ohřevu	nepřímo pomocí otopné kapaliny
	výhody	finančně méně náročný, teplotnosné médium – ocelové kuličky
	nevýhody	tvorba spálenin na horkých zónách

Zdroj: upraveno podle Joubert *et al.*, 2015; Trávníčka *et al.*, 2015

4.1.2. Rychlá pyrolýza - zkapalňování

Rychlá pyrolýza je mírně endotermní jev (Braumakis *et al.*, 2014). Při rychlé pyrolýze je teplotní rozmezí vyšší než u pomalé pyrolýzy, od 450 °C a dosahuje teplot až 1 250 °C (Yang *et al.*, 2016; Tripathi *et al.*, 2016). Tlak je 0,1 MPa (Molek, 2015). Rychlost ohřevu vstupního materiálu je extrémně vysoká a pohybuje se v rozmezí od 10 - 200 °C za velmi krátkou dobu a to 1 - 10 sekund (Tripathi *et al.*, 2016). Aby došlo k tak rychlému přenosu tepla je důležité nejdříve vstupní materiál nadrtit na malé částice (Choi *et al.*, 2012). Tento proces má krátkou dobu zdržení páry a to asi 1 sekundu (Bridgwater, 2012). Používá se pro maximální produkci plyných a kapalných produktů (Molek, 2015). Za příznivých podmínek rychlé pyrolýzy může být výtěžek pyrolýzního oleje až 80 % hmotnosti vstupního materiálu, zatím co výnosy pevného zbytku a pyrolýzního plynu se pohybují okolo 12 % hmotnosti (Bridgwater, 2012). Nejčastěji pro rychlou pyrolýzu se používá fluidní reaktor a to z důvodu velkého výtěžku kapalného produktu (Henkel *et al.*, 2016).

4.1.2.1. Technologie pro rychlou pyrolýzu

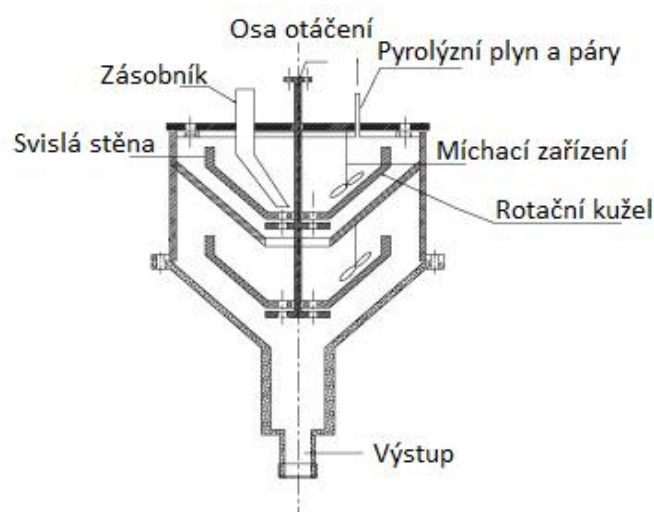
Technologie rotačního kuželového reaktoru

Rotační kuželový reaktor je součástí technologie BTG. Tato technologie je vyvíjena holandskou společností Biomass Technology Group (Jílková *et al.*, 2012). Základem procesu výroby je získání maximálního množství bio oleje neboli pyrolýzního oleje (Molek, 2015), kterého může být až 75 % váhového množství vstupní suroviny. Technologie BTG intenzivně promíchává biomasu s horkým pískem ve speciálním rotujícím kuželovém reaktoru. V reaktoru se vstupní biomasa promíchává mechanicky,

tedy odstředivými silami. Nepoužívá se profukování biomasy inertním plynem z důvodu nechtěného naředění. Plyn z reaktoru je odveden do kondenzátoru, kde je prudce zchlazen, tímto procesem vznikne pyrolýzní olej a malé množství pyrolýzního plynu. Tuhý zbytek, tedy dřevěné uhlí a pyrolýzní plyn, se dále využívá pro energetické účely. Celý proces přeměny biomasy trvá jen několik sekund. Písek a dřevěné uhlí je odvedeno do spalovacího zařízení, kde je písek ohřát pomocí spálení dřevěného uhlí na původní teplotu, a následně písek znovu použit v reaktoru (BTG, 2016). Touto technologií se dají zpracovat různé druhy biomasy a to jak dřevo, slámu, energetické plodiny tak i drůbeží trus (Molek, 2015).

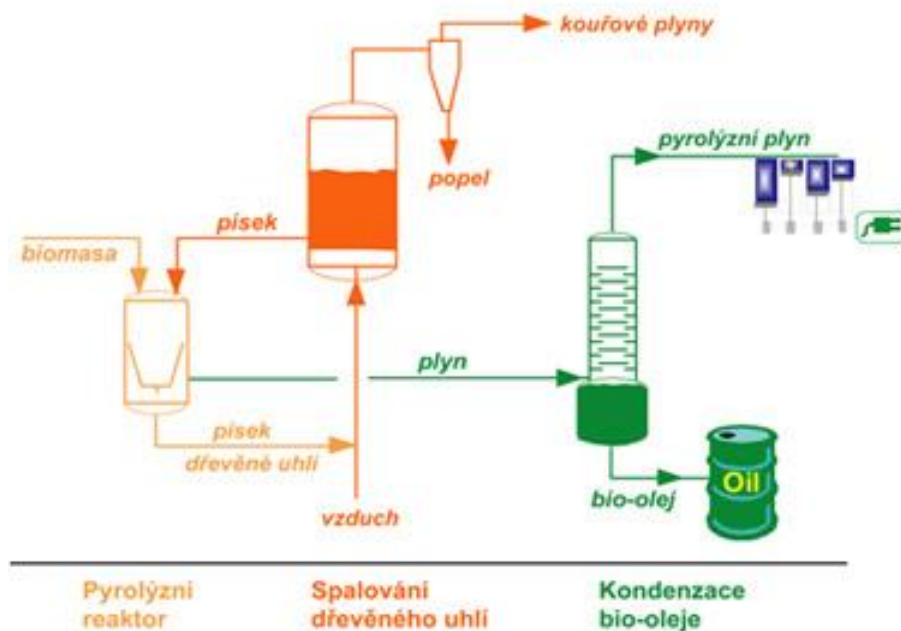
V Nizozemí jsou v provozu dvě pilotní jednotky. Menší jednotka se používá k testování různých druhů biomasy jako vstupní jednotky a dokáže zpracovat 2 až 3 kila biomasy za hodinu. Druhá jednotka je větší a dokáže zpracovat až 200 kilo biomasy za hodinu (Molek, 2015). Další jednotka je v Malajsii. Tato jednotka zpracovává odpadní biomasu z kokosových ořechů, tedy vysušené slupky a vlákna. Získaný pyrolýzní olej má 50 až 60 % váhového množství vstupní biomasy (Jílková *et al.*, 2012).

Na obrázku 2 je znázorněno schéma rotačního kuželového reaktoru a na obrázku 3 je schéma technologie BTG.



Obrázek 2: Schéma rotačního kuželového reaktoru

Zdroj: upraveno podle Guoxin *et al.*, 2008



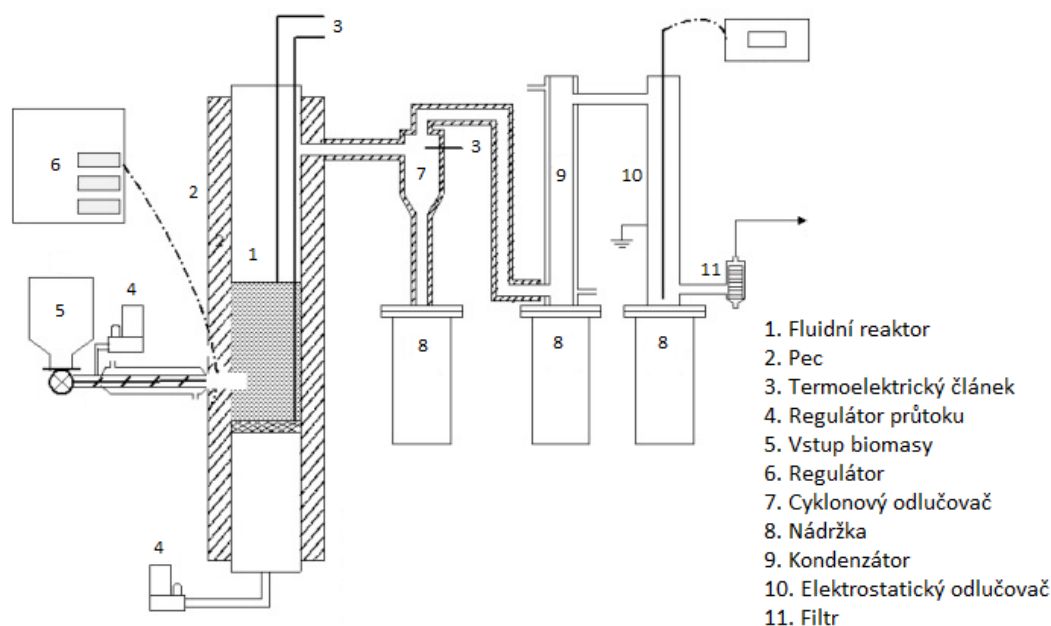
Obrázek 3: Schéma technologie BTG

Zdroj: <http://www.btg.cz/technologie-btg-pro-rychlou-pyrolyzu.html>

Fluidní reaktor se stacionární fluidní vrstvou

Konstrukce i provoz této technologie je jednoduchý. Teplota se v reaktoru dá dobře regulovat. Fluidní reaktor se často využívá s elektrostatickým odlučovačem. Tento odlučovač při provozu hromadí kapalinu, která po desce stéká a vytváří olejnatý produkt. Fluidní zařízení má stabilní výkonost a vysoký výtěžek kapalného produktu a to až 75 % hmotnosti suchého vstupního materiálu. Je nutné, aby vstupní materiál byl nadrcen na přibližně stejnou velikost v rozmezí 2 – 3 mm. Důvodem je přenos tepla, který je neefektivnější při této velikosti částic (Trávníček *et al.*, 2015). Fluidní reaktor je vhodný pro využití ve velkém měřítku. Výhodou je také snadná separace vytvořených produktů (Sharma *et al.*, 2015).

Obrázek 4 znázorňuje schéma fluidního reaktoru.



Obrázek 4: Schéma fluidního reaktoru

Zdroj: upraveno podle Ly *et al.*, 2015

Fluidní reaktor s cirkulující vrstvou fluidního lože

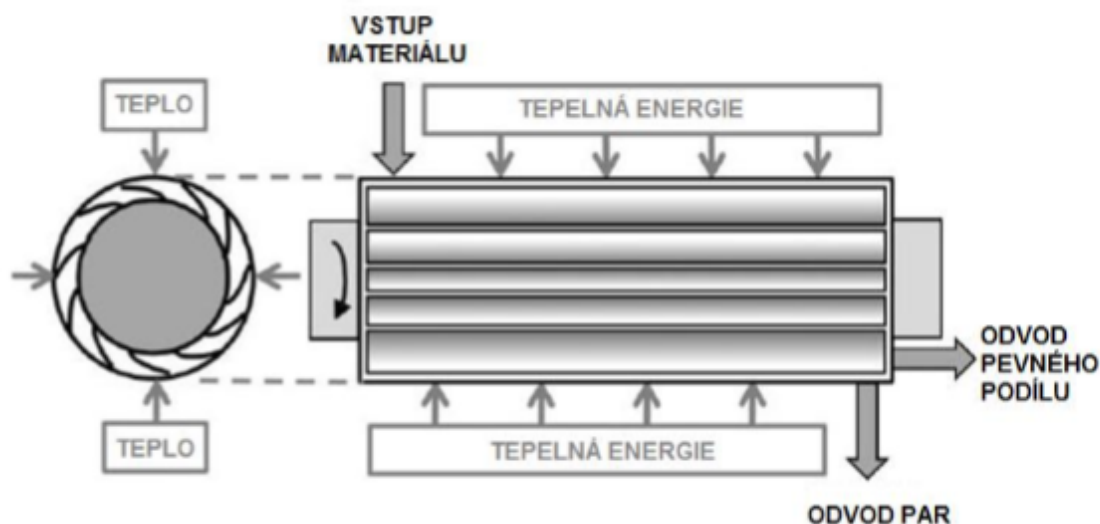
Tato technologie je velmi podobná fluidnímu reaktoru se stacionární fluidní vrstvou jen s rozdílem, že materiál, ze kterého je fluidní lože vytvořeno, je během procesu recyklován. S pomocí elektrostatického odlučovače je tento materiál opět vrácen zpět do fluidního lože (Trávníček *et al.*, 2015). Tento reaktor se nejčastěji používá pro výzkum nebo pro průmyslové využití rychlé pyrolýzy biomasy (Joubert *et al.*, 2015).

Fluidní reaktor s cirkulující vrstvou fluidního lože je využit v technologii Rapid Thermal Processing. Hlavním a žádaným produktem je kapalný, který slouží jako zdroj chemikálií a paliv. Výtěžek kapalného produktu může být až 70 %. Lože tvoří písek, který je s polokoksem spálen v komoře. Tam se polokoks spálí a písek je znovu použit v reaktoru. Nevýhodou této technologie je, že cirkulující plyn musí být čištěn a že dochází k mechanickému opotřebení zařízení (Jílková *et al.*, 2012).

Ablační pyrolýza

Tato technologie se velmi liší od ostatních. Tepelná energie je přenášena pomocí stěn reaktoru tím, že je biomasa v reaktoru stlačena ke stěnám. Vstupní materiál je zahříván na 500 °C (Jílková *et al.*, 2012). Biomasa je z reaktoru odsunuta mechanicky a na stěnách zůstává zbytkový olejový film. Tento film slouží k lubrikaci vstupujícímu materiálu do reaktoru, tam dochází k rychlému odpaření a tím vzniká pyrolýzní plyn. Délka celého procesu závisí na velikosti tlaku biomasy na stěny reaktoru, relativní rychlosti materiálu, velikosti stěn a povrchové teplotě reaktoru. Výhodou technologie je, že mohou být použity větší částice biomasy. Také není zapotřebí interní atmosféra, proto je zařízení menší. Nevýhodou je složité řízení celé technologie (Trávníček *et al.*, 2015). Tento proces pyrolýzy je využit v technologii Biomass-to-Oil (Jílková *et al.*, 2012). Výtěžek bio oleje může být až 75 % (Zámostný a Kurc, 2011).

Na obrázku 5 je schéma ablační pyrolýzy.



Obrázek 5: Schéma ablační pyrolýzy

Zdroj: Trávníček *et al.*, 2015

V tabulce 2 je uveden přehled reaktorů s jejich vlastnostmi, které se využívají pro rychlou pyrolýzu.

Tabulka 2: Shrnutí vlastností reaktorů pro rychlou pyrolýzu

Fluidní reaktor se stacionární vrstvou	Způsob ohřevu	horkým interním (recyklovaným) plynem
	Výhody	dobrá regulace teploty, vysoká rychlost přenosu tepla, jednoduchá technologie
	Nevýhody	nutná malá velikost vstupních částic (pod 2 mm)
Fluidní reaktor s cirkulující vrstvou	Způsob ohřevu	horkým pískem
	Výhody	dobrá regulace teploty, vysoká rychlost přenosu tepla, možné použití větších vstupních částic (do 6 mm), velkokapacitní reaktor
	Nevýhody	komplikovaná hydrodynamika zařízení, obušování popelovin z biomasy, vysoký obsah popelovin v oleji
Rotační kuželový reaktor	Způsob ohřevu	horkým pískem
	Výhody	odstředivá síla pohybuje s obsahem reaktoru (horký písek a biomasa)
	Nevýhody	nutná malá velikost vstupních částic
Ablační (pánvový) reaktor	Způsob ohřevu	stěnou
	Výhody	možné použít větší částice suroviny, není zapotřebí inertní plyn, nízká teplota (< 600 °C)
	Nevýhody	rychlost reakce je omezena přenosem tepla do reaktoru nikoli do biomasy, drahý reaktor → proces musí být v reakční zóně řízen

Zdroj: upraveno podle Trávníčka *et al.*, 2015

4.1.3. Blesková pyrolýza

Blesková pyrolýza je považována za lepší a modifikovanou formu rychlé pyrolýzy. Teplota je mezi 900 a 1 200 °C s velmi krátkou dobou zdržení, která je 0,1 – 1 sekunda. Rychlý ohřev v kombinaci s vysokou teplotou a nízkou dobou zdržení pár vede k vysokému výtěžku kapalného produktu, ale také ke snížení výtěžku pevného produktu. Problém je v konfiguraci reaktoru pro bleskovou pyrolýzu, kde vstupní materiál zůstane velmi krátkou dobu za extrémně vysoké rychlosti ohřevu (Tripathi *et al.*, 2016).

4.1.4. Hydropyrolýza

Hydropyrolýza je relativně nová technologie pro přeměnu biomasy na vysoce kvalitní bio olej. Tento proces by mohl být považován za proces rychlé pyrolýzy jen s rozdílem vysokého tlaku, který je zapotřebí pro vyšší výtěžek pevného produktu. Během tohoto

procesu je tlak vyšší než atmosférický a to v rozmezí 5 – 20 MPa. Rychlost ohřevu, doba zdržení a teplota jsou téměř stejné jako u rychlé pyrolýzy (Tripathi *et al.*, 2016). Hydropyrolýza se často používá s katalyzátorem pro odstranění kyslíku, vody a dalších nežádoucích látek z kapalného produktu (Marker *et al.*, 2012).

4.1.5. Vakuová pyrolýza

Vakuová pyrolýza je tepelná degradace biomasy za nízkého tlaku a v nepřítomnosti kyslíku. Rozsah tlaku během této pyrolýzy je obvykle 0,05 až 0,20 MPa a teplota se udržuje mezi 450 až 600 °C (Carrier *et al.*, 2011). Rychlost ohřevu materiálu ve vakuové pyrolýze je srovnatelná s pomalou pyrolýzou, tedy 0,1 – 1 °C za sekundu (Demirbas a Arin, 2002). Krátká doba zdržení páry organických látek vytvořených během primárního procesu pyrolýzy zajišťuje vysoký výtěžek kapalného produktu. Tento proces pyrolýzy je nákladný z důvodu velkého podtlaku, ale výhodou je, že lze takto zpracovávat i větší částice vstupního materiálu (Tripathi *et al.*, 2016).

Tento proces využívá technologie Pyrovac, která byla vyvinuta v Kanadě na University of Laval and Pyrovac. V zařízení je kombinovaná pomalá a rychlá pyrolýza. Biomasa je nejprve pomalu zahřívána pomocí taveniny solí, které jsou ohřáty spálením vyprodukovaného pyrolýzního plynu. Poté jsou vzniklé produkty pomocí vakua rychle odvedeny (Jílková *et al.*, 2012).

4.1.6. Středněteplotní pyrolýza

Tento typ pyrolýzy se obecně používá pro rovnovážný výtěžek kapalných a pevných produktů. Pomalá pyrolýza vytváří vyšší výnos pevného než kapalného produktu, zatímco rychlá pyrolýza naopak. Provozní podmínky pro středněteplotní pyrolýzu jsou v rozmezí mezi pomalou a rychlou pyrolýzou, tedy mezi 500 až 650 °C. Tlak během procesu je 0,1 MPa. Podmínky středněteplotní pyrolýzy zabraňují tvorbě vysokomolekulárních dehtů. Tento proces produkuje kvalitní bio olej a suché spaliny, které jsou vhodné pro použití v zemědělství nebo pro výrobu energie. Rychlost ohřevu materiálu se pohybuje v rozmezí 0,1 a 10 °C za minutu s dobou zdržení mezi 300 - 1000 sekund. Výhodou této pyrolýzy je, že na rozdíl od rychlé pyrolýzy kapalně produkované neobsahují vysoké množství reaktivního dehtu a může být použit přímo v kotlích a motorech (Tripathi *et al.*, 2016).

4.1.7. Pražení - torrefakce

Pražení je tepelná úprava biomasy, kde dochází k odpaření vlhkosti a lehkých těkavých látek. Při tomto procesu je průměrná teplota relativně nízká a to 200 – 350 °C (Wannapeera a Worasuwannarak, 2015). Výstupní materiál má nižší spotřebu energie při dalším zpracování a vyšší výhřevnost. Cílem procesu pražení je udržení těkavých látek v materiálu. Proces pražení zlepšuje vlastnosti biomasy z hlediska hustoty energie, hydrofobnosti, melitelnosti a tak dále, což je výhodnější pro další využití (Wang *et al.*, 2016). Studie ukázaly, že s nárůstem teploty pražení klesá výtěžek kapalného produktu a pevného produktu se výtěžek zvýšil, zatímco výtěžek plynného produktu zůstal nezměněn. Proces pražení má významný vliv na vnitřní strukturu pórů, výnos a kvalitu aktivního uhlí získaného z pyrolýzy. (Zhang *et al.*, 2016). Bylo zjištěno, že vyšší teplota a delší doba zdržení během pražení zlepšuje vlastnosti pražené biomasy a také zvyšuje výhřevnost plynného produktu (Wannapeera a Worasuwannarak, 2015).

V tabulce 3 jsou uvedeny vlastnosti materiálů, které jsou vhodné ke spalování s biomasou. Také zde lze porovnat vlastnosti materiálů, které neprošly procesem pražení s materiály, které tímto procesem prošly.

Tabulka 3: Vlastnosti materiálů vhodných pro spalování s biomasou

	Dřevo	Dřevěné pelety	Pražené dřevěné pelety	Dřevěné uhlí	Černé uhlí
Obsah vlhkosti [%]	30 - 45	7 - 10	1 – 5	1 - 5	10 - 15
Výhřevnost [MJ/kg]	9 - 12	15 - 18	20 - 24	30 - 32	23 - 28
Těkavé látky [%]	70 - 75	70 - 75	55 - 65	10 - 12	15 - 30
Obsah pevného uhlíku [%]	20 - 25	20 - 25	28 - 35	85 - 87	50 - 55
Sypná hmotnost [kg/m ³]	200 - 250	550 - 750	750 - 850	~ 200	800 - 850
Energetická hustota (sypná) [GJ/m ³]	2.0 – 3.0	7.5 – 10.4	15.0 – 18.7	6 – 6.4	18.4 – 23.8
Hydroskopické vlastnosti	Hydrofilní	Hydrofilní	Hydrofobní	Hydrofobní	Hydrofobní
Melitelnost	Špatná	Špatná	Dobrá	Dobrá	Dobrá

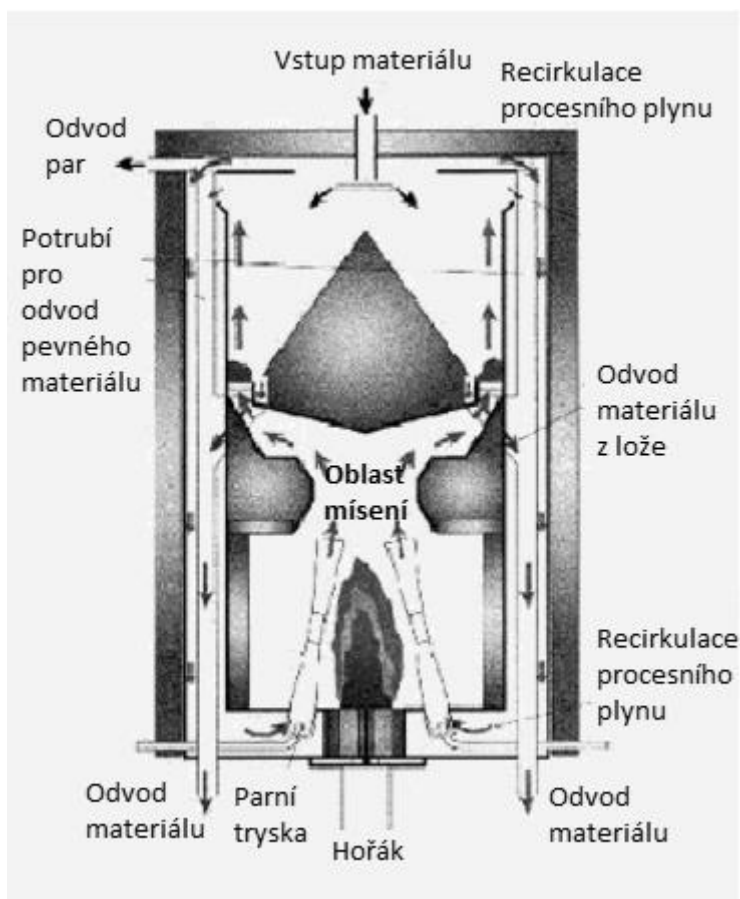
Zdroj: Trávníček *et al.*, 2015

4.1.7.1. Technologie pro proces pražení

Torbed technologie

Podle Trávníčka *et al.* (2015) se tato technologie může využívat i pro jiné účely než pro proces pyrolýzy, jako například spalování. Do reaktoru je ze spodní části dopravována teplotná látka vysokou rychlostí a částice biomasy vstupují z vrchní části reaktoru. Tím vznikají toroidní víry a dochází k intenzivnímu přenosu tepla. Rozměry reaktoru jsou poměrně malé a dobře se reaktor dá řídit. Nevýhodou této technologie je, že je nutné před vstupem materiálu do reaktoru materiál upravit na požadovanou velikost částic.

Na obrázku 6 je uvedeno schéma Torbed technologie.



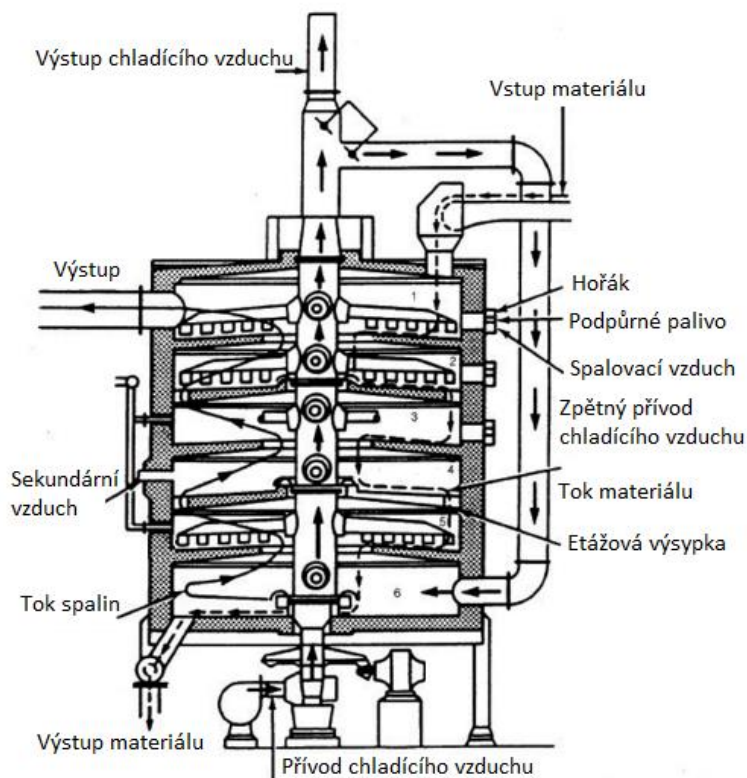
Obrázek 6: Schéma Torbed technologie

Zdroj: upraveno podle <https://www.iere.jp/contents/Kema/catalog/enova/torbed.htm>

Multiple Hearth Furnace technologie

Zařízení je pro nepřetržitý provoz a může být použito i pro jiné aplikace, jako například spalování nebezpečných odpadů a kalů. Reaktor je rozdělen do několika pater. V každém patře probíhá jiná fáze pražení s teplotním rozmezím od 220 do 300 °C a dobou zdržení asi 30 minut. Vstupní materiál je dopraven do reaktoru prostřednictvím pásového nebo šnekového dopravníku. Materiál je ohříván pomocí hořáku nebo vstřikováním horké páry. Hořák využívá nevyužité produkty z procesu pražení nebo zemní plyn. MHF technologie má velkou výhodu, že může zpracovávat více různých velikostí částic vstupního materiálu. Tato technologie má využití především v oblasti výzkumu a to především díky tomu, že je možné sledovat proces pražení v různých patrech reaktoru (Trávníček *et al.*, 2015).

Obrázek 7 znázorňuje schéma MHF technologie.



Obrázek 7: Schéma MHF technologie

Zdroj: upraveno podle <http://www.combustionportal.org/ssi.html>

Technologie pohyblivého kompaktního lože

Podle Trávníčka *et al.*, 2015 může být tato technologie využita pro nepřetržitý provoz. Vstupní materiál vstupuje do reaktoru vrchní částí a spodní částí proudí teplotná látka. Doba zdržení materiálu je přibližně 30 až 40 minut při teplotě 300 °C. Výstupní produkt z procesu pražení je odebrán a zchlazen. Nevýhodou zařízení je, že dochází k nerovnoměrnému prohřátí materiálu a to má za důsledek horší kvalitu výstupního produktu.

V tabulce 4 jsou uvedeny vlastnosti reaktorů používaných pro proces pražení.

Tabulka 4: Shrnutí vlastností reaktorů pro pražení

Torbed technologie	způsob ohřevu	horkým vzduchem
	Výhody	malé rozměry, více možností využití
	nevýhody	nutná malá velikost částic
Multiple Hearth Furnace	způsob ohřevu	hořákem nebo horkou párou
	Výhody	může zpracovávat různé velikosti materiálu
	nevýhody	větší vlhkost materiálu při ohřevu hořákem na zemní plyn
Kompaktní pohyblivé lože	způsob ohřevu	teplotnou látkou
	Výhody	celý objem reaktoru je využit pro proces
	nevýhody	nerovnoměrné zahřívání materiálu

Zdroj: upraveno podle Trávníčka *et al.*, 2015

4.2. Děje probíhající při procesu pyrolýzy

Pyrolýzní proces je pro každý materiál jedinečný. Je závislý na teplotě, tlaku, rychlosti ohřevu, typu reaktoru, ale také na struktuře a složení vstupujícího materiálu (Vokatý, 2011). Při procesu pyrolýzy probíhá několik dějů, které můžeme obecně rozdělit podle teplotních intervalů. Při teplotách do 150 °C dochází k odpaření volné i hrubé vody a k desorpci adsorbovaných látek, z materiálu se mohou uvolňovat první páry těkavých uhlovodíků. Za teplot 300 – 500 °C dochází k uvolňování velkého množství dehtových par a z materiálu odchází také vodní pára a oxid uhličitý (CO₂) vznikající odštěpováním hydroxylových a karboxylových skupin. Nejvíce vyvíjeným plynem je v tomto rozmezí teplot metan (CH₄). Při teplotách vyšších než 500 °C ustává produkce dehtových par a v reaktoru zůstává pevný zbytek. Při teplotách nad 600 °C odcházejí z reaktoru jen plynné produkty, s rostoucí teplotou roste obsah vodíku a klesá obsah metanu (Jílková *et*

al., 2012). Výstupním materiálem je pevný zbytek a kondenzovatelné a nekondenzovatelné plyny. Kondenzovatelné plyny se přemění na žádaný bio olej (Doumer *et al.*, 2015).

4.2.1. Procesy pyrolýzy biomasy

Hlavním teplotním rozpětím při procesu pyrolýzy biomasy je 200 °C až 400 °C, při teplotách vyšších dochází stále k tvorbě nových produktů, ale pomaleji a v menší míře (Vokatý, 2011). Důležitou součástí procesu pyrolýzy rostlinné biomasy je předsušení biomasy na nižší vlhkost než 10 % (Rogers a Brammer, 2012) a nadrcení biomasy na menší části (Choi *et al.*, 2012), aby se dosáhlo rychlého ohřevu vstupního materiálu a také se omezilo množství vody ve výstupních produktech, především v kapalných produktech (Akhtar a Amin, 2012).

4.3. Produkty pyrolýzy

Během procesu pyrolýzy vznikají tři hlavní produkty – pevný zbytek, pyrolýzní plyn a pyrolýzní olej (Tripathi *et al.*, 2016; Patel *et al.*, 2016). Pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn je možné využít jako palivo a tyto produkty je možné rafinací zušlechťovat. Vlastnosti a množství pyrolýzních produktů závisí na podmínkách procesu a na vstupním materiálu (Molek, 2015).

S vzrůstající teplotou výrazně ubývá pevný zbytek a roste výtěžek plynů. K největšímu poklesu dochází v rozmezí teplot 300 až 400 °C (Vokatý, 2011). S delší dobou zdržení v reaktoru klesá výtěžek kapalného produktu, důvodem je probíhání sekundárních reakcí. Nejžádanější produkt pyrolýzy je kapalný produkt a to především tím, že je účinnější, má nákladově efektivní manipulaci a skladování, zlepšené vlastnosti a vyšší energetickou hustotu na rozdíl od pevných paliv. Nevýhodou je vyšší obsah vody (Braumakis *et al.*, 2014).

4.3.1. Pevný zbytek

Procesem pyrolýzy vzniká pevný zbytek neboli polokoks. Tento produkt je velmi reaktivní a hned po procesu má sklon k samovznícení. Polokoks černého uhlí může přejít

na koks při teplotách okolo 900 °C. Koks už neobsahuje skoro žádné těkavé látky (Jílková *et al.*, 2012).

Zahříváním dřeva pomocí pyrolýzy, tedy bez přístupu média obsahující kyslík, dřevo nezačne hořet, pokud se nepřekročí teplota hoření uhlíku, tak vznikne dřevěné uhlí (Škorpík, 2011). Dřevěné uhlí je zuhelnatěná biomasa, produkt pomalé pyrolýzy. Chemicky se jedná hlavně o uhlík (85 až 98 %), s malým množstvím kyslíku a vodíku. Dřevěné uhlí poskytuje větší množství tepla v poměru k jeho objemu, než ze dřeva nebo jiné biomasy, ze kterého může být vytvořen. Dnes se dřevěné uhlí používá k výrobě aktivního uhlí, výrobě peletovaného paliva, nebo ke grilování potravin. Dále se využívá v kovárnách k ohřevu kovových částí před zpracováním (Madsen, 2015). Při spalování dřevěného uhlí se produkuje jen oxid uhličitý (Škorpík, 2011).

Biouhel je uhlí vyrobené z organických materiálů, obvykle z rostlinné biomasy (Jouiad *et al.*, 2015). Biouhel může být možnou vhodnou alternativou pro udržitelné zemědělství jako doplněk půdy, kdy je do ní aplikován. Nejenže to má přínos pro plodiny jako recyklace živin a zadržování vody, ale takto může být nějaká část uhlíku dlouhodobě uložena v půdě (Barrow, 2012; Jouiad *et al.*, 2015).

4.3.2. Pyrolýzní plyn

Hlavními složkami pyrolýzního plynu jsou metan (CH₄), oxid uhličitý (CO₂), plynný vodík (H₂) a oxid uhelnatý (CO). Pyrolýzní plyn se nejčastěji používá k ohřevu pyrolýzních reaktorů, protože obsahuje spalitelné plyny. Také může být využit k výrobě energie (Nguyen *et al.*, 2013). Dále se může topný plyn využít k výrobě rozpouštědel, jako je aceton a metanol (Sharma *et al.*, 2015).

Studie ukázaly, že při nízkých teplotách pyrolýzy je uvolňován především oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Zatímco vodík a další uhlovodíkové plyny byly uvolňovány při vyšších teplotách (Chen *et al.*, 2015).

4.3.3. Kapalný produkt

Kapalný produkt se skládá z více složek. Především je to pyrolýzní olej dále to může být těžký a lehký dehet, střední olej, karbonizační benzín nebo pyrolýzní voda. Těžký dehet

obsahuje velké množství popelovin a uhelného prachu (Trávníček *et al.*, 2015). Pyrolýzní voda vzniká z vlhkosti obsažené ve vstupním materiálu (Molek, 2015).

Pyrolýzní olej je směs několika stovek látek. „Alternativně je nazýván pyrolýzním benzínem či bio olejem. Je to tmavě hnědá kapalina s ostrým charakteristickým zápachem“ (Zámostný a Kurc, 2011). Vzniká kondenzací retortových plynů (Šejvl, 2013) s pomocí kondenzátorů. Je to korozivní látka s pH v rozmezí 2 – 3 (Bridgwater, 2012). Hustota bio oleje se pohybuje něco málo přes 1000 kg/m³, je tedy větší než u benzínu (723 kg/m³) a motorové nafty (838 kg/m³) (Mohammed *et al.*, 2015). Bio olej má vysoký obsah vody, který je v rozmezí 15 až 35 %. To je způsobeno vlhkostí vstupního materiálu a podmínkami procesu rychlé pyrolýzy (Kim *et al.*, 2016). Lze ho využít k výrobě elektřiny v kogeneračních jednotkách, ale také jako pohonné hmoty nebo se může využít v chemickém průmyslu. Právě široká škála chemikálií, jako jsou pryskyřice, hnojiva a další mohou být extrahovány z bio oleje (Patel *et al.*, 2016). Je to stabilní kapalné biopalivo, které se snadněji skladuje a přepravuje na rozdíl od biomasy (BTG, 2016). Bio olej může být zušlechťován na pohonné hmoty prostřednictvím dvou hlavních konvenčních rafinérských procesů hydrozpracování a katalytického krakování (Shemfe *et al.*, 2015).

Bio olej je žádaný produkt pyrolýzy, je univerzální, a proto má velký potenciál díky široké škále použití (Braumakis *et al.*, 2014). Nevýhodou bio oleje je jeho vysoká kyselost, nízká tepelná stabilita a výhřevnost, vysoká viskozita, vyšší obsah pevných částic a popela, což má negativní vliv na účinnost spalovacích procesů (Braumakis *et al.*, 2014). „Složení pyrolýzního oleje se výrazně liší od paliv na ropné bázi, protože na rozdíl od fosilních paliv biomasa obsahuje velké množství kyslíku“ (Zámostný a Kurc, 2011). Velký potenciál má bio olej získaný z mořských řas, protože má nízkým obsah kyslíkatých sloučenin a poměrně vysokou výhřevnost a to až 41 MJ/kg (Chiodo *et al.*, 2016).

Studie zjistily, že při použití kondenzátoru par s vyšší teplotou, která se pohybuje v rozmezí 70 až 90 °C, bio olej obsahoval menší množství vody a větší koncentraci cukru a ligninu než při použití kondenzátoru s nižší teplotou (Kim *et al.*, 2016).

4.4. Vhodné materiály pro pyrolýzu

Procesem pyrolýzy se mohou zpracovávat různé materiály na bázi uhlíku. Nejčastěji se zpracovává biomasa. Dalšími materiály mohou být pneumatiky, plastové odpady, komunální odpad, městské kaly a různé nebezpečné odpady (Prokeš, 2011). Níže je krátce charakterizována biomasa a shrnuté poznatky mezinárodních výzkumů, které testovaly různé druhy rostlinné biomasy pro pyrolýzu.

4.4.1. Biomasa

Biomasa je rostlinný nebo živočišný materiál. Základním prvkem biomasy jsou rostliny, bakterie, houby a sinice, které jsou schopné využívat sluneční energii (pomocí chlorofylu) a z anorganických látek, jako je oxid uhličitý (CO₂) vytvářet bílkoviny a sacharidy (Weger, 2009) a proto se jedná o obnovitelný zdroj energie. Pro energetické účely se preferuje především rostlinná biomasa, nejvyužívanější je dřevo (Zámstný a Kurc, 2011). Biomasa je CO₂ neutrální zdroj energie. Při spalování vytváří menší objem skleníkových plynů ve srovnání s fosilními palivy (Chen *et al.*, 2015). Z energetického hlediska je významná pouze biomasa, která je energeticky využitelná. Ale teoreticky je možné využít všechny formy biomasy pro získání energie, protože základem veškeré živé hmoty je uhlík a uhlíková vazba (Weger, 2009).

„Biomasa má mnoho forem, z nichž mnohé se ke spalování nehodí, kvůli vysokému obsahu prvků nebo látek, které zhoršují kvalitu spalování, nebo se při spalování vytvářejí nebezpečné emise“. Tyto formy biomasy se dále mohou zpracovat jiným způsobem než spalováním a to například anaerobním kvašením pro výrobu bioplynu (Weger, 2009).

Biomasa má vysoké náklady na dopravu a skladování, a také menší hustotu energie než fosilní paliva (Badger a Fransham, 2006). Pro dosažení nižších nákladů a vyšší energetické úrovně se biomasa zpracovává pomocí pyrolýzy na produkty, které se snadno přepravují a skladují a to především na bio olej, který je žádaným produktem pyrolýzy (Van de Velden *et al.*, 2010).

Rostlinná biomasa

Rostlinná biomasa se skládá z organické hmoty, vody a nízkého obsahu popelovin. Popeloviny jsou minerály pocházející z půdy (Škorpík, 2011). Rostlinná biomasa se pro tyto účely získává buď pěstováním energetických rostlin nebo z odpadů ze zemědělské, potravinářské nebo lesní produkce. Mezi nároky na energetické plodiny patří především nízká cena neboli nízké náklady, snadná sklizeň a vysoký výnos. Zajímavostí je, že suchá biomasa různých druhů plodin má skoro stejnou výhřevnost, která se pohybuje v rozmezí od 17,5 do 19,5 MJ/kg (Weger, 2009).

Lignocelulózová biomasa neboli nepotravinářská má velký potenciál, neboť je po celém světě. Především jsou to zbytky z lesní produkce, agro-odpady, energetické traviny, vodní rostliny, řasy a další. Tyto materiály mají nízké hodnoty síry, dusíku a popela, což je poměrně šetrné k životnímu prostředí (Mohammed *et al.*, 2015).

Rostlinnou biomasu vhodnou pro energetické účely Weger (2009) rozčlenil do několika skupin:

- zbytková biomasa ze zemědělství
- zbytková biomasa z lesnictví
- biomasa energetických plodin

Dále Weger (2009) rozděluje energetické plodiny na:

- lignocelulózové plodiny
- olejnaté plodiny
- škrobno-cukernaté plodiny

4.4.2. Studie procesu pyrolýzy rostlinné biomasy

Dále jsou uvedeny vědecké studie různých druhů rostlinné biomasy, které se v poslední době využívají pro proces pyrolýzy. Je zde popsána příprava daného materiálu, proces pyrolýzy a zhodnocení výstupních produktů.

Blahovičník velký

Blahovičník velký (*Eucalyptus grandis*) je rychle rostoucí dřevina, která se využívá pro papírenské účely (Joubert *et al.*, 2015). Bio olej z blahovičníku velkého je velmi podobný bio oleji z vylisované cukrové třtiny (Doumer *et al.*, 2015).

Studie Jouberta *et al.* (2015) zkoumala dřevo blahovičníku při procesu rychlé pyrolýzy ve fluidním reaktoru se stacionární fluidní vrstvou (1 kg/h) a ve dvoušnekovém reaktoru (10 kg/h). Ve fluidním reaktoru byl použit křemičitý písek jako médium přenosu tepla v reaktoru a dusík jako nosný plyn. Ve dvoušnekovém reaktoru byly použity ocelové kuličky jako medium pro přenos tepla. Kuličky měly v průměru 1,5 mm a byly ohřáty na 500 °C. Biomasa byla nejprve před procesem vysušena, aby obsah vody byl menší než 10 % hmotnosti biomasy. Dále byla biomasa blahovičníku rozdrčena na částice menší než 5 mm.

Výsledkem této studie je, že vyšší kvalitu bio oleje s vyšším obsahem organických látek a nižším výnosem vody bylo získáno z fluidního reaktoru se stacionární fluidní vrstvou. To je přičítáno příznivým provozním podmínkám, jako vyššímu koeficientu přenosu tepla, krátké doby zdržení páry a použití minerálního oleje jako chladicího systému (Joubert *et al.*, 2015).

Datlovník pravý a *Chloris gayana*

Jouiad *et al.* (2015) pro studii porovnávali listy datlovníku pravého (*Phoenix dactylifera*) a travinu *Chloris gayana*. Materiál se nejprve sušil v sušárně při teplotě 100 °C po dobu 24 hodin, poté byl materiál nadrcen na malé částice o velikosti 2 mm. Dále byla biomasa přeměněna na biouhel pomocí pomalé pyrolýzy při rychlosti ohřevu 5 °C za minutu až do 400 °C po dobu 11 hodin. Výsledkem této studie je, že biouhel z traviny *Chloris gayana* vykazoval vyšší stabilitu vůči tepelné degradaci ve srovnání s biuhlem z datlovníku pravého, a proto je vhodnější pro využití v udržitelném zemědělství.

Divoká mimóza

Divoká mimóza (*Leucaena leucocephala*) je rychle rostoucí rostlina, která se v Thajsku používá jako krmivo pro zvířata a ze zbytků se vyrábí dřevěné uhlí. Roční produkce biomasy se pohybuje okolo 13 t/ha (Wannapeera a Worasuwannarak, 2015).

V studii Wannapeera a Worasuwannaraka (2015) byla použita biomasa z divoké mimózy. Nejprve byl materiál nařezán a proset na částice o velikosti 0,5 až 2 mm. Poté byl materiál před procesem pyrolýzy vysušen ve vakuové sušárně při teplotě 70 °C po dobu 24 hodin. Pro tuto studii byl využit proces pražení. Reaktor byl zahřát na požadovanou teplotu (240 - 320 °C) při rychlosti zahřívání 10 °C za minutu. Výsledkem této studie bylo, že vyšší výhřevnost (25,7 MJ/kg) byla dosažena při teplotě 350 °C s dobou zdržení 6 minut.

Kožokvět lojonosný

Kožokvět lojonosný (*Triadica sebifera*) je malý strom pocházející z Asie. Jeho semena jsou bohatá na olej, a proto se využívá pro výrobu bionafty (Henkel *et al.*, 2016).

Studie Henkela *et al.* (2016) zkoumali dřevo kožokvětu v reaktoru při procesu rychlé pyrolýzy. Biomasa se sušila přes noc v sušárně při teplotě 105 °C, aby se odstranila přebytečná vlhkost materiálu. Po vysušení byl materiál rozemlet na částice velké 0,5 – 1 mm.

Výsledkem experimentu je, že největší výtěžek bio oleje byl získán s použitím elektrostatického odlučovače při teplotě 500 °C. Kapalný produkt byl bohatý na fenoly a ketony (Henkel *et al.*, 2016).

Maniok

V studii Pattiya (2011) se porovnávaly výtěžky bio oleje ze stonku manioku a oddenku. Materiál byl zpracován pomocí rychlé pyrolýzy v reaktoru s fluidním ložem při teplotě 475 – 510 °C. Výsledkem bylo, že bio olej získaný z oddenku manioku má lepší kvalitu, nižší obsah kyslíku, vyšší výhřevnost a lepší stabilitu při skladování než bio olej ze stonku manioku. Optimální teplota pro výtěžek bio oleje z manioku je 490 °C.

Paulovnie plstnatá

Paulovnie plstnatá (*Paulownia tomentosa*) patří do skupiny lignocelulózové plodiny a má mnohem nižší obsah popela a vyšší obsah těkavých látek v porovnání se zemědělskými plodinami. Proto je paulovnie plstnatá ideální surovina pro pyrolýzu a výrobu bio oleje (Yorgun a Yildiz, 2015).

Experiment Yorgun a Yildiz (2015) s dřevem z paulovnie byl prováděn v reaktoru s pevným ložem za použití procesu pomalé pyrolýzy. Teplotní rozmezí bylo mezi 350 – 600 °C. Velikost vstupního materiálu byla od 0,2 do 1,8 mm.

Před experimentem bylo dřevo z paulovnie rozřezáno na částice o velikosti 10 – 20 mm. Dále byl materiál vysušen přibližně na 10 % vlhkosti při pokojové teplotě po dobu 2 týdnů. Poté byl materiál rozdrcen na menší části a před procesem pyrolýzy byl materiál sušen v peci při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin. Největší výtěžek bio oleje 54 % hmotnosti vstupního materiálu bylo při teplotě 500 °C s velikostí částic 0,5 – 1 mm. Získaný bio olej má potenciál jako zdroj energie nebo jako cenná chemická surovina (Yorgun a Yildiz, 2015).

Posidonie mořská

Studie Chiodo *et al.* (2016) zkoumali posidonii mořskou (*Posidonia oceanica*) při procesu pomalé pyrolýzy. Materiál byl před procesem pyrolýzy nejprve omyt destilovanou vodou, poté byl sušen v sušárně při teplotě 110 °C po dobu jedné hodiny. Dále byl materiál nadrcen. Výsledkem této studie je, že posidonie mořská je vhodným materiálem pro výrobu biopaliv, zejména biouhlu a bio oleje.

Rajče jedlé

V této studii Cácerese *et al.* (2015) byly použity rostliny rajčat (*Solanum lycopersicum*) ze zemědělské činnosti. Nejprve byla biomasa vysušena v sušárně při teplotě 70 °C po dobu 24 hodin a poté rozemleta na částice menší než 1 mm. Byl použit proces rychlé pyrolýzy s teplotním rozmezím 300 – 500 °C za použití fluidního reaktoru se stacionární vrstvou a s dobou zdržení plynu jen pár sekund. Kondenzovatelné páry byly získány za

pomocí kondenzátoru a následně přeměněny na bio olej za použití elektrostatického odlučovače.

Výsledkem tohoto experimentu je pevný zbytek, který může být použit jako hnojivo a bio olej. Pyrolýza rostlin rajčete poskytuje nákladově efektivní zdroj biologicky aktivních látek, které mohou být dále rozvinuty pro aplikaci biopesticidů (Cáceres *et al.*, 2015).

Sloní tráva

Sloní tráva (*Pennisetum purpureum*) představuje dobrý obnovitelný zdroj energie. Je to vytrvalá travina s vysokým výtěžkem suché biomasy a to až 35 t/ha za rok. Sklízí se 4 krát do roka. Tato travina nepotřebuje doplňkové živiny a je kompatibilní s konvenčními zemědělskými postupy (Samson *et al.*, 2005). Větší výnos biomasy se získá zastíněním rostliny. Proto je výhodné sloní trávu pěstovat například s palmou olejnou (*Elaeis guineensis*), kde se můžou takto minimalizovat nevyužité prostory plantáže. Další výhodou je vysoký obsah těkavých látek, uhlíku a nízký obsah popela. Nevýhodou této plodiny je vysoký obsah vlhkosti při sklizni (Mohammed *et al.*, 2015).

Tento rostlinný materiál byl použit během studie Mohammeda *et al.* (2015), kdy byla sloní tráva nakrájena na částice o velikosti 6 – 7 cm. Materiál byl před procesem pyrolýzy vysušen v sušárně při teplotě 105 °C a poté byl rozdrcen na částice velké 0,2 až 2 mm. Pyrolýza byla prováděna v reaktoru s pevným ložem. Pec se zahřívala elektricky rychlostí 30 °C za minutu a reakční doba byla 15 minut. Výstupní pyrolýzní pára se kondenzovala přes kondenzátor připojený k chladiči při 4 °C.

Tato studie zkoumala účinek průtoku dusíku. Průtok dusíku mezi 20 – 30 ml za minutu zvýšil výnos bio oleje a poklesl výnos pevného zbytku a nekondenzovatelných plynů. Při průtoku dusíku 30 ml za minutu se získal optimální výtěžek bio oleje. Když se průtok dusíku zvýšil na 40 – 60 ml za minutu, tak se výtěžek bio oleje a pevného zbytku snížil a zvýšil se výnos nekondenzovatelných plynů. Dále se zkoumala reakční teplota. Největší výnos bio oleje ze sloní trávy se získal při teplotě 450 až 600 °C. Výsledkem této studie je, že sloní tráva je dobrým zdrojem obnovitelné energie, který může být trvalým, pokud budou všechny produkty pyrolýzy efektivně využity (Mohammed *et al.*, 2015).

Zelené mořské řasy

Podle studie Xu *et al.* (2011) je potřeba pro výrobu 1 kg bio oleje z řas 0,35 MJ elektřiny a 1,75 MJ tepla. Nejvíce energeticky nákladné je předsušení biomasy před procesem. Spotřebovaná energie pro vysušení biomasy řas dosahuje hodnot až 84,9 % z celkové spotřeby energie pro proces pyrolýzy.

Pro studii Robertse a de Nyse (2015) byly zelené mořské řasy nejprve vysušeny přes noc v solární sušárně při teplotě 60 °C. Procesem pomalé pyrolýzy po dobu 60 minut byl vytvořen biouhel. Takto vyrobený biouhel má nižší obsah uhlíku (~ 30 - 35 %) než biouhel, který se vyrábí z dřevní biomasy (> 70 %). Výhodou je, ale že obsahuje látky (N, P, Ca, Mg, k, Zn a Mo), které jsou nezbytné pro produkci rostlin. Proto je vhodný pro zlepšování zemědělských půd.

4.5. Zhodnocení procesu pyrolýzy – ekonomické a energetické hledisko

Využívání biomasy si získalo pozornost v posledních letech díky přínosu pro životní prostředí. Nicméně, rozšíření biomasy závisí především na nákladové konkurenceschopnosti pohonných hmot a chemikálií ve srovnání s těmi, které byly vyrobené z konvenčních fosilních zdrojů (Patel *et al.*, 2016).

Proces pyrolýzy má mnoho výhod, ale i nevýhod. V následujících podkapitolách jsou uvedeny základní klady a zápory pyrolýzního procesu.

4.5.1. Výhody

- Pyrolýza je jednou termochemických procesů (Patel *et al.*, 2016). Právě díky termochemické přeměně vznikne materiál s vyšší energetickou hodnotou (Akhtar a Amin, 2012).
- Další velkou výhodou je, že procesem pyrolýzy se nejčastěji zpracovává biomasa, která je jedním z obnovitelných zdrojů energie (Prokeš, 2011). Právě biomasa

obsahuje jako jediný z dostupných zdrojů uhlík. Díky uhlíku může být biomasa přeměněna na kapalné palivo (Mohammed *et al.*, 2015).

- Tímto procesem lze zpracovávat i různé druhy odpadů na bázi uhlíku (Prokeš, 2011).
- Po zpracování materiálu procesem pyrolýzy je materiál s nižšími náklady snadněji přepravován a skladován (Braumakis *et al.*, 2014).
- Výhodou procesu pyrolýzy je, že se může provádět i za nižších teplot než při zplyňování nebo spalování (Demirbas, 2004), to má vliv na energetické náklady (Patel *et al.*, 2016).
- Vyrobený bio olej z procesu pyrolýzy by mohl nahradit lehké a těžké topné oleje v průmyslových kotlích (Braumakis *et al.*, 2014).
- Zařízení pro manipulaci s bio olejem má méně pohyblivého zařízení než pro práci s biomasou, což vede k nižším nákladům na provoz a údržbu (Braumakis *et al.*, 2014).
- Podle Patela *et al.* (2016) jsou dva důležité faktory, které ovlivňují výrobní náklady bio oleje z pyrolýzy biomasy. Je to především spotřeba elektrické energie a přebytek výtěžku pevného produktu. Elektrická energie je primárně spotřebována na manipulaci a zpracování biomasy. Existuje několik řešení jak zlepšit hospodářskou konkurenceschopnost energie vyrobené z rychlé pyrolýzy, především jde o prodej pevného produktu. Právě biouhel je další cenný produkt pyrolýzy a to tím, že může být využit v udržitelném zemědělství a energetice, jako palivo s výbornými energetickými vlastnostmi. Prodejem pevného produktu se mohou výrobní náklady snížit až o 18 %, to ale závisí na tržní ceně.
- Biouhel a metanol lze současně získat z procesu pomalé pyrolýzy. Výrobní náklady biouhlu z tohoto procesu jsou závislé na teplotě pyrolýzy - nižší teplota snižuje výrobní náklady. Kromě toho, výrobní náklady biouhlu významně ovlivňují zisky kogeneračních jednotek, a to zejména při nižších teplotách, díky vyššímu výnosu

pevného produktu. Právě teplota ovlivňuje výnosy pomalé pyrolýzy. Při teplotě 300 °C je větší výtěžek biouhlu než metanolu, když se teplota zvýší na 450 °C, je pak větší výnos metanolu. Další způsob pro kombinovanou výrobu biouhlu a metanolu je zplyňování, ale tímto procesem je výnos biouhlu nižší než u pomalé pyrolýzy (Patel *et al.*, 2016).

4.5.2. Nevýhody

- I přesto, že biomasa je obnovitelný zdroj energie tak při jejím zpracování se produkují skleníkové plyny, i když relativně nižší množství než u fosilních paliv v průběhu celého životního cyklu procesu konverze (Patel *et al.*, 2016).
- Velkou nevýhodou je, že pro proces pyrolýzy se využívají i potravinářské plodiny nebo plodiny energetické, které mohou zabírat kvalitní půdy. Právě pěstování plodin pro výrobu biopaliv může zvýšit ceny potravin (Al Chami *et al.*, 2014).
- Proces pyrolýzy je energeticky náročný, především úprava materiálu před procesem, zvláště u rychlé pyrolýzy. Důležité je předsušit biomasu (Rogers a Brammer, 2012), právě u biomasy řas dosahuje spotřebovaná energie až 84,9 % z celkové spotřeby energie pro tento proces (Xu *et al.*, 2011). Dále je také důležité vstupující materiál nadrtit (Choi *et al.*, 2012). Důvodem je, že se tak dosáhne rychlého ohřevu materiálu (Akhtar a Amin, 2012).

5. Závěry

Pyrolýza je termochemický proces přeměny materiálu na palivové produkty, kde na materiál působí teplota bez přístupu médií obsahující kyslík. Pyrolýzu můžeme rozdělit na několik různých procesů jako je pomalá, rychlá, vakuová, středněteplotní, blesková pyrolýza, hydropyrolýza a pražení. Tyto procesy se liší v podmínkách působení na vstupní materiál.

Mezi nejpoužívanější procesy patří pomalá pyrolýza, ta se využívá hlavně pro výrobu kvalitního energetického produktu - biouhlu. Technologie, které fungují na procesu pomalé pyrolýzy, mají několik výhod a to, že mohou zpracovat různé druhy materiálu a jsou levnější. Nevýhodou je, že tento proces díky pomalému ohřevu materiálu trvá poměrně dlouho.

Další významnou technologií je rychlá pyrolýza. Ta je specifická v tom, že se materiál rychle ohřívá a má velmi krátkou dobu zdržení par. Rychlá pyrolýza se využívá především pro výrobu kapalných produktů. Nevýhodou tohoto procesu je to, že je potřeba před procesem pyrolýzy materiál vysušit a nadrtit, což je spojeno s vysokými náklady.

Posledním rozšířeným procesem je pražení, které je vhodné pro zpracování biomasy na bázi lignocelulózy. Cílem procesu je udržet těkavé látky v materiálu. Výhodou procesu pražení je, že není zapotřebí stavět speciální zařízení, protože výstupní materiál může být spálen v uhelných elektrárnách.

Procesem pyrolýzy vzniká materiál, který má vyšší energetickou hodnotu než vstupní materiál a vznikají tři hlavní produkty. Nejžádanější je kapalný produkt, který má širokou škálu uplatnění. Právě bio olej z rychlé pyrolýzy má velký potenciál být jedním z hlavních obnovitelných zdrojů energie, ale rozšíření biopaliv závisí na nákladové konkurenceschopnosti vůči fosilním palivům.

Pyrolýza je slibná technologie, které je v poslední době věnována velká vědecko-výzkumná pozornost. Všechny vytvořené produkty z procesu pyrolýzy lze využít a to jak v zemědělství, tak pro výrobu různých chemikálií, ale především jako paliva.

6. Reference

- Akhtar J, Amin N. S. 2012. A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (7): 5101–5109.
- Al Chami Z, Amer N, Smets K, Yperman J, Carleer R, Dumontet S, Vangronsveld J. 2014. Evaluation of flash and slow pyrolysis applied on heavy metal contaminated *Sorghum bicolor* shoots resulting from phytoremediation. *Biomass and Bioenergy* 63: 268–279.
- Anex R. P, Aden A, Kazi F. K, Fortman J, Swanson R. M, Wright M. M, Satrio J. A, Brown R. C, Daugaard D. E, Platon A, Kothandaraman G, Hsu D. D, Dutta A. 2010. Techno-economic comparison of biomass-to-transportation fuels via pyrolysis, gasification, and biochemical pathways. *Fuel* 89: 29-35.
- Badger P. C, Fransham P. 2006. Use of mobile fast pyrolysis plants to densify biomass and reduce biomass handling costs—a preliminary assessment. *Biomass Bioenergy* 30: 321–325.
- Barrow C. J. 2012. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography* 34: 21–28.
- Braimakis K, Atsonios K, Panopoulos K. D, Karellas S, Kakaras E. 2014. Economic evaluation of decentralized pyrolysis for the production of bio-oil as an energy carrier for improved logistics towards a large centralized gasification plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35: 57–72.
- Bridgwater A. V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenergy* 38: 68–94.
- BTG. 2016. Biomass Technology Group. Available at <http://www.btg.cz/technologie-btg-pro-rychlou-pyrolyzu.html>: Accessed 2016-02-18.
- Cáceres L. A, McGarvey B. D, Briens C, Berruti F, Yeung K. K. C, Scott I. M. 2015. Insecticidal properties of pyrolysis bio-oil from greenhouse tomato residue biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 112: 333–340.

- Carrier M, Hugo T, Gorgens J, Knoetze H. 2011. Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 90: 18–26.
- Chen J, Fan X, Jianga B, Mu L, Yao P, Yin H, Song X. 2015. Pyrolysis of oil-plant wastes in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and products characterization. *Bioresource Technology* 192: 592–602.
- Chiodo V, Zafarana G, Maisano S, Freni S, Urbani F. 2016. Pyrolysis of different biomass: Direct comparison among *Posidonia Oceanica*, Lacustrine Alga and White-Pine. *Fuel* 164: 220–227.
- Choi S. H, Choi Y. S, Park H. C. 2012. Fast pyrolysis characteristics of lignocellulosic biomass with varying reaction conditions. *Renew Energy* 42: 131–135.
- Demirbas A. 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 30: 219–230.
- Demirbas A, Arin G. 2002. An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources* 24 (5): 471–482.
- Dharma S, Masjuki H. H, Ong H. Ch, Sebayang A. H, Silitonga A. S, Kusumo F, Mahlia T. M. I. 2016. Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*–*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology. *Energy Conversion and Management* 115: 178–190.
- Doumer M. E, Arízaga G. G. C, Agostinho da Silva D, Yamamoto C. I, Novotny E. H, Santos J. M, Oliveira dos Santos L, Wisniewski Jr. A, Bittencourt de Andrade J, Mangrich A. S. 2015. Slow pyrolysis of different Brazilian waste biomasses as sources of soil conditioners and energy, and for environmental protection. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 113: 434–443.
- Guoxin H, Xiwu G, Hao H, Haojie F, Zheng W. 2008. Experimental studies on flow and pyrolysis of coal with solid heat carrier in a modified rotating cone reactor. *Chemical Engineering and Processing* 47: 1777–1785.
- Henkel Ch, Muley P. D, Abdollahi K. K, Marculescu C, Boldor D. 2016. Pyrolysis of energy cane bagasse and invasive Chinese tallow tree (*Triadica sebifera L.*) biomass in an inductively heated reactor. *Energy Conversion and Management* 109: 175–183.

Henrich E, Dahmen N, Weirich F, Reimert R, Kornmayer C. 2016. Fast pyrolysis of lignocellulosics in a twin screw mixer reactor. *Fuel Processing Technology* 143: 151–161.

Jílková L, Cíahotný K, Černý R. 2012. Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů. *Paliva* 4: 74-80.

Johansson A, Wiiknikka H, Sandström L, Marklund M, Öhrman O. G. W, Narvesjö J. 2016. Characterization of pyrolysis products produced from different Nordic biomass types in a cyclone pilot plant. *Fuel Processing Technology* 146: 9–19.

Joubert J. E, Carrier M, Dahmen N, Stahl R, Knoetze J. H. 2015. Inherent process variations between fast pyrolysis technologies: A case study on *Eucalyptus grandis*. *Fuel Processing Technology* 131: 389–395.

Jouiad M, Al-Nofeli N, Khalifa N, Benyettou F, Yousef L. F. 2015. Characteristics of slow pyrolysis biochars produced from rhodes grass and fronds of edible date palm. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 111: 183–190.

Kim P, Weaver S, Labbé N. 2016. Effect of sweeping gas flow rates on temperature-controlled multistage condensation of pyrolysis vapors in an auger intermediate pyrolysis system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 118: 325–334.

Ly H. V, Kim S. S, Woo H. C, Choi J. H, Suh J. D, Kim J. 2015. Fast pyrolysis of macroalga *Saccharina japonica* in a bubbling fluidized-bed reactor for bio-oil production. *Energy* 93: 1436–1446.

Madsen M. 2015. Charcoal. Salem Press Encyclopedia of Science. Available at <http://eds.b.ebscohost.com/eds/detail/detail?sid=e488e672-5bdd-4bc2-9ed9-433a0a680fcd%40sessionmgr113&vid=5&hid=120&bdata=Jmxhbmc9Y3Mmc2l0ZT11ZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=89475545&db=ers>: Accessed 2016-02-18.

Marker T. L, Felix L. G, Linck M. B, Roberts M. J. 2012. Integrated hydrolysis and hydroconversion (IH2) for the direct production of gasoline and diesel fuels or blending components from biomass, part 1: Proof of principle testing. *Environmental Progress and Sustainable Energy* 31: 191–199.

- Mohammed I. Y, Abakr Y. A, Kazi F. K, Yusuf S, Alshareef I, Chin S. A. 2015. Pyrolysis of Napier Grass in a Fixed Bed Reactor: Effect of Operating Conditions on Product Yields and Characteristics. *BioResources* 10 (4): 6457–6478.
- Molek T. 2015. Pyrolýza: princip, historie a současnost. *OEnergetice.cz*. Available at <http://oenergetice.cz/technologie/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost/>: Accessed 2015-12-13.
- Nguyen T. L, Hermansen J. E, Nielsen R. G. 2013. Environmental assessment of gasification technology for biomass conversion to energy in comparison with other alternatives: the case of wheat straw. *Journal of Cleaner Production* 53: 138–148.
- Patel M, Zhang X, Kumar A. 2016. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 1486–1499.
- Pattiya A. 2011. Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresource Technology* 102: 1959–1967.
- Prokeš K. 2011. Vakuová pyrolýza a její realizace v ČR. *Biom*. Available at <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vakuova-pyrolyza-a-jeji-realizace-v-cr>: Accessed 2016-03-26.
- Roberts D. A, de Nys R. 2015. The effects of feedstock pre-treatment and pyrolysis temperature on the production of biochar from the green seaweed *Ulva*. *Journal of Environmental Management* 169: 253–260.
- Rogers J. G, Brammer J. G. 2012. Estimation of the production cost of fast pyrolysis bio-oil. *Biomass Bioenergy* 36: 208–217.
- Samson R, Mani S, Boddey R, Sokhansanj S, Quesada D, Urquiaga S, Reis V, Ho Lem C. 2005. The potencial of C4 perennial grasses of developing a global bioheat industry. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24 (5 – 6): 561–495.
- Sharma A, Pareek V, Zhang D. 2015. Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50: 1081–1096.

- Sharma A, Shinde Y, Pareek V, Zhang D. 2015. Process modelling of biomass conversion to biofuels with combined heat and power. *Bioresource Technology* 198: 309–315.
- Shemfe M. B, Gu S, Ranganathan P. 2015. Techno-economic performance analysis of biofuel production and miniature electric power generation from biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading. *Fuel* 143: 361–372.
- Silitonga A. S, Atabani A. E, Mahlia T. M. I, Masjuki, H. H, Badruddin I. A, Mekhilef S. 2011. A review on prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3733–3756.
- Šejvl R. 2013. Energie z odpadů II. *Biom.cz*. Available at <http://biom.cz/czp/odborne-clanky/energie-z-odpadu-ii>: Accessed 2015-11-21.
- Škorpík J. 2011. Transformační technologie. Available at <http://www.transformacni-technologie.cz/biomasa-jako-zdroj-energie.html>: Accessed 2016-03-19.
- Trávníček P, Vitázek I, Vítěz T, Kotek L, Junga P. 2015. Mendelova univerzita v Brně. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. 210p.
- Tripathi M, Sahu J. N, Ganesana P. 2016. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 467–481.
- Van de Velden M, Baeyens J, Brems A, Janssens B, Dewil R. 2010. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renew Energy* 35: 232–242.
- Vokatý R. 2011. Porovnávání produktů pyrolýzy měkkých druhů německého uhlí a biomasy. *Paliva* 3: 144–148.
- Wang S, Ru B, Dai G, Lin H, Zhang L. 2016. Influence mechanism of torrefaction on softwood pyrolysis based on structural analysis and kinetic modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1-8. (in press)
- Wannapeera J, Worasuwannarak N. 2015. Examinations of chemical properties and pyrolysis behaviors of torrefied woody biomass prepared at the same torrefaction mass yields. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 115: 279–287.

Weger J. 2009. Biomasa jako zdroj energie. Biom.cz. Available at <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-jako-zdroj-energie>: Accessed 2015-11-21.

Xu L, Brilman D. W. F, Withag J. A. M, , Brem G, Kersten S. 2011. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. *Bioresource Technology* 102: 5113-5122.

Yang Z, Kumar A, Huhnke R. L, Buser M, Capareda S. 2016. Pyrolysis of eastern redcedar: Distribution and characteristics of fast and slow pyrolysis products. *Fuel* 166: 157–165.

Yorgun S, Yildiz D. 2015. Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 114: 68-78.

Zámostný R, Kurc L. 2011. Vliv podmínek a složení surovin na pyrolýzu dřevní hmoty. *Chemické listy* 105: 458–466.

Zhang L, Xu C. C, Champagne P. 2010. Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management* 51: 969–982.

Zhang S, Hu B, Zhang L, Xiong Y. 2016. Effects of torrefaction on yield and quality of pyrolysis char and its application on preparation of activated carbon. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1-7. (in press)