



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

MIKROVLNNÁ PYROLÝZA SUBSTRÁTŮ ODPADNÍ POVAHY

MICROWAVE INDUCED PYROLYSIS OF BIOMASS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Marek Šmarda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Marek Šmarda**
Studijní program: Strojirenství
Studijní obor: Základy strojího inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Mikrovlnná pyrolýza substrátů odpadní povahy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat základním popisem procesu pyrolýzy substrátů z biomasy, organických odpadů a dalších surovin za pomoci mikrovlnné indukce.

Více informací na <http://www.upei.fme.vutbr.cz/>

Cíle bakalářské práce:

Oblasti se kterými se student postupně seznámí:

Příprava vstupních surovin, pelet, používané katalyzátory a mikrovlnné receptory

Uspořádání mikrovlnných pyrolyzních reaktorů (karusel, šroubový nebo řetězový dopravník), zdroje mikrovlnného záření (magnetron) a vlnovody

Podmínky pyrolyzních reakcí s popisem procesů v jejich průběhu, složení vstupních surovin a produktů

Způsoby zpracování produktových proudů, plynů a par, úprava pevné fáze. Složení kapalného a plynného pliva, kondenzátory, elektrostatické separátory

Spotřeba elektrické energie a chladicí vody

Využití vyrobených kapalných a plynných paliv v plynových turbinách s produkcí elektrické energie

Ekonomická rozvaha. Náklady na výstavbu, provozní náklady, nákup surovin, tržby z prodeje paliv a elektrické energie

Seznam literatury:

Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB TUO, Ostrava, 1997

Rybin, M.: Spalování paliv a hořlavých odpadů. SNTL Praha, 1985

Akhil Tumbalam Goo: tFRACTION,
degree of Master of Engineering Sc

ION OF BIO-OIL VAPORS. A thesis for the
University of Western Ontario, Canada, 2013

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

V této bakalářské práci jsou podány informace o různých metodách zpracování substrátu odpadní povahy se zaměřením na zpracování odpadů pomocí mikrovlnné pyrolýzy. Souhrnně lze konstatovat, že mikrovlnná pyrolýza je progresivní řešení zpracování odpadního substrátu. Vzhledem k rovnoměrnému a rychlému ohřevu substrátu odpadní povahy je tato metoda efektivnější v porovnání s konvečními metodami odstraňování odpadu. Výsledkem práce je podání informací o procesu zpracování odpadního substrátu formou mikrovlnné pyrolýzy a následné ekonomické shodnocení.

Klíčová slova

Pyrolýza, mikrovlny, mikrovlnná pyrolýza, odpadní substrát, technologie

Abstract

In this bachelor thesis there are informations about different methods of processing organic nature substrate with a focus on a waste processing using microwave pyrolysis. In sum it is possible to say that microwave pyrolysis is a progressive solution to process waste substrate. Due to evenly and rapid heating of organic nature substrate, this method is more effective compared to conventional methods of waste disposal. The result of this work is to submit information on processing waste substrate in the form of microwave analysis and subsequent economic evaluation.

Key words

Pyrolysis, microwaves, microwave pyrolysis, the waste substrate, technology

Bibliografická citace

ŠMARDA, M. *Mikrovlnná pyrolýza substrátů odpadní povahy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma mikrovlnná pyrolýza substrátů odpadní povahy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Jaroslavu Jíchovi, CSc. za ochotu, laskavost, trpělivost a cenné rady, které mi pomohly při vypracování bakalářské práce. Také děkuji celé své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Definice a členění termických metod zneškodňování odpadů	11
3. Druhy termického zpracování odpadu.....	12
3.1 Spalování	12
3.2 Zplyňování.....	14
3.3 Pyrolýza	16
4. Alternativy k termickému zpracování odpadu.....	17
4.1 Skládkování odpadů	17
4.2 Kompostování.....	18
4.3 Recyklace.....	21
5. Pyrolýza.....	22
5.1 Pomalá pyrolýza	23
5.2 Rychlá pyrolýza	25
5.3 Produkty pyrolýzy	28
5.4 Využití produktů pyrolýzy.....	29
5.5 Využití pyrolýzy v průmyslu	29
6. Mikrovlnná pyrolýza	31
6.1 Mikrovlny	31
6.2 Princip mikrovlnného ohřevu	31
6.3 Princip mikrovlnné pyrolýzy	33
6.4 Zpracování biomasy mikrovlnou pyrolýzou.....	34
6.5 Produkty mikrovlnné pyrolýzy	38
6.6 Porovnání konvekční a mikrovlnné pyrolýzy.....	40
6.7 Ekonomické zhodnocení.....	41
7. Závěr.....	42
8. Seznam použité literatury	43
9. Seznam tabulek a obrázků	45

1. Úvod

Lidská společnost v dnešní době produkuje stále větší množství odpadů. Jedná se o problém, který je potřeba řešit. Jedna z metod, jak snížit narůstající produkci odpadů a tím eliminovat tento negativní dopad lidské činnosti na životní prostředí spočívá v rozvoji nových metod v nakládání s odpadem.

V posledních deseti letech došlo k výraznému pokroku v oblasti termického zpracování odpadů. Mezi nejrozšířenější formy termického zpracování patří spalovny, zplyňování odpadů a termická pyrolýza. Použití mikrovlnného zdroje jako hlavního zdroje ohřevu zpracovaného odpadu by mělo zvýšit rychlost procesu rozkladu. Do budoucna se počítá s vyšším využitím zařízení, která rozkládají odpad na další produkty, které mohou být nadále upravovány a následně využity v dalších oblastech průmyslu.

Termickou likvidací odpadů dochází k produkci energie ve formě odpadního tepla, produkci biooleje, vzniku plynů na bázi uhlíku, dusíku, síry a produkci uhlí.

Odpadní teplo je využito pro výrobu elektrické energie a ohřev vody. Bioolej je nadále využíván jako palivo pro kogenerační jednotky nebo je dále rafinován a přidáván do pohonných hmot. Plyny slouží jako výhřevné medium při vytápění a výrobě elektrické energie. Uhlí, které vzniká, je využito ke spalování.

Tato práce pojednává o způsobu termického zpracování odpadu pomocí mikrovlnné pyrolýzy.

2. Definice a členění termických metod zneškodňování odpadů

Jako termické metody zneškodňování odpadů lze souhrnně označit technologie, při nichž dochází k působení na odpadní látku teplotou přesahující meze její chemické stability, popřípadě ke spolupůsobení teploty a kyslíku v prostředí s regulovaným obsahem kyslíku. Těmito postupy jsou původně nebezpečné látky v hořlavých odpadech přeměněny na poměrně neškodné produkty. Uvedené termické metody nejsou konečným řešením eliminace odpadů.

Vzhledem k technologickému určení technických zařízení na zneškodňování odpadů je významným kritériem pro hodnocení jednotlivých procesů především dosažitelný stupeň rozkladu odpadní látky. To je ve většině případů ovlivněno nejen teplotou, ale přístupem a množstvím kyslíku. Podle tohoto hlediska rozlišujeme oxidační a redukční proces. [1,5]

Proces zneškodňování odpadů

Proces oxidační

Je proces termického zneškodňování odpadů, při němž je obsah oxidačních medií v reakčním prostoru stechiometrický nebo vyšší vzhledem k obsahu hořlavých látek ve zpracovávaném odpadu. Oxidační procesy můžeme dále dělit podle teplot:

- nízkoteplotní s teplotou reakčního prostoru do 1 000 °C
- vysokoteplotní s teplotou reakčního prostoru nad 1 000 °C

V současné době se využívá spalování v reakční komoře do 1 000 °C.

Proces redukční

Je proces termického zneškodňování odpadů, při němž je obsah oxidačních medií v reakčním prostoru nulový nebo podstechiometrický vzhledem k obsahu hořlavých látek ve zpracovávaném odpadu. [1,3,5]

3. Druhy termického zpracování odpadu

3.1 Spalování

U spalování se jedná o řízené exotermické slučování hořlavých složek odpadů s kyslíkem za stechiometrických nebo nadstechiometrických podmínek. [1]

3.1.1 Princip spalování

Principem spalování je technologický postup zahrnující vysoušení a ohřev odpadu na zápalnou teplotu. K tomu dochází jak sáláním žhavých spalin a zdíva pece, tak konvekcí spalin nebo přehřátého vzduchu. K vysoušení odpadů dochází za teplot 50 °C až 150 °C. Za vyšších teplot pak v důsledku složitých rozkladných procesů dochází ke vzniku těkavých látek. Zbývající tuhý materiál je dále odplyňován a po dosažení zápalné teploty je postupně spalován.

Zápalná teplota představuje minimální teplotu, při jejímž dosažení dochází ke spontánnímu hoření odpadu v důsledku uvolnění dostatečného množství tepla ke krytí ztrát do okolí. K tomu, aby další spalování probíhalo požadovaným způsobem za vzniku v podstatě neškodných plynných látek, je nutno zajistit určité základní podmínky, k nimž patří:

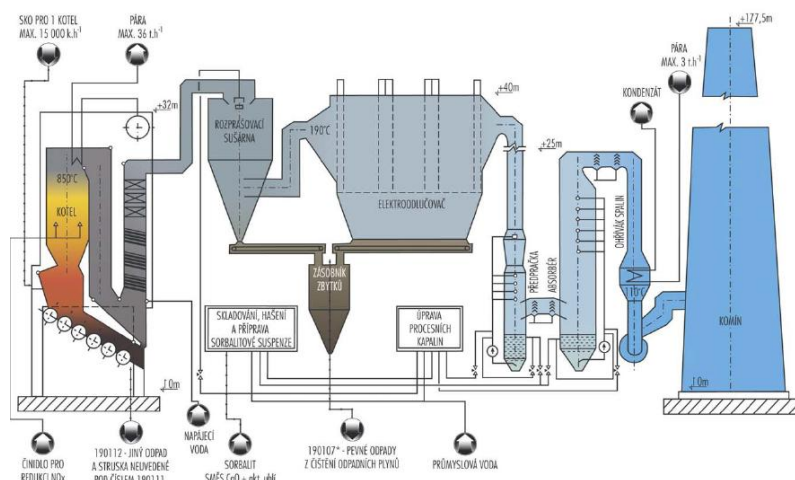
- dostatečné množství spalovacího vzduchu,
- dostatečný vývin tepla, nezbytný ke krytí tepla do okolí a k udržení minimální technologické teploty v reakční komoře (závisí na druhu spalovaného odpadu).
- zdržení spalin v komoře dodatečného spalování po dobu minimálně 2 sekund. [1,12,13]

3.1.2 Technologie spalování

Spalování je termické přeměnění odpadu spojené s produkcí tepla, které je nadále využíváno k výrobě elektrické energie. [1,6]

3.1.3 Spalovny

Spalovna komunálního odpadu je zařízení, jež využívá odpad jako palivo pro výrobu energie. Při spalování zároveň dochází k výrazné redukci objemu a hmotnosti odpadu. Vyprodukovaná energie může být ve formě elektrické energie či tepla distribuována do veřejné sítě.



Obrázek 1: Schéma spalovny komunálního odpadu [13]

Na obrázku 1 je zobrazeno schéma spalovny a v dalším textu je popsán průběh spalování, výroby energie a následného čištění spalin.

Popis funkce spalovny komunálního odpadu

Dovezený odpad je shromažďován v bunkru, kde je skladován. Skladováním určitého množství odpadu v bunkru jako rezerva jsou zahrnuty výkyvy v četnosti a množství dovezeného odpadu (provoz spalovny potřebuje dostatečný a nepřetržitý přísun odpadu). Z bunkru se jeřábem dopravuje odpad na spalovací rošt, kde se za teplot $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ spálí. Spaliny, které vzniknou v kotli, ohřívají vodu a následně jsou měněny na páru, která je pomocí potrubí přiváděna do turbogenerátoru pro výrobu elektrické energie. Pára je dále distribuována do soustavy zásobování teplem, kde je následně využita k vytápění obydlí, popřípadě může být pára využita pro technologické procesy přímo ve spalovně.

Spálením odpadu vzniká pevná škvára a spaliny. Škvára je uchovávána ve speciálním bunkru, kde dochází k separaci železných a barevných kovů. Škvára upravena tímto procesem může být dále využita například ve stavebnictví.

Spaliny jsou hnány přes několikastupňový filtr, aby došlo k jejich nejlepšímu vyčištění. Prvním stupněm je filtrační jednotka, kde jsou spaliny pomocí elektroodlučovače zbaveny popílku. Takto vzniklý popílek je dále upravován pomocí separace těžkých kovů a solí a následně přiveden do bunkru se škvárou. Po odloučení popílku jsou spaliny přivedeny do katalytického filtru. V katalytickém filtru dochází k redukci dioxinů a furanů. Odloučený popílek na katalytickém filtru je odváděn na speciální skládku. Spaliny jsou následně přivedeny k pračce spalin, kde jsou zbytkové škodlivé látky absorbovány do vody. Vyčištěné spaliny opouštějí spalovnu komínem. [1,6,12,13]

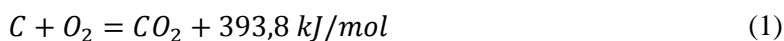
3.2 Zplyňování

Zplyňování je řízený tepelný rozklad odpadních látek při teplotách nad 800 °C za podstechiometrického obsahu kyslíku v reakčním prostoru, směřující k přeměně uhlíkatých materiálů na plynné hořlavé látky požadovaného složení (CO, H₂). [1]

3.2.1 Princip zplyňování

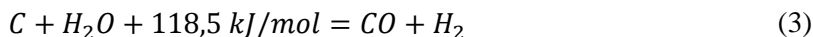
Principem zplyňování je přeměna uhlíkatých materiálů za vyšších teplot, dosahujících až 800 °C, na hořlavé plynné látky v redukčním prostředí. Za přívodu podstechiometrického množství vzduchu či jiného oxidačního činidla dochází k další přeměně vzniklého uhlíkatého zbytku na plynné produkty.

Spalování je popsáno následujícími chemickými rovnicemi:

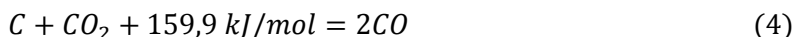


Rovnice vyjadřuje, že spálením 1 molu uhlíku se uvolní teplo o hodnotě 393,8 kJ. Jedná se o exotermní reakci, která poskytuje teplo využitelné pro endotermní reakce (sušení materiálu, redukce). [10,24]

Vodní páry, které jsou obsaženy ve vzduchu a produkované sušením materiálu reagují s pevným uhlíkem za vzniku vodního plynu. [11]

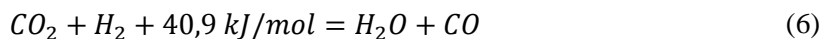
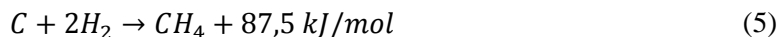


Vznik vodního plynu spolu s reakcí Boudouarova jsou velice důležité redukční reakce.



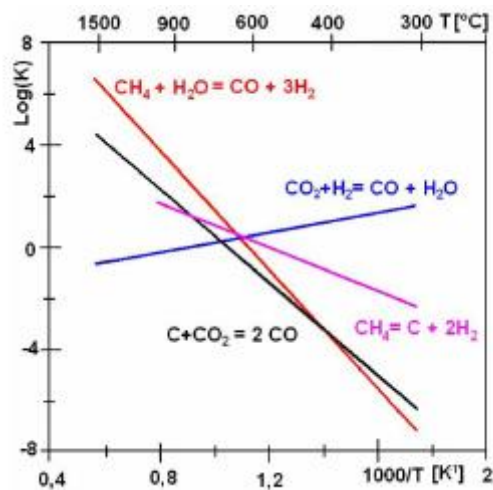
Rovnice 1 a 2 jsou heterogenní a endotermické a při vyšších teplotách (800 - 900 °C) a tlacích (1,5MPa - 2,5MPa) reakce zvyšují objem plynu CO a H₂.

Další redukční rovnice jsou rovnice metalizační reakce a reakce vodní konverze.



Pro různé teploty je poměr mezi produkcí CO₂ a H₂O a produkcí H₂ a CO₂ závislý na rovnovážné konstantě K_w [10]:

$$K_w = \frac{[H_2O] \cdot [CO]}{[CO_2] \cdot [H_2]}$$



Obrázek 2: Závislost rovnovážných konstant na teplotě[10]

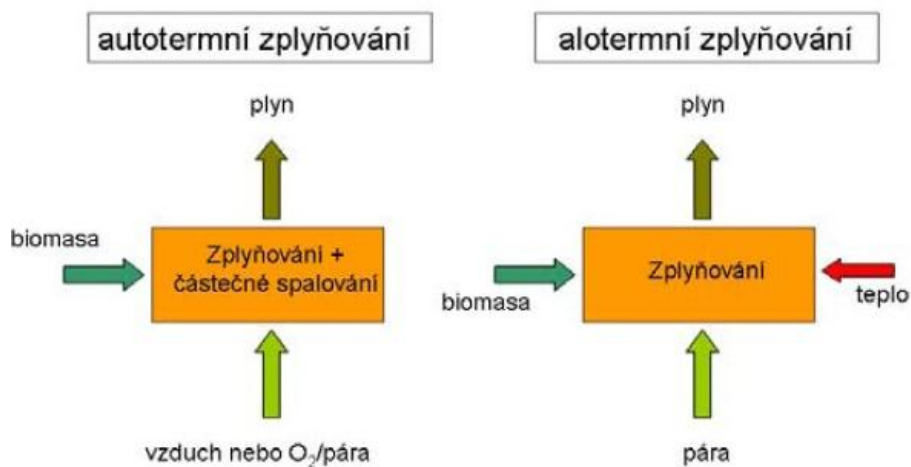
Obrázek 2 znázorňuje závislost vodního plynu na rovnováze konverze vodního plynu na teplotě.

Výhodou tohoto procesu je, že díky vysokým teplotám odpadají problémy s tvorbou vysoce toxických dioxinů, furanů a polycyklických aromatických uhlovodíků. Redukční prostředí rovněž brání vzniku oxidů dusíku. [1]

3.1.2 Technologie zplyňování

Zplyňování se může dělit podle přístupu tepla na:

- autotermní zplyňování – pro pokrytí tepelných nároků bývá v reaktoru spáleno přibližně 20 - 25 hm. % paliva. Při autotermním zplyňování musí být do reaktoru přiváděn kyslík, který je nutný ke spalovacím exotermickým reakcím pro pokrytí potřeby tepla pro tento daný typ zplyňování.
- alotermní zplyňování – proces kdy dochází k přísunu tepla, které je zajištěno předehřevem zplyňovacího média a paliva nebo otopem stěn reaktoru či přenosem tepla inertním materiálem přímo do reaktoru. Zplyňovacím médiem při tomto typu zplyňování je vodní pára. Při alotermním zplyňování dochází k produkci plynu o vyšší výhřevnosti (až 14 MJ/m³). [31,24]



Obrázek 3: Autotermní a alotermní zplyňování [24]

3.3 Pyrolýza

Pyrolýza je tepelný rozklad organických odpadních látek bez přístupu oxidačních medií. [1,5,7]

3.3.1 Princip pyrolýzy

Pyrolýza probíhá na základě termického rozkladu organických odpadních látek bez přístupu oxidačních medií jako je kyslík, oxid uhličitý a vodní pára. V reakčním prostoru se teplota pohybuje v rozmezí od 150 °C do 1 000°C. V důsledku těchto teplot jsou makromolekulární organické látky rozkládány na plyny, kapaliny, uhlí. [2,22]

4. Alternativy k termickému zpracování odpadu

4.1 Skládkování odpadů

Podle zákona č. Sb., o odpadech ve znění novely 223/2015 Sb. §43 Plán odpadového hospodářství kraje, je možné skládkovat pouze odpad, který není možno jinou formou zpracování odpadu využít. [32]

Skládka odpadů je technologické zařízení, určené pro ukládání příslušných druhů odpadů za stanovených technických a provozních podmínek. Skládky lze rozčlenit dle různých hledisek.

Z hlediska zabezpečení rozlišujeme:

- zabezpečené (řízené)
- nezabezpečené (neřízené)

V současné době je možné legálně provozovat pouze skládky řízené. Neřízené skládky jsou prezentovány především tzv. starými ekologickými zátěžemi (historické, nezabezpečené skládky) a nově vznikajícími ilegálními tzv. černými skládkami.

Z hlediska kategorie odpadu rozlišujeme skládky:

- skládky inertního odpadu (SIO),
- skládky ostatního odpadu (SOO),
- skládky nebezpečného odpadu (SNO).

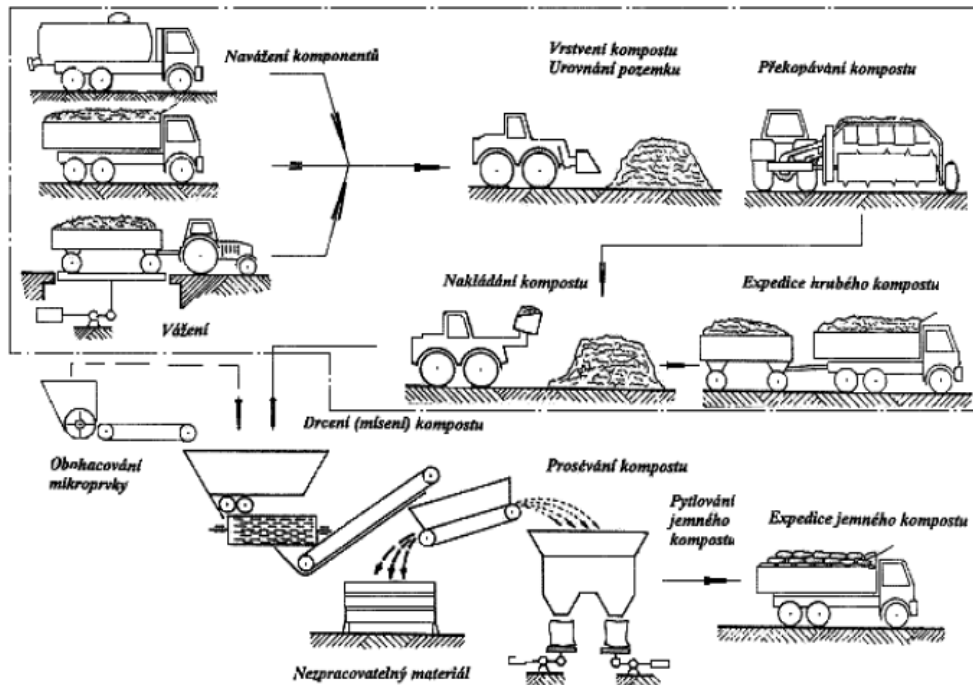
Pokud odpad ukládaný na skládku obsahuje organické látky, dochází k přirozeným biologickým rozkladným procesům spojeným s produkcí skládkového plynu. Tento plyn je ve skládce i mimo ni nežádoucí, neboť může způsobit výbuch a požár skládky, mimo skládku pak negativně ovlivňuje ovzduší. Plyn je proto nutné odvést odplynovacím zařízením a využít ho nebo zneškodnit. Množství a kvalita vznikajícího plynu závisí na druhu odpadu (především obsahu organických látek), vlhkosti a fázi skládkování. Například z 1 tuny komunálního odpadu je produkováno 200 až 250 m³ skládkového plynu. Plyn je produkován prakticky po celou dobu skládkování, ale jeho množství a kvalita je velmi proměnlivá. [3,8,18]

Tabulka 1: Průměrné procentuální složení skládkového plynu během prvních 48 měsíců [9]

Časový interval v měsících	Průměrné objemové procento		
	N ₂	CO ₂	CH ₄
0 – 3	5,2 %	88,0 %	5,0 %
3 – 6	3,8 %	76,0 %	21,0 %
6 – 12	0,4 %	65,0 %	29,0 %
12 – 18	1,1 %	52,0 %	40,0 %
18 – 24	0,4 %	53,0 %	47,0 %
24 – 30	0,2 %	52,0 %	48,0 %
30 – 36	1,3 %	46,0 %	51,0 %
36 – 42	0,9 %	50,0 %	47,0 %
42 – 48	0,4 %	51,0 %	48,0 %

4.2 Kompostování

Kompostování je řízená biologická metoda pro využívání biologicky rozložitelného odpadu za aerobních podmínek. Při kompostování hraje důležitou roli poměr uhlíku a dusíku, přítomnost mikroorganismů. [24]



Obrázek 4: Schéma kompostovací linky [25]

Kvalita produktů je úzce spojena s obsahem uhlíku a dusíku, kdy optimální poměr je 22:1.

$$C:N = \frac{\sum_{i=1}^n \%CiWi(1-Mi)}{\sum_{i=1}^n \%NiWi(1-Mi)} \quad (7)$$

$$MC = \frac{\sum_{i=1}^n WiMi}{\sum_{i=1}^n Wi} \quad (8)$$

W_i [kg] - množství materiálu

M_i [%] - vlhkost

C_i [%] - obsah uhlíku v sušině

N_i [%] - obsah dusíku v sušině

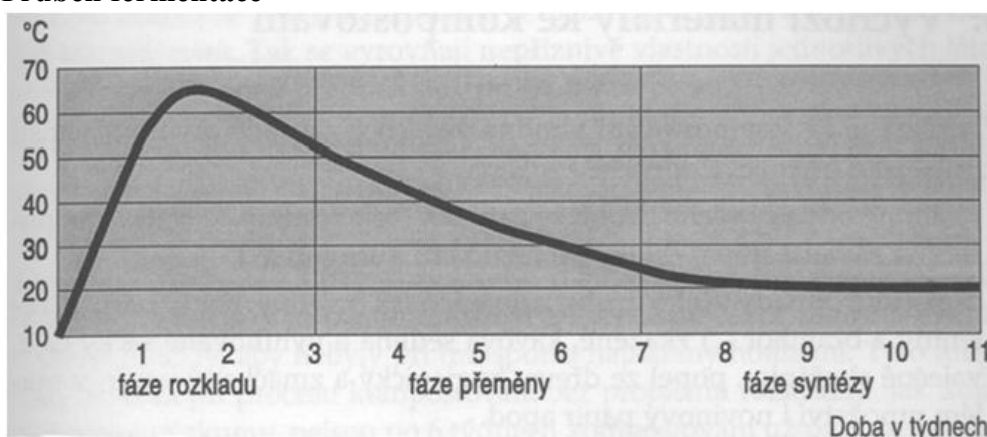
Rovnice 7,8 udávají vztahy pro optimální složení kompostu

Podstata fermentace kompostů

Fermentace je kvašení organických látek rostlinného nebo živočišného původu. Fermentace kompostu má dvě fáze:

- Mineralizace – dochází k procesu dekompozice, během kterého jsou organické látky rozkládány na jednodušší (cukr, škrob, bílkoviny, celulóza → monosacharidy, aminokyseliny CO_2 , NH_3 , aj).
- Humifikace – dochází k mikrobiální syntéze nových organických látek humusového charakteru (huminiové kyseliny, huminy). [19]

Průběh fermentace



Obrázek 5: Fáze průběhu fermentace [22]

Na obrázku 6 je patrný průběh jednotlivých fází fermentace v jednotlivých týdnech.

Získaný kompost má široké uplatnění v zemědělství. Běžně je využíván jako mulč při rekultivaci. Kompost obsahuje velké množství využitelných živin pro výživu rostlin.

Tabulka 2: Obsah živin, pH, poměr C:N obsažených v kompostu. [19]

Výstupní hodnoty	Kompostování
Dusík (N) [% v suš.]	0,5 – 1,5
Fosfor (P ₂ O ₅) [% v suš.]	0,1 – 0,8
Draslík (K ₂ O) [% v suš.]	0,3 – 0,8
Vápník (CaO) [% v suš.]	0,3 – 1,12
Hořčík (MgO) [% v suš.]	0,2 – 3,3
Organická hmota [% v suš.]	20 – 40
Poměr C:N	12 – 30 :1
Hodnota pH	6,5 – 8

4.3 Recyklace

Recyklace je podle zákona o odpadech č.185/2001Sb.§ 4-Další základní pojmy,odst.1, bod u) cit.: *jakýkoliv způsob využití odpadů, kterým je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky pro původní nebo jiné účely jejich použití, včetně přepracování organických materiálů; recyklací odpadů není energetické využití a zpracování na výrobky, materiály nebo látky, které mají být použity jako palivo nebo zásypový materiál.* [18]

Při recyklaci je odpad svážen a dotřídřován na tzv. dotřídřovací lince. Odpad je na této lince tříděn ručně nebo pomocí různých mechanicko-chemických technologií (prosívání, magnetická separace, destilace, odpařování). Jednotlivé druhy vytrříděného odpadu jsou následně zpracovány.

Plasty:

Hmota z recyklovaných plastů je nadále využitelná k dalšímu průmyslovému zpracování, například z PET lahví se vyrábějí vlákna, která jsou využita v textilním průmyslu.

Sklo:

Vytrříděné sklo se nadrtí a následně přidává do směsi na výrobu nového skla. Sklo se může recyklovat téměř neustále.

Papír:

Starý papír je slisován a následně přidán do směsi na výrobu nového. Papír je možné recyklovat 5 krát až 7 krát. Recyklovaný papír může být dále použit na výrobu nového papíru, toaletního papíru, lepenky atd.

5. Pyrolýza

Pyrolýza je metoda termického zpracování odpadu. Můžeme ji klasifikovat podle druhu ohřevu:

- přímý ohřev
- mikrovlnný ohřev

Pyrolýzní spalování lze aplikovat na širokou škálu odpadů například průmyslové odpady, komunální odpady a zemědělské odpady, pokud obsahují rozložitelné uhlíkaté složky. Pyrolýza probíhá v komorové nebo rotační peci, která je připojena na termoreaktor. Pyrolýzní komora, která je součástí provozní jednotky, do níž je umístěn pyrolýzní odpad, je vytápěna z vnějšku spalinami. Při teplotě od 500 °C do 550 °C a bez přístupu vzduchu tedy dochází k uvolnění hořlavých plynů, které jsou dále vedeny do termoreaktoru. Tam jsou za pomoci přídavného hořáku či přívodem spalovacího vzduchu za teplot 900 °C až 1300 °C spáleny za přebytku kyslíku. Pokud je účelné generování potřebného tepla přímo v reaktoru, připouští se částečné spalování pyrolýzních produktů přímo v samotné pyrolýzní komoře.

Pyrolýzní spalování odpadů není vhodné pro všechny typy odpadů, ale je vhodné pro odpady s homogenním složením (biomasa, pneumatiky).

Pyrolýza se dělí podle teploty, rychlosti ohřevu a doby zdržení par v reaktoru na pomalou a rychlou. [1,4,11,22]

Technika pyrolýzy	Doba zdržení (s)	Rychlost ohřevu (K / s)	Teplota (K)
Pomalá	450-550	0.1-1	550-950
Rychlá	0.5-10	10-200	850-1250

Obrázek 6: Dělení pyrolýzy podle teploty, doby zdržení par a rychlosti ohřevu [11]

5.1 Pomalá pyrolýza

Způsob spočívá v pomalém ohřevu materiálu bez přístupu kyslíku ve spalovací komoře. Ve spalovací komoře je dosahováno teplot v intervalu od 400 °C do 500 °C, přičemž teplota v peci se zvyšuje každou minutu o 5 °C– 7 °C.

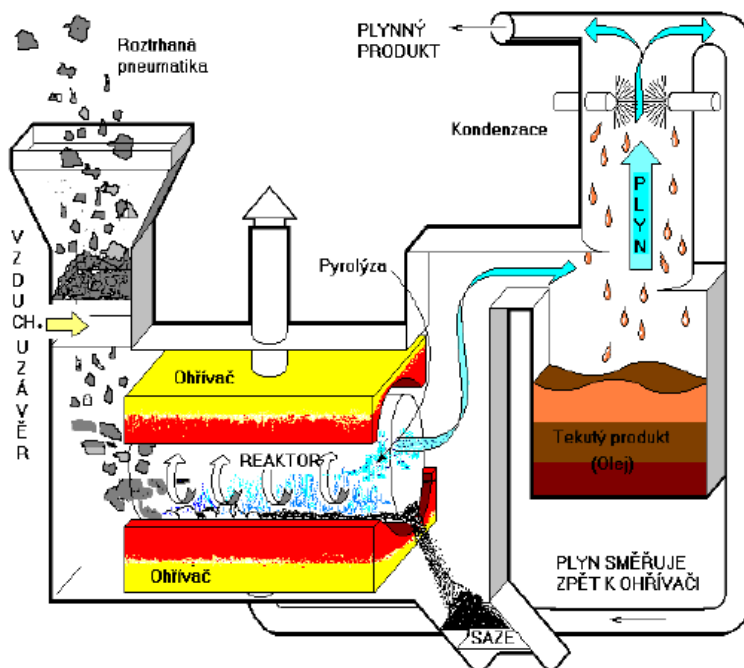
Produktem pomalé pyrolýzy je primárně uhlí a v menším množství plyn a kapalina. [1]

Typy reaktorů (pecí) pro pomalou pyrolýzu:

a) Válcové pece

Válcové pece využívají pomalého přenosu tepla a z tohoto důvodu musí být materiál dlouho zdržen v komoře ohřevu. Otáčení válce způsobuje, že se částice rovnoměrně promíchají.

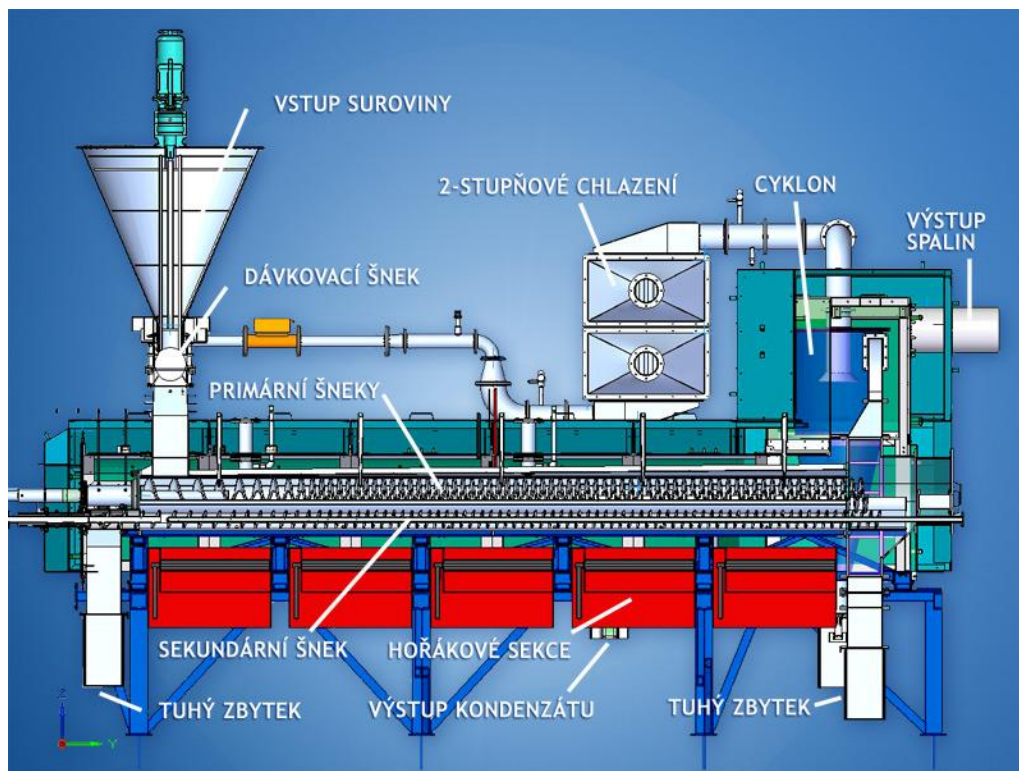
Hlavním znakem této pece je tvorba vyššího podílu pyrolýzního uhlí a menšího množství ostatních produktů. [4]



Obrázek 7: Válcová pec [28]

b) Šnekový reaktor

Šnekový reaktor se nejčastěji ohřívá pomocí tepla předávaného prostřednictvím stěny reaktoru. Doba zdržení materiálu v reaktoru je ovlivněna rychlostí otáčení šroubu a jeho délkou. [4]



Obrázek 8: Šnekový reaktor [29]

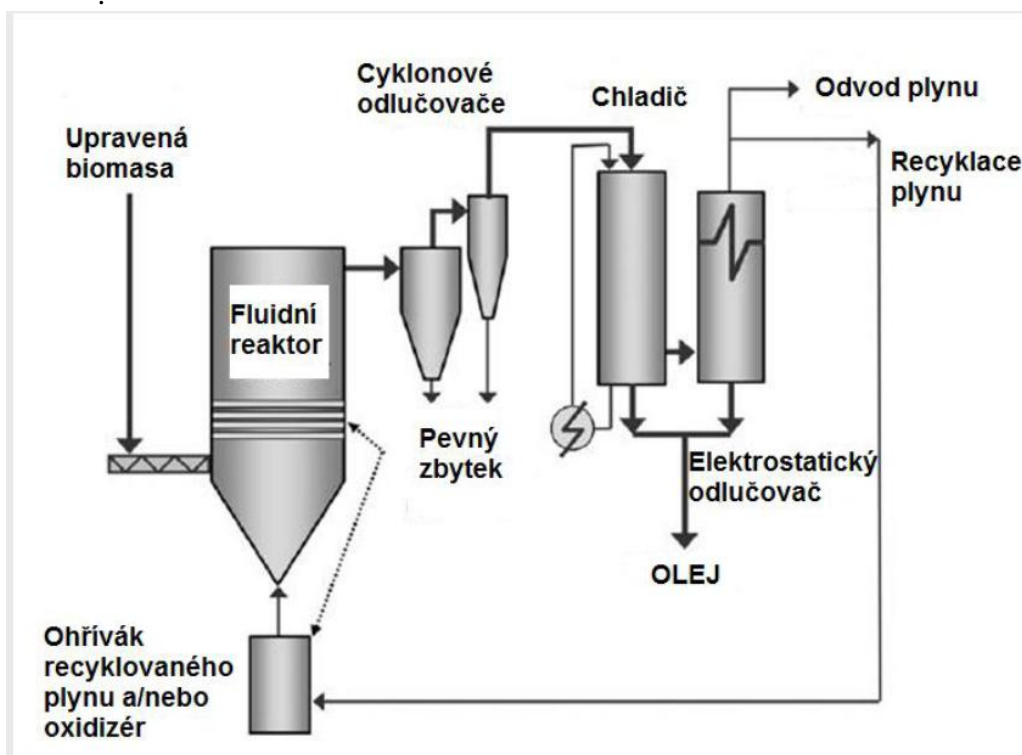
5.2 Rychlá pyrolýza

Rychlá pyrolýza je proces s reakční teplotou nad 500 °C, která má maximalizovat výnosy kapaliny (oleje).

Typy pecí pro rychlou a bleskovou pyrolýzu

a) Fluidní reaktor se stacionární vrstvou

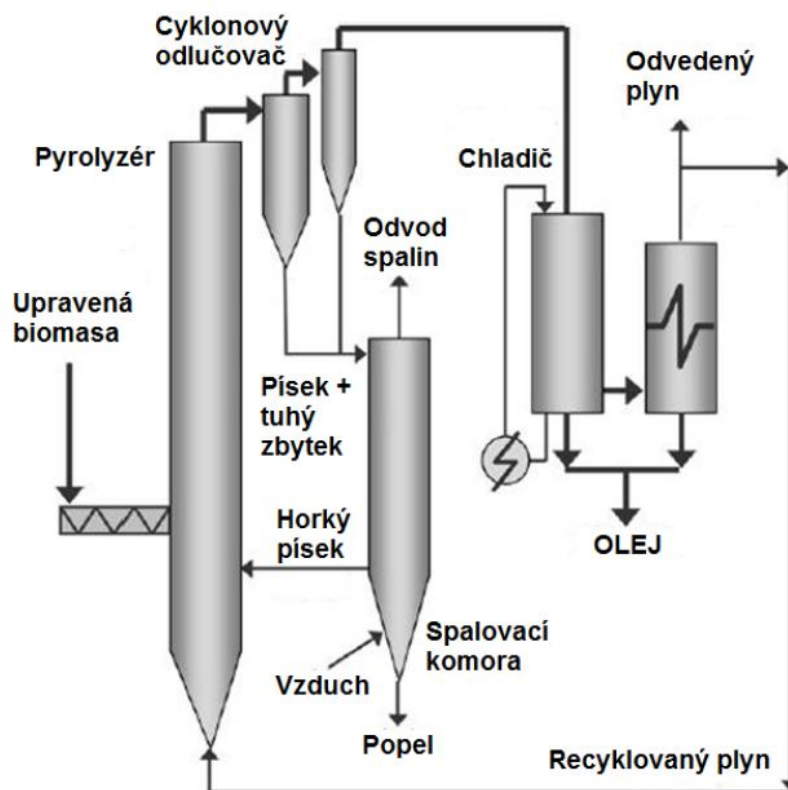
Fluidní zařízení mají stabilní výkonnost s vysokým výtěžkem kapalného biooleje. Teplota v reaktoru je dobře regulovatelná. Pro nejefektivnější přenos tepla mezi částicemi je potřeba zredukovat velikost částic biomasy na přibližně stejnou velikost. [4,5]



Obrázek 9: Fluidní reaktor se stacionární vrstvou [4]

b) Fluidní reaktor s cirkulující vrstvou

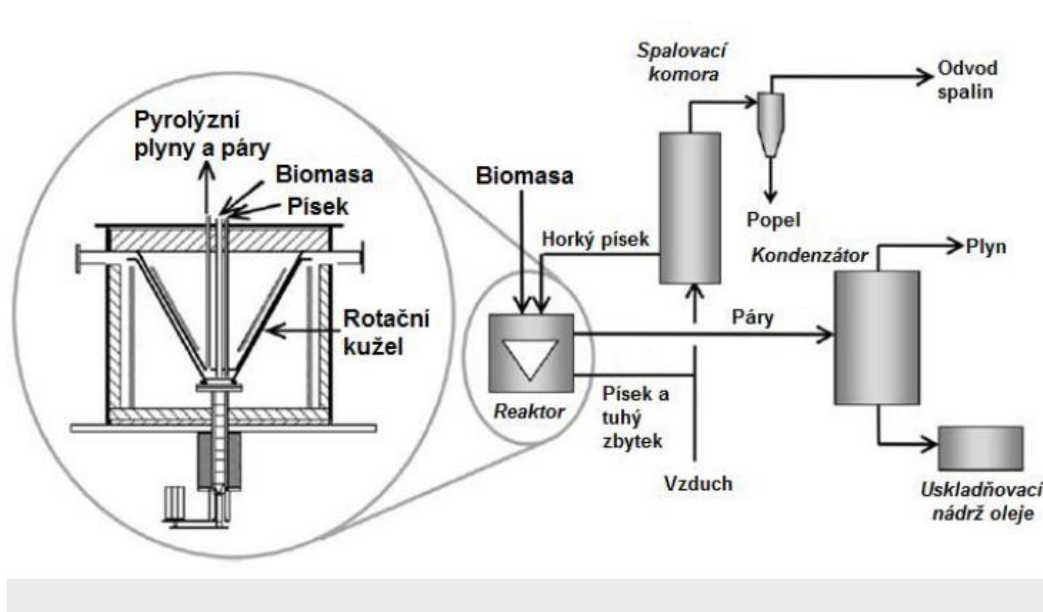
Oproti fluidnímu reaktoru se stacionární vrstvou je materiál v průběhu termických procesu recyklován a s využitím odlučovačů vrácen zpět do reaktoru. [4]



Obrázek 10: Fluidní reaktor s cirkulující vrstvou [4]

c) Rotační kuželový reaktor

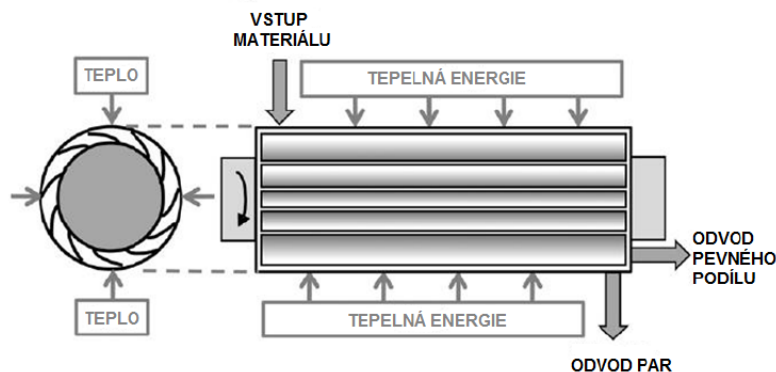
Kuželový reaktor je plněn pohybujícím se horkým pískem a biomasou, které postupně vstupují do reaktoru. Zpracovávaný pevný podíl klesá spolu s pískem do fluidního lože kuželového reaktoru, odkud je materiál odveden do samostatné spalovací komory s fluidním ložem. Pevné zbytky jsou nadále spalovány v sekundárním spalovacím zařízení s bublajícím fluidním ložem a následně je horký písek navrácen zpátky do reaktoru. Reaktor pracuje s frekvencí otáčení 10 Hz. [4]



Obrázek 11: Rotační kuželový reaktor [4]

d) Abláčň (pánvový) reaktor

Nadrcená biomasa je umístěna do reaktoru, kde je tlačena na zahřátou stěnu reaktoru, což způsobuje rychlejší přenos tepelné energie ze stěn reaktoru. Při ohřevu materiálu dochází k lubrikaci stěn olejovým filmem, který se následně odpařuje jako plynná složka. [4]



Obrázek 12: Abláčň reaktor [4]

5.3 Produkty pyrolýzy

Proces pyrolýzy má schopnost poskytnout tři výstupní produkty - plyn, olej a uhlí, které mohou být dále rafinovány.

Typ a procentuální obsah produktů je závislý na technologii zpracování odpadního substrátu. S rostoucí teplotou je snížena výnosnost kapalné složky a stoupá produkce plynné složky. [1,10]

5.3.1 Pevná složka

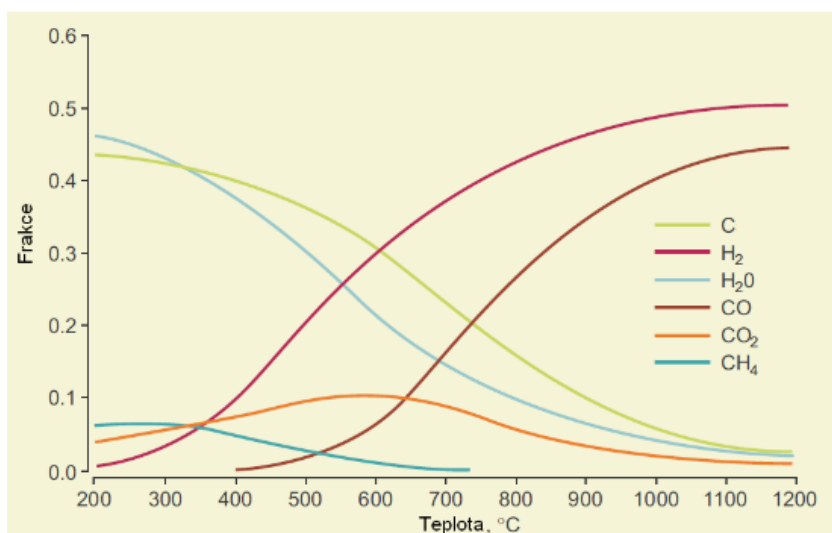
Pyrolytické uhlí je uhlíkový zbytek, který vzniká primárně při pomalé pyrolýze. [1,10]

5.3.2 Kapalná složka

Olej získaný procesem pyrolýzy je směs několika organických sloučenin a může obsahovat i anorganické složky. V případě biomasy je bioolej chemicky nestálý a málo mísitelný s konvenčními palivy. Pro smíchání s konvenčními palivy je nutné jeho zušlechtní aditivy. [1,26]

5.3.3 Plynná složka

Pyrolýzní plyn je tvořen hořlavými plyny, jako jsou H_2 , CO , C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , jejichž množství a koncentrace je závislé na teplotě. V nižších objemech a koncentracích se mohou vyskytnout také CO_2 a škodliviny (SO_2 , NO_x). Pyrolýzní plyn lze využít například ke kombinované výrobě elektrické energie a tepla v kogeneračních jednotkách. [1,10]



Obrázek 13: Produkce plyných frakcí v závislosti na teplotě [26]

5.4 Využití produktů pyrolýzy

5.4.1 Pevná složka

Pyrolytické uhlí lze použít jako pevné palivo pro otop pyrolýzního reaktoru, jako vstupní materiál pro výrobu aktivního uhlíku a také např. pro výrobu uhlíkových nanovláken. Používá se i jako vstupní materiál pro proces zplyňování pro získání plynu bohatého na uhlík. [1,2]

5.4.2 Kapalná složka

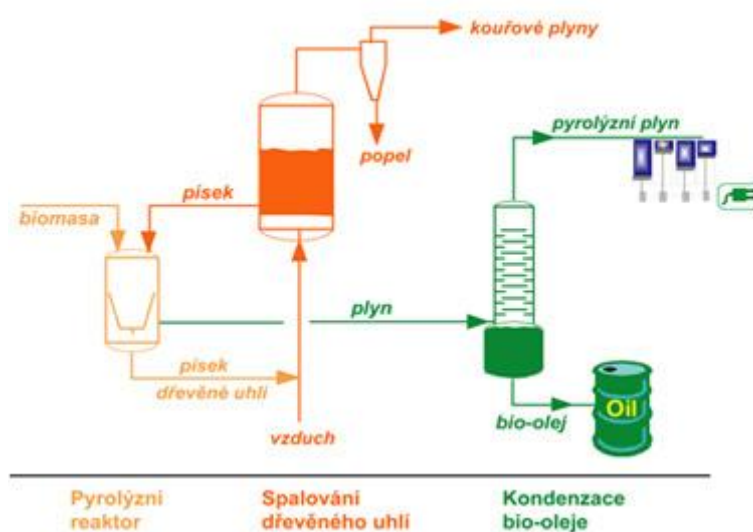
Bioolej, jenž se získává z pyrolýzy, může být po dalším čištění a úpravě použit v dopravě. Bioolej je přidáván do paliva převážně pro diesellové motory. V energetickém průmyslu má bioolej potenciál být využíván jako topný olej pro kotle nebo ve spalovacích turbínách pro výrobu tepla a elektrické energie. Do budoucna lze předpokládat další využití v energetickém průmyslu. [1,26]

5.4.3 Plynná složka

Plyn vyrobený pyrolýzou se může přímo použít pro otop pyrolýzního reaktoru bez nutnosti úpravy kouřovodu a v plynových turbínách/motorech spojených s generováním elektřiny. [1,2]

5.5 Využití pyrolýzy v průmyslu

Technologie pro pyrolýzní spalování jsou využívány po celém světě. Příkladem praktické aplikace pyrolýzní technologie je projekt společnosti BTG (Biomass technology group).



Obrázek 14: Schéma zařízení firmy BTG [30]

Tato technologie je založena na principu rychlé pyrolýzy, u které je kladen důraz na to, aby byl zisk biooleje z biomasy co nejvyšší. Jedná se zhruba o 60-75 % přeměněných vstupních surovin na bioolej. [20,22]

Základem pro tento typ technologie je kuželový reaktor (obr. 15). Technologie BTG spočívá v prohřívání biomasy v reaktoru horkým pískem jako teplosměnným médiem. [13,14,17]

Zhodnocení

Velikost pyrolýzních jednotek se liší od množství zpracovaného odpadu za hodinu, existuje zde poměrně velké rozmezí, kdy menší jednotky zpracovávají několik kilogramů za hodinu až po jednotky, které jsou schopné pyrolyticky zpracovat až několik desítek tun za hodinu. (například jednotka PYROMATIC - 100kg/hod, systém RCP - 6 000 kg/hod). Pyrolýza jakožto spalovací proces, pomáhá často při zneškodňování nebezpečných materiálů. Proto má využití v různých oblastech průmyslu. [4,20,22]

6. Mikrovlnná pyrolýza

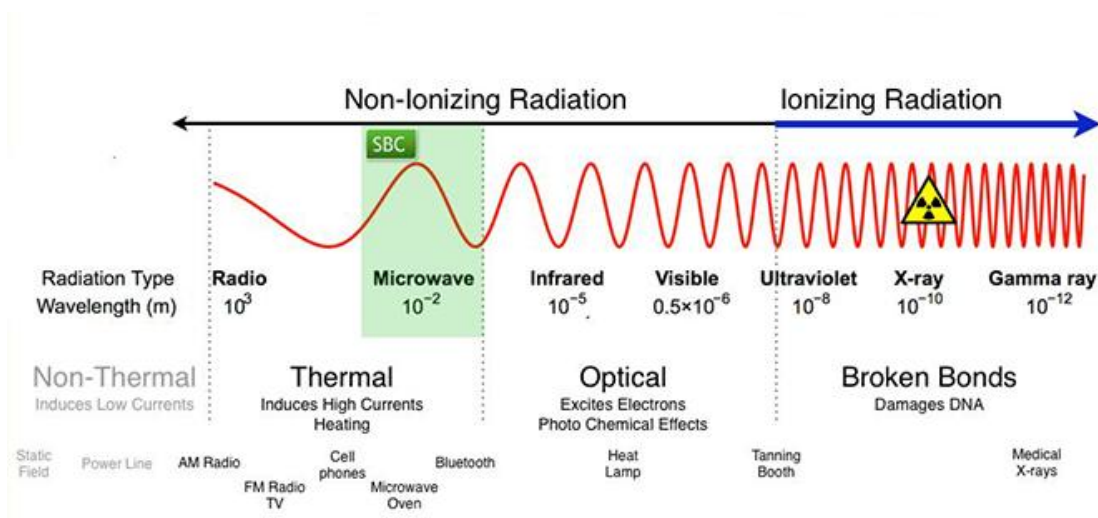
Ohřev pomocí mikrovln je v dnešní době velmi rozšířený jak v použití domácnostech, tak v průmyslu. Technologie mikrovlnného ohřevu má uplatnění zejména tam, kde není dosažen žádoucí efekt konvekčním ohřevem. [21]

6.1 Mikrovlny

Mikrovlny se skládají z elektrického a magnetického pole, která jsou na sebe kolmá a vytvářejí se v magnetronu. Tato pole se nacházejí v oblasti elektromagnetického spektra mezi infračerveným zářením a rádiovými vlnami s vlnovou délkou mezi 0,001 a 1 m, což odpovídá frekvencím 300 a 0,3 GHz.

Mikrovlny se skládají z elektrického a magnetického pole, která jsou na sebe kolmá. Na základě interakce s elektrickým polem lze podle [15] materiály rozdělit na:

- transparentní (nepolární)
- absorpční (polární)
- odrážející (kovy)
- smíšené absorbéry



Obrázek 15 Rozsah vlnových délek [27]

Obrázek 16 zobrazuje rozsah vlnových délek jednotlivých druhů záření.

6.2 Princip mikrovlnného ohřevu

Energie mikrovln není přeměněna primárně přenosem nebo kondukcí jako u konvekčního ohřevu, ale dielektrickou ztrátou. V elektrickém poli dochází k orientaci molekul podle polarity. Polarita vysokofrekvenčního elektromagnetického pole se mění více než 10^9 krát za sekundu. Polární molekula je nucena se těmto rychlým změnám přizpůsobit, ale sotva se přizpůsobí, již se polarita opět změní. Tím jsou vyvolány oscilační vibrace, až rotace molekul, kdy dochází

ke tření a chaotickým srážkám molekul. To se projeví jako teplo, což znamená, že došlo k přeměně mikrovlnné energie na tepelnou. [15]

Mechanismus přeměny mikrovlnné energie na teplo je dán vztahem:

$$P = 2\pi f \varepsilon \ddot{E}^2 \quad (9)$$

P [W/m^3] - energie absorbovaná v jednotce objemu

f [Hz] - frekvence mikrovlnného pole

ε [F/m] - permitivita

\ddot{E} [-] - dielektrický ztrátový faktor materiálu

E [V/m] - intenzita elektrického pole uvnitř materiálu

Ohřev biomasy

Tento proces ohřevu se týká absorpčních charakteristik a vlastností elektromagnetického pole uvnitř dutiny. Biomasový substrát je tvořen širokým spektrem molekulárních struktur, přičemž každá z nich má jiné vlastnosti. Agitace molekul záleží na struktuře a stupni polarizace. Voda, která je obsažena ve struktuře biomasy, absorbuje nejvíce mikrovlnné energie vzhledem k polarizaci vyvolané elektrickým polem. Při nízkých frekvencích se dipóly v elektrickém poli snadno mění a k jejich změnám orientací dochází ve fázích s těmito poli. Při vyšších frekvencích jsou změny orientací náročnější kvůli jejich setrvačnosti a dipóly zaostávají za poli. Při frekvencích v řádu GHz se fáze zpožďuje za elektrickým polem. [16,17,21]

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 \quad (10)$$

Rovnice 10 [16] popisuje výpočet permitivity (veličiny vyjadřující vliv látky na elektrické pole) dielektrika

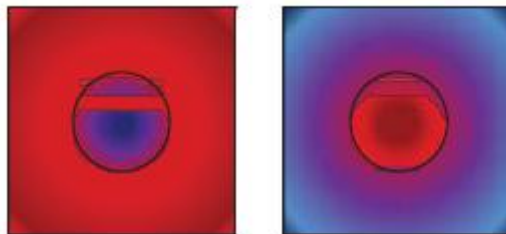
ε - permitivita dielektrika

ε_1 - polarizace materiálu cizím elektrickým polem

$i\varepsilon_2$ - ztrátový faktor- účinnost převodu elektrické energie na teplo

Mikrovlny procházejí materiálem a vkládají energii tak, že se teplo generuje v celém objemu materiálu lépe než z externího tepelného zdroje. Mikrovlnný ohřev je konverze energie a ne přestup tepla.

a) konvekční ohřev b) mikrovlnný ohřev



Obrázek 16: Porovnání teplotních polí [15]

Obrázek 17 popisuje rozložení teplotních polí, kružnice představuje vzorek ohřátého materiálu a čtverec představuje dutinu ohřevu (červená ukazuje maximální hodnotu teplotního pole).

Mikrovlnný ohřev má vyšší rychlost ohřevu na základě toho, že mikrovlnná energie je dodávána materiálu přímo přes molekulární interakci s elektromagnetickým polem. Vysoká rychlost ohřevu zdokonaluje materiálu a zkracuje dobu konverze. [15,21]

6.3 Princip mikrovlnné pyrolýzy

Efektivita procesu mikrovlnné pyrolýzy závisí na povaze zpracovávaného materiálu, protože materiály mají různé dielektrické chování.

Mikrovlny o frekvenci 2,45 GHz jsou generovány magnetronem a poté se vedou vlnovodem do prostoru (kavity), kde jsou rozptýleny. Mikrovlny se odrážejí od stěn a vytvářejí zde mikrovlnné pole. Mikrovlny se zde spotřebovávají pohlcením v absorpčních materiálech za vzniku tepla. Pokud se ve v prostoru působících mikrovln vyskytuje materiál s nízkou nebo žádnou absorpční schopností, dochází ke zpětnému odrazu mikrovln do magnetronu a tím dochází ke snižování životnosti magnetronu. Účinnost magnetronu při přeměně elektrické energie na mikrovlnou je maximálně 70 %. Ztráty jsou tepelného charakteru a vznikají na magnetronu, který je nutno chladit. [12]

Režim procesu rozkladu pomocí mikrovln je veden při teplotách od 300 °C do 350 °C, což jsou velmi mírné podmínky, kdy je tvorba lehkých plynných uhlovodíků nízká. Doba zdržení je cca 1 hod., v některých případech může dojít ke zdržení jen 10 minut. K materiálu se přidává katalyzátor ve formě zeolitu a dusičnanu železnatého $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$, aby se zvýšila schopnost materiálu absorbovat mikrovlnné záření. Teploty v materiálu dosahují téměř 1000 °C. [13,16]

Rozkladem pomocí mikrovlnné pyrolýzy lze z různých uhlíkatých odpadních materiálů (biomasy, bio-odpady, drcené pneumatiky, ropné písky) získat plynné a zkapalnitelné uhlovodíky, tuhý zbytek. [15,16]

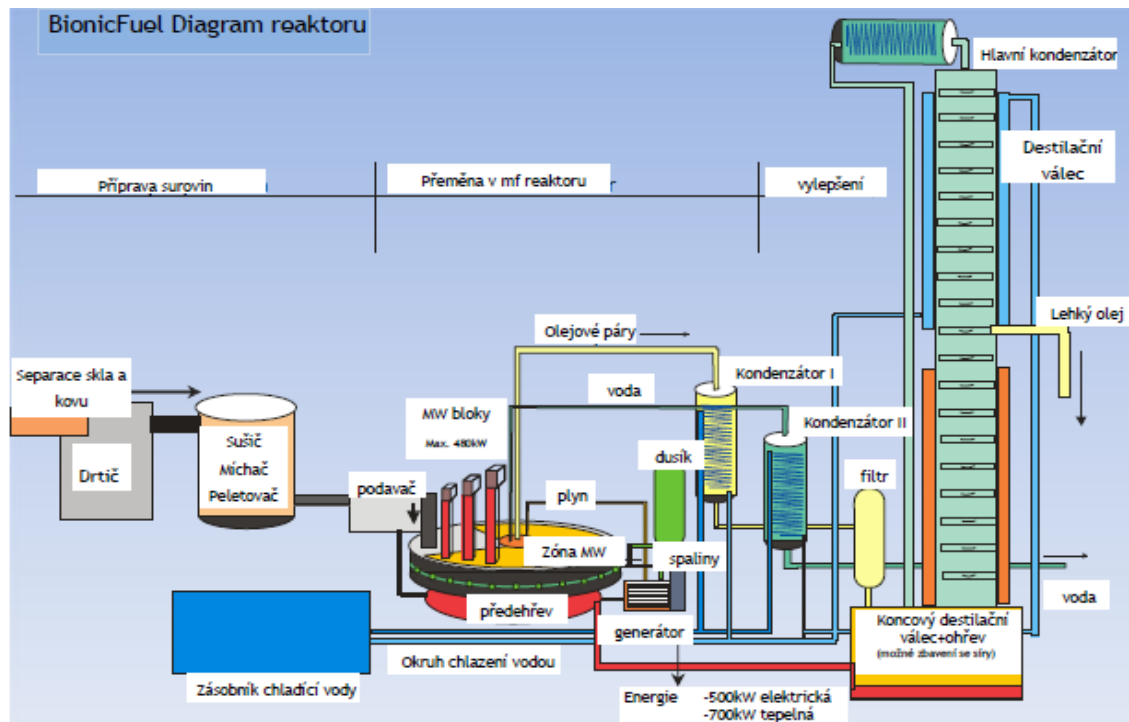
6.4. Zpracování biomasy mikrovlnou pyrolýzou

Příprava materiálu

Vstupní materiál musí být vysušen na požadovanou vlhkost (10 % - 15 %) a rozemlet na příslušnou velikost částic (1 - 3 mm). Poté je smíchán s katalyzátorem (zeolit s dusičnanem železnatým) a slisován do pelet o průměru 6 - 10 mm. [14]

Popis funkce reaktoru firmy Bionicfuel

Vstupní suroviny jsou vkládány pomocí šnekového dopravníku do pyrolyzního reaktoru, odkud je odsáván vzduch, tak aby se zabránilo přístupu kyslíku do reaktoru. Dále jsou pelety zahřívány pomocí mikrovlnné energie na teplotu, při které dochází k zániku vazeb mezi pevnou látkou a těkavými látkami. U povrchových teplot kolem 300 °C - 350 °C kombinovanými s účinky impulsního mikrovlnného záření, aktivovanými částicemi uhlíku a katalyzátoru popraskají hydro-uhlíkové molekuly uvnitř suroviny, na menší, lépe těkavé molekuly v podobě olejových par. Těkavé látky ve formě páry, které jsou následně odděleny do kondenzovatelné frakce a plynu. Vstupní reaktor je vybaven otočným plnicím. Biomasa je ohřívána pomocí mikrovln na příslušné straně reaktoru, což odpovídá reakční době. Po tomto ohřevu je vzniklé uhlí přepouštěno přes uhlíkové chladiče do zásobníku. Plyny, které se vytvoří v reaktoru, prochází přes ohříváč a následně jsou odvedeny do palivového plynu, který je odveden do zásobníku plynu. Plynná frakce vytvořená v reaktoru proudí do kondenzátoru a kondenzovaná forma těkavých plynů je surový bioolej. [16]



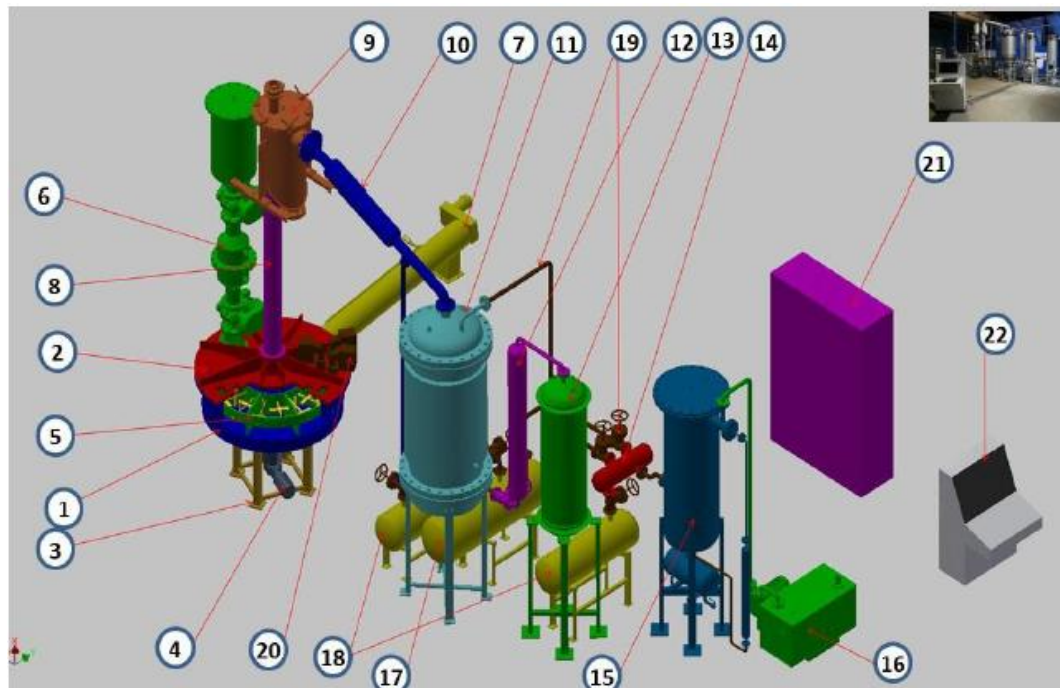
Obrázek 17: Schéma zařízení mikrovlnné pyrolýzy [14]

Obdobný proces mikrovlnné pyrolýzy může být používán i pro jiné druhy materiálu (pneumatiky, RDF, ropné písky).

Tabulka 3: Produkce biooleje v závislosti na typu vstupního materiálu [16]

Vstupní surovina	Výnosy biooleje
(suchá hmota, 10% vlhkost)	
Dřevo	34,0 %
Sladká kukuřice	35,0 %
Kejda	44,0 %
Miscanthus	39,0 %
Biomasa	35,0 %
Palmový koláč	49,0 %
Kal /RDF mix	53,0 %
RDF(42MJ)	54,0 %
RDF hydratované	68,0 %
Řepka- koláč	55,0 %
Rozemleté pneumatiky	60,0 %
Piliny	34,0 %
Rákos	36,0 %
Odpad z recyklace	78,0 %
Sláma	35,0 %
Vosk	89,0 %
Pšeničné otruby	42,0 %

Schéma zařízení, které používá firmy Bionic Fuel, které je postavené firmou Šmeral Brno a.s. je znázorněno na obrázku 19.



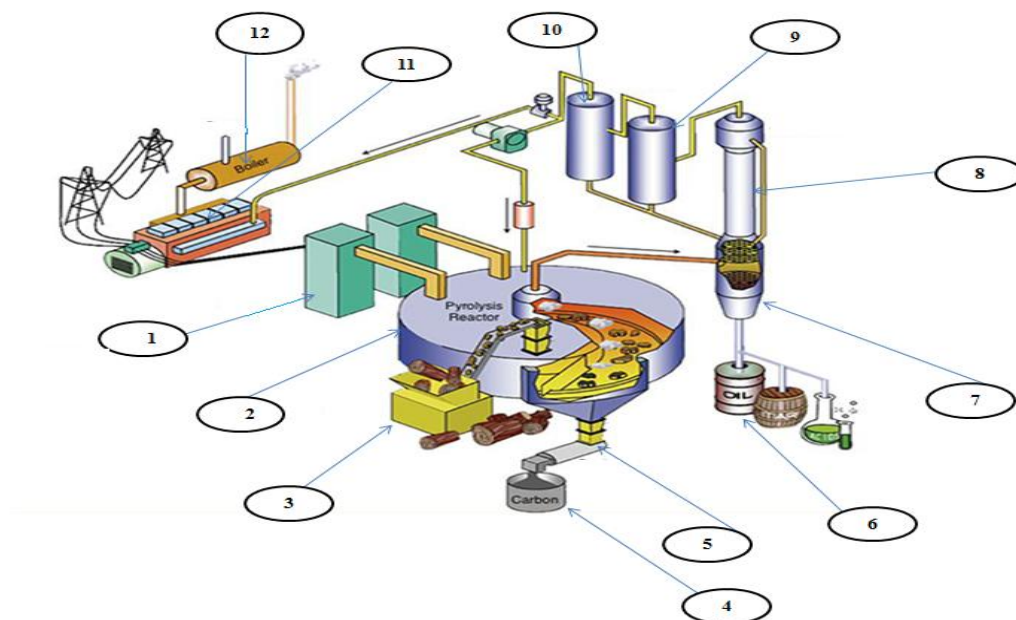
Obrázek 19: Schéma zařízení mikrovlnné pyrolýzy od firmy Bioniefuel [14]

1 - tělo reaktoru; 2 - kryt reaktoru; 3 - stojan reaktoru; 4 - motor, převodovka, rotor;
 5 – míchání; 6 - vstupní sekce; 7 - dochlazovací výměník; 8 - parní trubka;
 9 - výstup spalin; 10 - chladič spalin; 11 - chladič 1; 12 - ohřev spalin;
 13 - chladič 2; 14 - sběrač; 15 - pračka plynu; 16 - vakuový systém; 17 - nádoba na
 300 l; 18 - nádoba 150 l; 19 - potrubí; 20 - mikrovlnné zářiče; 21 - rozvodová skříň;
 22 - ovládací pult

Další příklad reaktorů pro mikrovlnou pyrolýzu.

Schéma zařízení, které používá firma Scandianvian Biofuel

Biomasa (3) je ohřívána pomocí mikrovln (1) na příslušné straně reaktoru (2), což odpovídá reakční době. Po tomto ohřevu je vzniklé uhlí přepouštěno přes uhlíkové chladiče (5) do zásobníku (4). Plyny, které se vytvoří v reaktoru, prochází přes ohříváč a následně jsou odvedeny do palivového plynu, který je odveden do zásobníku plynu (9). Plynná frakce vytvořená v reaktoru proudí do kondenzátoru (8) a kondenzovaná forma těkavých plynů je v kondenzátoru zkondenzována a v koloně (7) vyčištěna na surový bioolej (6). Vzniklé plyny jsou následně využity v kogenerační jednotce pro tvorbu tepla (12) (ohřev vstupních surovin, dodávka tepla pro domácnosti) a výrobu elektrické energie (11).



Obrázek 2018: Schéma mikrovlnného pyrolýzního zařízení od firmy Scandinavian fuel [27]

1 – zdroj mikrovlnného zařízení; 2 – tělo reaktor; 3 - vstupní suroviny; 4 – biouhlí; 5 – chladič biouhlí; 6 – výstupní produkty; 7 -kolona; 8 -kondenzátor; 9 – čistič plynu 1; 10 – čistič plynu 2; 11- kogenerační jednotka; 12 - čistič spalin.

6.5 Produkty mikrovlnné pyrolýzy odpadu

6.5.1 Pevné látky

Uhlí, které vzniká při mikrovlnné pyrolýze, má vysokou čistotu uhlíku a se svou kvalitou výhřevnosti je srovnatelné s fosilním uhlím. Může být dále upravováno na aktivní uhlí nebo může být přidáváno do půdy. Aktivní uhlí má otevřené porézní struktury s výbornými hydrofobními a adsorpčními vlastnostmi. Další výhodami jsou schopnost vázat NH_3 v hnoji a mikrobiologických procesech. [14,15]



Obrázek 19: Aktivní uhlí zvyšuje vlastnosti ornice [14]

Další oblast využití zahrnuje stavebnictví, kde je aktivní uhlí využíváno k izolaci, k regulaci vlhkosti a jako ochrana proti elektromagnetické radiaci. Aktivní uhlí se také využívá k zachytávání těkavých látek. [14]

6.5.2 Plynné látky

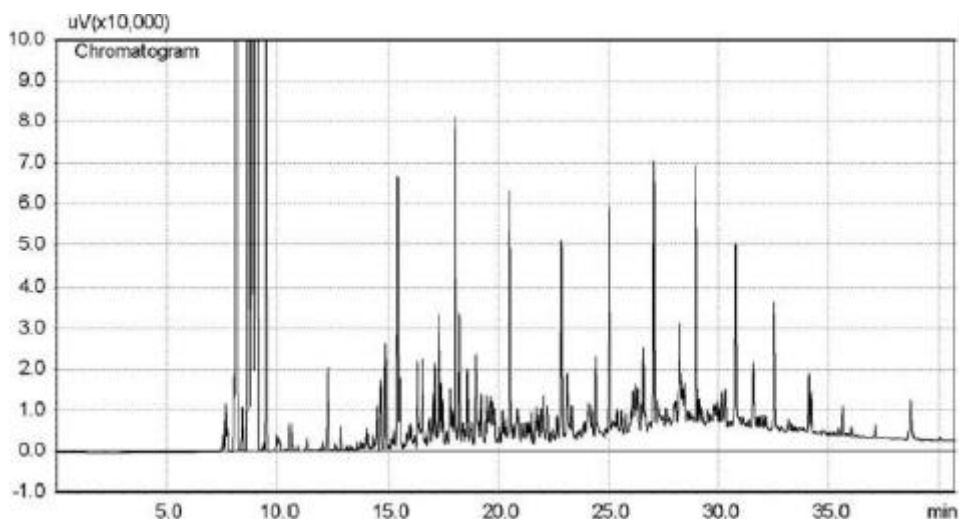
Při mikrovlnné pyrolýze vznikají v počáteční fázi ohřevu směsi metanu, propanu nebo pentanu a další vysoce těkavé organické sloučeniny. Vznik škodlivých plynů (sloučeniny síry a dusíku) je závislý na druhu surovin. [13,14]

6.5.3 Kapalné produkty

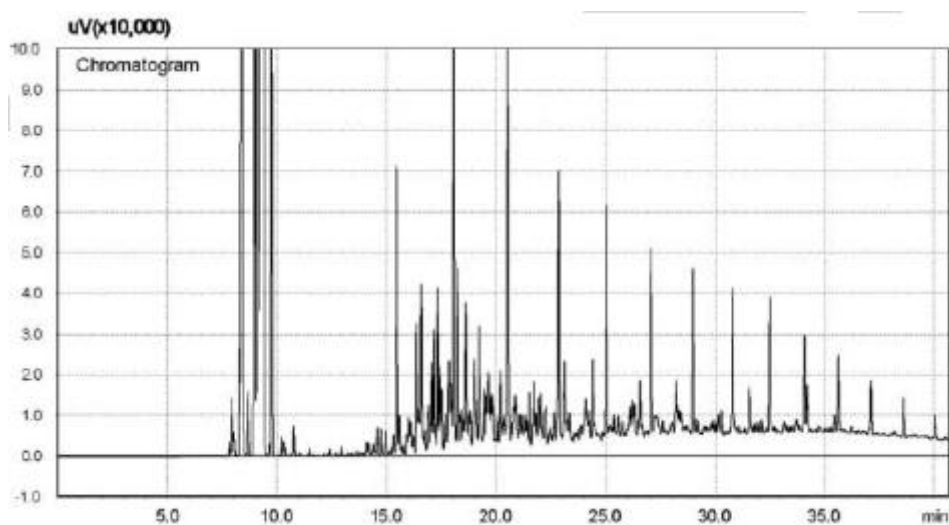
Výnosy a kvalita biooleje, které vznikají procesem mikrovlnné pyrolýzy se značně liší v závislosti na typu suroviny. Bioolej lze přímo využít pro výrobu elektrické energie spalováním nebo po rafinacích pro vytápění a jako pohonné hmoty. [14]

Výnosy kapalné fáze při pyrolýze mohou být dále upravovány pomocí katalyzátorů přidávaných do vstupního materiálu.

Firma BionicFuel vyrobila lehkou naftu ze slámy rafinací biooleje jako produktu z procesu mikrovlnné pyrolýzy. Kvalitativní parametry této lehké nafty ze slámy jsou srovnatelné s motorovou naftou z čerpací stanice viz níže uvedené srovnání na obrázcích 22 a 23.



Obrázek 20: Lehká nafta ze slámy [14]



Obrázek 21: Nafta z čerpací stanice [14]

Obrázky 22 a 23 porovnávají chemické složení lehké nafty ze slámy a nafty z čerpací stanice na chromatografu. [14,17]

6.6 Porovnání konvekční a mikrovlnné pyrolýzy

Metoda mikrovlnné pyrolýzy v porovnání s konvekční pyrolýzou vykazuje řadu výhod. Depozice mikrovlnné energie v dielektrických ztrátách způsobí téměř rovnoměrný ohřev. Kvůli specifickým vlastnostem vyhřívacího mechanismu mikrovlnné pyrolýzy, které poskytují přenos pomocí změn elektrických polí vzájemně působící s molekulami dipólu, je regulace procesu velice jednoduchá. Tyto výhody zlepšují energetickou účinnost a také vylepšují cenu za skladování, drcení a vysoušení vstupního materiálu. [14,15,16]

6.6.1 Výhody mikrovlnné pyrolýzy

- Flexibilita surovin a produktů - vznik uhlovodíků $C_{11}-C_{65}$
- Možnost kombinací s více jednotkami pro mikrovlnnou pyrolýzu – zdroje mikrovln jsou rozmístěny po kruhovém obvodu otočného stolu a v závislosti na rozměrech otočného stolu je možné kombinovat více zdrojů mikrovlnného záření
- Rychlý a rovnoměrný ohřev - jak je možné vidět v obrázku 18 kde je ohřev soustředěn pouze do prostoru vnitřní dutiny. Materiál může být zdržen v reaktoru 10 minut.
- Zpracování nehomogenních odpadů – pomocí mikrovlnné pyrolýzy je možno zpracovávat i komunální odpad
- Nové materiály a výrobky – při procesu mikrovlnné pyrolýzy vznikají nové produkty jako bio- uhlí

6.6.2 Nevýhody mikrovlnné pyrolýzy

- Zvýšené vstupní ekonomické náklady - pro výstavbu nového projektu jsou kladeny vysoké počáteční investice.
- Rozsáhlá škála nehomogenity produktů – podle složení daného materiálu vznikají různé procentuální zastoupení uhlí, biooleje, syntézního plynu. Konkrétní hodnoty pro výtěžnost bio-oleje jsou odlišné v závislosti na typu vstupního materiálu.

6.7 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické údaje provozu mikrovlnné pyrolýzní jednotky byly poskytnuty společností Bionic Laboratories BLG GmbH Gross-Gerau, Germany pracoviště Brno. [14]

BionicFuel náklady a ziskovost

	surovina=drčené pneumatiky		surovina=plasty	
	2014 (fáze 1)	2015 (fáze 2)	2014 (fáze 1)	2015 (fáze 2)
Produkce v milionech litrů	10.9	18.2	9.3	14.3
Prodejná nafta v milionech litrů	9.8	16.0	7.3	11.3
V bbl	60,360	100,800	48,014	70,790
Náklady na suroviny(+)/ poplatky(-)	797,243	1,421,441	-483,990	-558,450
výnosy z vedlejších produktů (ocel,...)	-1,801,442	-2,802,624	-416,779	-892,494
Provozní náklady	1,783,198	3,036,632	2,111,151	3,036,632
Kapitálové náklady (15let amortizace)	865,203	960,996	1,110,444	1,378,545
Provozní náklady na litr	0.102	0.104	0.165	0.159
Kapitálové náklady na litr	0.090	0.060	0.152	0.122
Celkové náklady na prodaný litr	0.192	0.164	0.317	0.281
	25%	20%	42%	34%
Příjmy za litr	0.764	0.825	0.764	0.825
	100%	100%	100%	100%
Zisk za litr	0.572	0.662	0.447	0.544
	75%	80%	58%	66%

konverze na US \$ / barel pro lepší Porovnání s fosilními palivy / produkty		X-sazba US\$ za €: 1.3		
Všimněte si, rozdíl v kvalitě upravené fosilní ropy a bionicfuel = nafta	€	US\$	€	US\$
Výrobní náklady na galon (us)	0.39	0.50	0.39	0.51
Kapitálové náklady na galon (us)	0.34	0.44	0.23	0.30
Celkové náklady na galon (us)	0.73	0.95	0.62	0.80
Výrobní náklady na bbl	16.22	21.09	16.46	21.39
Kapitálové náklady na bbl	14.33	18.63	9.55	12.42
Celkové náklady na bbl	30.55	39.72	26.01	33.81

Výpočty jsou založeny na zařízení, jehož součástí je jeden reaktor mf480. Náběh je ve 2 po sobě jdoucích fázích.

Vstupní suroviny: 31K - 38K tun / rok
Provozní doba: 24/7
IRR: <30-40% ROI: <4 roky

Zahrnuje veškeré přiměřené provozní náklady, včetně režie. Náklady na suroviny / úvěry a výnosy z vedlejších produktů, se berou v úvahu.

Sečteno a potvrzeno hrubé ziskové marže mluví samy za sebe. Čísla byla získána z plánů podnikání vyvinutých firmou Bionic pro jednotlivé německé klienty.

Společný ukazatel se většinou používá v průmyslu k posouzení a porovnání technologií. US \$ je považován mnohými komentátory za prahovou hodnotu.

Sečteno a potvrzeno: BionicFuel snadno konkuruje fosilním zdrojům, jako jsou hluboké moře, dehtový pisek, nebo břidlice, i na hrubé úrovni, s kvalitou srovnatelnou s rafinovanými fosilními produkty.

Obrázek 22: Předpokládané výnosy [14]

Z výše uvedených údajů za rok 2014 a 2015 vyplývá, že provozování mikrovlnné pyrolýzní jednotky generuje zisk. Předpokládaná návratnost investice dle ROI (return on investment) je do 4 let. [14]

7. Závěr

Mikrovlnný ohřev se jeví jako jedna z nejvyspělejších technologií v procesu pyrolýzy.

Užití mikrovlnné energie v procesu pyrolýzy vede k energetickým úsporám a zároveň zkracuje průběh procesu pyrolýzy. Mikrovlnná pyrolýza nejen překonává nevýhody metody konvekční pyrolýzy (jako je pomalý ohřev a nutnost rozdrtit vstupní materiál), ale rovněž zlepšuje kvalitu finálních produktů pyrolýzy. Zároveň výrazně šetří čas na zpracování a energii. Existuje stále několik hlavních omezení, která brání použití této technologie v průmyslu pro zpracování odpadů, které zahrnují nedostatek údajů pro stanovení dielektrických vlastností zpracovaného odpadu, nutnost multidisciplinárního přístupu pro konstrukci a vývoj odpovídající konverzní jednotky a nejistota týkající se současným cen.

Mikrovlnná pyrolýza umožňuje, ale rozvoj nových chemických profilů těkavých látek což zvyšuje kvalitu výroby.

Mikrovlnná pyrolýza se považuje za nový přístup v modernizaci k získávání pyrolýzních par. Oleje, vzniklé touto metodou obsahují menší množství nebezpečných sloučenin. Zároveň produkují více chemických látek, které jsou pro průmysl dále lépe zpracovatelné než látky produkované konvekční pyrolýzou (lehká slámová nafta).

Hlavními faktory ovlivňujícími proces pyrolýzy jsou stále vlastnosti materiálu a provozní podmínky, určující charakteristiky a výnos finálních produktů.

Přesto lze konstatovat, že mikrovlnná pyrolýza může být dále vyvíjena jako novodobý efektivní přístup ke zpracování odpadů.

Z ekonomického hlediska jsou nově postavené mikrovlnné pyrolýzní jednotky rentabilní.

8. Seznam použité literatury

- [1] OBROUČKA, Karel. *Termické zneškodňování odpadů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1997. ISBN 80-7078-505-5.
- [2] PASTOREK, Zdeněk, KÁRA, Jaroslav, JEVIČ, Petr, Biomasa: Obnovitelný zdroj energie. 1. vyd. Praha: FCC Public, 2004. 288s. ISBN 80-86534-06-5.
- [3] POHOŘELÝ, Michael, JEREMIÁŠ, Michal: Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění (kolektiv autorů), Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie (OZE2010)
- [4] TRÁVNÍČEK, Petr. *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. Vyd. 1. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-206-9.
- [5] JEVIČ, Petr. *Termolýzní zpracování zbytkové biomasy, separovaných plastových a celulózových podílů tuhého komunálního odpadu pro energetické a surovinové účely: certifikovaná metodika*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2012. ISBN 978-80-86884-67-7.
- [6] FRANTÍK, Jaroslav. *Návrh využití plynu z pyrolyzní jednotky pro výrobu elektrické energie: The design of using gas from a pyrolysis unit for producing electric energy*. 1. vydání. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3784-0
- [7] Technologický řetězec [online]. [cit.2016-04-26]. Dostupné z <http://www.odpadjeenergie.cz/vyroba-energie/proces-1/technologicky-retezec.aspx>
- [8] Skládkový plyn.Byomass teology [online]. 2009 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: http://biomasstechnology.cz/wp/?page_id=239
- [9] ŽÁKOVÁ, Markéta *Skládkový plyn*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vratislav Bednařík Ph.D
- [10] Tadeáš Ochodek, Jan Koloničný, Michal Branc. *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*. 2007
- [11] Basu, Prabir. *Combustion And Gasification In Fluidized Beds*. New York : Taylor & Francis, 2006. Dostupné z: <https://uicchemgroupa.wikispaces.com/file/view/Combustion+and+Gasification+in+Fluidized+Beds.pdf>
- [12] BÉBAR, L.; PAVLAS, M.; PAŘÍZEK, T.; URBAN, L.; STEHLÍK, P. *Podmínky efektivního energetického využívání odpadů*. Konferenční CD, 54. konference chemického a procesního inženýrství, CHISA 2007. konferenční CD. Srní: ČSCHI, 2007. ISBN: 80-86059-47- 2.
- [13] J. Malt'ák. *Termické zpracování odpadů-spalovny*. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z : <http://odpady.tf.czu.cz/p/Spalov.pdf>
- [14] The Bionic Enterprises Group *Mikrovlnná deporalyzace* [online] [cit. 2016 -04 - 18]. Dostupné z: bionic-fuel.com
- [15] J. Lutcha, *Mikrovlnný ohřev aplikovaný na pyrolýzu* [cit. 2016-05-01]. Dostupné z : <http://www.bionic-world.eu/index.php/ru/download>
- [16] J. Lutcha, *Biomass Microwave Pyrolysis*. 2015. [cit. 2016 -03-27. Dostupné z : <http://www.bionic-world.eu/index.php/ru/download>.
- [17] The Bionic Enterprises Group *Bionic μ CTL brings microwaves to coal liquefaction* [cit. 2016-04-17]. Dostupne z : <http://bionicfuel.blogspot.cz/2013/03/bionic-uses-microwaves-for-coal.html>
- [18] *zakonyprolidi.cz zákon odpadech 185/2001 Sb* [online] 2001 [cit. 2016-05-8]. Dostupné z : <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [19] P.Ryant *Odpadové hospodářství* [cit. 2016-05-01]
- [20] FITE a.s, *VŠB. Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadu* [online] 2010 [cit. 2016-25-04]. Dostupné z: <http://www.opzp2007-2013.cz/ke-stazeni/252/10821/detail/studie-zarizeni-na-pyrolytický-rozklad-odpadu-i/>

-
- [21] M. Hájek *Mikrovlny v akci* [online]. [cit.2016-04-14]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Diagnostics/Basic/Interferometry/instructions/Mikrovlny%20v%20akci.pdf>
- [22] A.Tumbalam Gooty , *Fractional condensation of bio-oil vapors* [online]2013[cit.2016-03-08] Dostupné z : <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=2387&context=etd>
- [23] Olofsson I, Nordin A, Söderlind U: *Initial Review and Evaluation of Process Technologies and System Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels* (2005)
- [24] T. Ochotek. – J.Kdoniční, – M. Branc.,. *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*. Ostrava: VŠB-TU, 2007. I. vydání, ISBN 987-80-248-1416-1
- [25] Biom.cz *Kompostování biomasy* [online] 2014 [cit. 2016 -03-20] Dostupné z : <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompostovani-zbytkove-biomasy>
- [26] HONUS, Stanislav. *Metoda zvýšení efektivity termických procesů v reaktorech pro energetické konverze: Method for increase in efficiency of thermo processes in reactors of energy conversion*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2746-9.
- [27] sbiofuel.com *Scandinavian microwave pyrolysis* [online] 2012 [cit. 2016 -05-01] Dostupné z :Scandinavian <http://www.sbiofuel.com/pyrolysis.html>
- [28] Volny.cz válcová pyrolýzní pec [online] 2008 [cit. 2016- 04-12] Dostupné z: <http://www.volny/Najdi/pneumatiky/Pneumatiky.cz>
- [29] strobo.cz *reaktor šnekového typu* [online] 2012 [cit.2016 -04-29]Dostupné z: <http://www.strobo.cz/editor.php?kategorie=1023sekce=1008>
- [30] Btg.cz. *Technologie pro rychlou pyrolýzu* [online] 2015 [cit. 2016 -03-08] Dostupné z : <http://www.btg.cz/technologie-btg-pro-rychlou-pyrolyzu.html>
- [31] biom.cz *Zplyňování biomasy* [online] 2010 [cit 2016-04-10] Dostupné z : <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>
- [32] zakonyprolidi.cz *novela zákona o odpadech 185/2001 Sb* [online] 2015 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-223>

9. Seznam tabulek a obrázku

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Schéma spalovny komunálního odpadu</i>	13
<i>Obrázek 2: Závislost rovnovážných konstant na teplotě [10]</i>	15
<i>Obrázek 4: Autotermní a alotermní zplyňování</i>	16
<i>Obrázek 5: Schéma kompostovací linky</i>	18
<i>Obrázek 6: Fáze průběhu fermentace</i>	19
<i>Obrázek 7: Dělení pyrolýzy podle teploty, doby zdržení par a rychlosti ohřevu</i>	22
<i>Obrázek 8: Válcová pec</i>	23
<i>Obrázek 9: Šnekový reaktor</i>	24
<i>Obrázek 10: Fluidní reaktor se stacionární vrstvou</i>	25
<i>Obrázek 11: Fluidní reaktor s cirkulující vrstvou</i>	26
<i>Obrázek 12: Rotační kuželový reaktor</i>	27
<i>Obrázek 13: Abláční reaktor</i>	27
<i>Obrázek 14: Produkce plynných frakcí v závislosti na teplotě</i>	28
<i>Obrázek 15: Schéma zařízení firmy BTG</i>	29
<i>Obrázek 16: Rozsah vlnových délek</i>	31
<i>Obrázek 17: Porovnání teplotních polí</i>	33
<i>Obrázek 18: Schéma zařízení mikrovlnné pyrolýzy</i>	34
<i>Obrázek 20: Schéma mikrovlnného pyrolýzního zařízení od firmy Scandinavian fuel</i>	37
<i>Obrázek 21: Aktivní uhlí zvyšuje vlastnosti ornice</i>	38
<i>Obrázek 22: Lehká nafta ze slámy</i>	39
<i>Obrázek 23: Nafta z čerpací stanice</i>	39
<i>Obrázek 24: Předpokládané výnosy</i>	41

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Průměrné procentuální složení skládkového plynu během prvních 48 měsíců</i>	18
<i>Tabulka 2: Obsah živin, pH, poměr C:N obsažených v kompostu</i>	20
<i>Tabulka 3: Produkce biooleje v závislosti na typu vstupního materiálu</i>	35