

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

PYROLYTICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

MATOUŠ ANDĚL

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a Příjmení

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat panu Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky poskytnuté v průběhu vypracování této bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora: Matouš

Příjmení autora: Anděl

Název práce česky: Pyrolytické zpracování odpadů

Název práce anglicky: Pyrolysis of wastes

Rozsah práce: počet stran: 42
počet obrázků: 13
počet tabulek: 17
počet příloh: 0

Akademický rok: 2015/2016

Jazyk práce: čeština

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

Oponent:

Konzultant práce:

Zadavatel: Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

Anotace česky: Práce je rešerší na téma pyrolytického zpracování odpadů. Jsou zde uvedeny základní principy a teorie pyrolýzy a dále jsou zde popsány produkty a jejich chemicko-fyzikální vlastnosti pro různé druhy zpracovávaného materiálu a podmínky. Dále jsou popsány způsoby technologického uspořádání procesů a druhy reaktorů používané ve světě spolu s několika příklady již fungujících procesů. Práce také obsahuje shrnutí a porovnání jednotlivých typů reaktorů a jejich využití pro určité druhy odpadu s návrhem blokového technologického schématu uspořádání poloprovozní jednotky pro pyrolýzní zpracování komunálního odpadu.

Anotace anglicky: This thesis is a literature search on the topic of pyrolysis waste treatment. The basic principles and theory of pyrolysis along with their psychical and chemical

characteristics for different types of material being processed are described. The methods of technological arrangement of processes and types of reactors used in the world are further disclosed, along with several examples of already working processes. The work also includes a summary and comparison of various types of reactors and their use for certain types of waste. The block diagram layout technology for pyrolysis pilot plant processing municipal solid waste is designed.

Klíčová slova: pyrolýza, odpad, komunální odpad, biomasa

Využití: Studijní materiál, který přehledně prezentuje současný stav technologie pyrolýzního zpracování odpadů.

Obsah

1. Úvod.....	7
1.1 Motivace pro pyrolytické zpracování odpadů.....	7
2. Pyrolýza.....	8
2.1 Princip.....	8
2.2 Procesní parametry.....	9
2.3 Produkty pyrolýzy.....	10
2.3.1 Pyrolýza biomasy.....	11
2.3.2 Pyrolýza komunálního odpadu.....	12
2.3.3 Pyrolýza pneumatik.....	15
3. Technologie pyrolytického zpracování.....	17
3.1 Pyrolýzní reaktory.....	19
3.1.1 Reaktor s pevným ložem.....	19
3.1.2. Reaktory s rotační pecí.....	20
3.1.3. Reaktory s fluidním ložem.....	20
3.1.4. Abláčnı́ reaktor.....	22
3.1.5. Rotační kuželový reaktor.....	22
3.1.6. Šnekový reaktor.....	23
3.2. Porovnání jednotlivých druhů reaktoru.....	23
4. Pyrolýza ve světě.....	25
4.1. BTG.....	25
4.2. Technologie BioTherm.....	26
4.3. RTP (rapid thermal processing).....	26
4.4 GB Pyrolysis.....	27
4.5. Thermoselect.....	28
4.6. Babcock.....	29
4.7. Technologie S-B-V (Schwel-Brenn-Verfahren).....	29
4.8. Pyromatic.....	30
5. Speciální technologie pyrolytického zpracování.....	32
5.1. Plasmová pyrolýza.....	32
5.2. Vakuová pyrolýza.....	32
5.3. Mikrovlnná pyrolýza.....	34
5.4. Hydropyrolýza.....	35
5.5. Shrnutí vlastních poznatků.....	35
6. Návrh blokového schématu pyrolytického zpracování komunálního odpadu.....	37
6.1 Blokové schéma.....	39
7. Závěr.....	40
Seznam použité literatury.....	41

1. Úvod

1.1 Motivace pro pyrolytické zpracování odpadů

Jedním z hlavních znaků současné lidské civilizace je neustále se zvyšující spotřeba energie všeho druhu. V minulém století byla a i dnes je většina této energie brána z tzv. vyčerpatelných zdrojů jako uhlí a ropa. Přestože je stále možné nalézat nová naleziště těchto látek, nelze se na to do budoucnosti spoléhat. Byly provedeny různé studie, které uvádějí, kolik ropy či uhlí bude k dispozici za 20, 30, 50 let. Tyto odhady se velmi různí a ke správnému výsledku se pravděpodobně nemáme šanci dostat. Jisté ale je, že jednoho dne dojdou a lidstvo se bez nich bude muset obejít. Stále častěji je tak ve světě skloňován termín „udržitelný rozvoj“, který má za cíl hospodářský, společenský a energeticky udržitelný pokrok s ohledem na životní prostředí a jeho zachování budoucím generacím. Různými způsoby, jak se s tímto problémem vypořádat, je např. snaha o využívání obnovitelných zdrojů energie jako voda, vítr nebo slunce k výrobě elektřiny. Zejména v dopravě je ale drtivá většina strojů závislá na palivech vyráběných z neobnovitelných zdrojů.

Dalším problémem souvisejícím se stále rostoucí spotřebou energie je i významný nárůst množství odpadů, které moderní civilizace produkuje každým dnem. Část se sice dá recyklovat, ale spousta odpadů je bez užitku skladována a působí negativně na svoje okolí. Jednou z možností je samozřejmě spalování těchto odpadů. Tato metoda je díky dnešním technologiím poměrně ekologická, ale dochází zde „jen“ ke zpracování odpadů, případně k získávání tepla nebo elektřiny. Při tom je například ze strany Evropské unie snaha o co možná největší materiálové využití odpadů. Hlavním cílem by mělo být to, se odpadů jednak zbavit a zároveň je při tomto procesu ještě využít k výrobě energie samotné nebo energeticky bohatých látek s možností dalšího využití. Naplněním tohoto cíle by pak již bylo možné přiblížit se k onomu udržitelnému rozvoji. Tento zmíněný efekt při zpracování odpadů si kladou za cíl pyrolytické technologie, o kterých pojednává tato práce. Co nejšetrněji se zbavit odpadů a zároveň z nich získat a recyklovat co nejvíce energie a látek, která v nich ještě stále jsou obsažena.

Cílem této bakalářské práce je poskytnout přehled technologických uspořádání pyrolyzních metod zpracování odpadů typu zemědělské a potravinářské odpady, odpady z dřevozpracujícího průmyslu, komunální odpad, případně další druhy odpadů, včetně informací o produktech těchto procesů. Dále je pak cílem navrhnout blokové schéma uspořádání poloprovozní jednotky pyrolytické jednotky se zaměřením na zpracování komunálního odpadu.

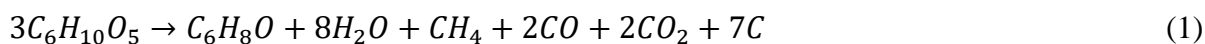
2. Pyrolýza

Pyrolýza je fyzikálně-chemický děj ze skupiny termických procesů, jejichž podstatou je působení na organické látky teplotou za účelem překročení meze jejich chemické stability. Tyto procesy se dále dělí podle chemické povahy probíhajících dějů na oxidativní a reduktivní. U procesů oxidativních dochází k reakci za přístupu kyslíku nebo jiného oxidačního činidla, zatímco u procesů reduktivních není kyslík přítomen nebo je jeho množství zanedbatelné.

Pyrolýza je jedním z reduktivních procesů. Dochází při ní k termickému rozkladu organických látek v atmosféře bez přístupu kyslíku, a tudíž nedochází ke spalování. Reakčními produkty jsou látky plynné, kapalné i pevné, které se většinou nazývají pyrolýzní plyn, pyrolýzní olej a pyrolýzní koks neboli biouhel. [1]

2.1 Princip

Pyrolýza např. biomasy, při které dochází ke štěpení celulózy, se dá zjednodušeně popsat chemickou rovnicí 1:



kdy do reakce musíme přidávat teplo. V produktech rovnice jsou pak vidět jednotlivé kapalné, plynné a pevné složky.

Pyrolýza probíhá v závislosti na teplotě obecně ve třech fázích:

- sušení
- karbonizace
- tvorba plynu

Chemické reakce, ke kterým dochází v průběhu procesu, jsou uvedeny v tabulce 1.

Teplota [°C]	Chemické reakce
100-200	Termické sušení, fyzikální odštěpení vody
250	Deoxidace, desulfurace, odštěpení vázané vody a CO ₂ , depolymerace, začátek odštěpování H ₂ S
340	Štěpení alifatických uhlovodíků, vznik metanu a jiných alifatických uhlovodíků
380	Karbonizační fáze
400	Štěpení vazeb uhlík-kyslík, uhlík-dusík
400- 600	Přeměna bitumenových složek na pyrolýzní olej a dehet
> 600	Krakování za vzniku plynných uhlovodíků s krátkým uhlíkovým řetězcem, vznik aromátů podle následujícího schématu: nad 600°C dimerizace etyleny na buten, dehydrogenace na butadien, dienová reakce s etylenem na cyklohexan, termická aromatizace na benzen a výševroucí aromáty

Tabulka 1: Procesy pyrolytického zpracování [1]

Při sušení v oblasti cca do 200°C dochází k tvorbě páry a fyzikálnímu odštěpení vody, což spotřebuje poměrně velké množství tepla (cca 2250 kJ na 1kg vody), které musíme dodávat. Proto je u materiálů s velkým obsahem vody vhodné provést před vsazením do reaktoru určité předúpravy (např. třídění, drcení, sušení aj.).

V druhém intervalu do zhruba 500°C dochází k odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek za vzniku plyných a kapalných uhlovodíků a pevného podílu uhlíku.

K dalšímu štěpení pak dochází při teplotách mezi 500 – 1200°C. Dochází zejména ke vzniku stabilních plynů jako vodík, oxid uhelnatý a uhlíčitý a metan.

Pyrolýza je celkově endotermní proces, ale je zde možnost poskytovat potřebnou energii pro ohřev spalováním samotných pyrolýzních produktů, např. koksu. [1]

2.2 Procesní parametry

Jedním ze základních rozdělení pyrolýzy je rozdělení v závislosti na rychlosti, kterou probíhá. Pyrolýza se dá rozdělit na pyrolýzu rychlou a pomalou.

U pomalé pyrolýzy dosahujeme rychlosti ohřevu zhruba 5-7 °C za minutu. Surovina se zahřívá většinou na teplotu okolo 500°C a v reaktoru zůstává okolo půl hodiny. Je možné použít větší kusy materiálu, případně heterogenní vsázku díky delší době ohřevu. Výtěžek z pomalé pyrolýzy má přibližně stejné zastoupení všech tří fází, případně dominantní zastoupení pyrolýzního koksu, a využívá se tedy v případech, kdy je potřeba získat více pyrolýzního uhlí, např. v odlehlejších oblastech. Využívá se většinou válcových rotačních pecí, případně reaktorů s pevným ložem, viz níže. [2]

Při rychlé pyrolýze naopak dochází k mžikovému ohřevu vsázky, který se pohybuje v intervalu mezi 500 až 1000°C za minutu. Z důvodu rychlého ohřevu je nutné zpracovat materiál na malé kousky, řádově několik milimetrů. Výtěžek pyrolýzního oleje se pohybuje okolo 60-75 %hm., biouhel zhruba 20 % hm a plyn 10-20 % hm. Teplota se pohybuje okolo 500°C. Dále je zapotřebí, aby páry, vzniklé v reaktoru při rychlé pyrolýze, byly co nejrychleji (okolo 2 sekund) zchlazeny a zkondenzovaly, aby zbytečně nedocházelo k sekundárním reakcím. K rychlé pyrolýze se využívají např. fluidní reaktory s cirkulující i stacionární vrstvou, rotační kuželové reaktory, které jsou popsány níže. [2]

Pyrolýzní proces začíná při rozdílných teplotách v závislosti na složení látek a průběh chemických reakcí může být záměrně ovlivněn. Existuje několik faktorů, které významně ovlivňují složení a množství produktů:

- chemické složení, obsah vody a velikost částic vstupního materiálu
- provozní podmínky (teplota odplynění, doba ohřevu, doba zdržení, tlak)
- plynná atmosféra, katalytické účinky přítomných látek
- typ reaktoru, ve kterém probíhá reakce [2]

První faktor je zároveň také jedním z nejdůležitějších, protože průběh značně závisí na druhu materiálu, který chceme pyrolýzou zpracovávat. Pyrolýzou lze zpracovat v podstatě jakýkoliv druh organického materiálu. Nejvýraznějším materiálem ke zpracování, zejména díky své obnovitelnosti, je biomasa, na kterou se zaměřuje relativně velké množství průmyslových a polopřevodných aplikací. Hlavní zájem je potom o zpracování odpadní biomasy, jako jsou např. slupky z rýže nebo kokosových ořechů, piliny, odpad z cukrové třtiny aj.. Pyrolýzou však lze zpracovávat spoustu dalších materiálů, jako např. pneumatiky, plasty, komunální odpad, městské kaly nebo různé druhy nebezpečných odpadů. Při tom platí, že je vždy výhodnější materiál homogenní, než heterogenní, u kterého známe fyzikální a chemické vlastnosti a lze tak lépe předpovídat jeho chování v průběhu pyrolytického procesu.

Co se týká tlaku a teploty, platí následující. Při stoupajícím tlaku probíhá štěpení uhlovodíkových molekul symetričtěji a se stoupající teplotou se místo štěpení posouvá na konce molekul, čímž dochází k tvorbě plyných uhlovodíků až v konečné fázi vodíku. Kontrolou teploty lze tedy ovlivnit množství jednotlivých fází produktů. [1]

Kvůli redukční atmosféře při pyrolýze se přeměňují sloučeniny problematických prvků jako chlor, síra, kyslíkaté a dusíkaté sloučeniny na odpovídající sloučeniny s vodíkem a dochází zároveň k redukci tvorby furanů a dioxinů. [1]

2.3 Produkty pyrolýzy

Jak již bylo uvedeno výše, produkty vznikající během pyrolýzy jsou pyrolýzní olej (bioolej, pyrolýzní benzín aj.), pyrolýzní plyn a pyrolýzní uhlí (pyrolýzní koks, biouhel...) Poměr těchto složek a jejich fyzikální vlastnosti závisí na výše popsaných parametrech.

Kapalný podíl se skládá mimo biooleje z několika frakcí: těžký a lehký dehet, střední olej, karbonizační benzín nebo pyrolýzní voda.

Těžký dehet obsahuje velké množství popelovin a uhelného prachu. Jeho část může být využita jako palivo pro ohřev reaktoru.

Pyrolýzní olej (bioolej) je směsí několika stovek látek. Mezi významné složky patří fenolové sloučeniny, organické kyseliny, furfural a jeho deriváty a jiné. Hlavní využití biooleje je jeho spalování a přeměna v tepelnou nebo elektrickou energii např. v kogeneračních

jednotkách. Není ale příliš vhodný pro spalování v klasických diesellových motorech kvůli své kyselosti, vysoké viskozitě a nestabilitě. Po vhodných chemických úpravách (hydrogenační a rafinační úpravou) je ale možné ho do klasických paliv přidávat nebo i používat samostatně a snaha o jeho využití jako paliva pro dopravní prostředky je jedním z hlavních cílů pyrolytických technologií. Může být i zplyňován, případně pomocí Fisher-Tropschovy syntézy přeměňován na metanol nebo fermentací na etanol. [2]

V lehkém dehtu a středním oleji se vyskytuje zhruba 70 % uhlovodíků a cca 28 % fenolů a v karbonizačním benzínu je až 90 % uhlovodíků. [2]

Následuje popis produktů pyrolýzy při zpracování biomasy, komunálního odpadu a pneumatik.

2.3.1 Pyrolýza biomasy

Hlavním produktem pyrolýzy biomasy je ve většině případů bioolej. Jedná se o tmavě hnědou kapalinu s ostrým a charakteristickým zápachem a průměrnou molární hmotností v poměrně širokém intervalu od 370 do 1000 g·mol⁻¹. Velké množství organických sloučenin obsažených v pyrolytickém oleji se vyskytuje v malých koncentracích. Kompletní chemická analýza není možná kvůli přítomnosti pyrolytického ligninu, což jsou různě dlouhé deriváty způsobené tepelnou degradací. Složení pyrolýzního oleje se výrazně odlišuje od paliv na ropné bázi, protože biomasa na rozdíl od fosilních paliv, obsahuje velké množství kyslíku. Pro bioolej vzniklý pyrolýzou lignocelulósových materiálů je typický vyšší obsah vody, vyšší obsah rozpuštěných pevných částic a větší hustota než u konvenčních paliv. [2]

V tabulce (2) jsou zobrazeny základní fyzikální vlastnosti biooleje při zpracování biomasy.

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Voda	20 - 30	%hm
Pevné částice	> 0,5	%hm
Popeloviny	0.01 - 0.1	%hm
Dusík	> 0.4	%hm
Síra	> 0.05	%hm
Viskozita (40°C)	15 - 35	mm ² · s ⁻¹
Hustota (15°C)	1.10 - 1.30	kg · dm ⁻³
Bod vznícení	40 - 110	°C
Výhřevnost	13 - 18	MJ · kg ⁻¹
pH	2 - 3	-

Tabulka 2: základní fyzikální vlastnosti biooleje [2]

Pevný zbytek je u pyrolýzy biomasy spíše vedlejším produktem a jedná se o směs nezreagovaných částic rozkládaného dřeva, uhlíkatých úsad, zuhelnatělých částic a také popela.

V následující tabulce jsou příklady vlastností pevného zbytku, který vznikl pomalou pyrolýzou při 500°C, pro tři různé druhy biomasy. Konečný produkt byl velmi biologicky i tepelně stabilní s vysokým obsahem uhlíku. Hodnoty jsou uvedeny v procentech.

Druh analýzy	Vlastnost	Jednotka	Sláma	Kmenové dřevo	Kůra
Fyzikální analýza	Vlhkost	%hm	2,07	1,46	0,36
	Prchavé hořlaviny	%hm	6,46	12,79	18,14
	Vázaný uhlík	%hm	39,1	83,47	68,66
	Popeloviny	%hm	52,37	2,28	12,84
Prvková analýza	C	%hm	86,28	89,31	84,84
	H	%hm	3,12	2,57	3,13
	O	%hm	7,35	7,34	10,2
	N	%hm	3,25	0,78	1,83
	Výhřevnost	MJ·kg ⁻¹	13,45	16,46	15,4

Tabulka 3: Chemicko fyzikální vlastnosti pyrolýzního pevného zbytku tří druhů biomasy [2]

Pyrolýzní plyn je pak směsí zejména vodíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a metanu. Platí přitom přímá úměra mezi teplotou a množstvím lehčích plynů. Při pyrolýze dřeva při teplotě 650°C se obsah vodíku pohybuje okolo 20%hm, ale pokud se teplota pyrolýzy sníží na 500°C, klesne podíl vodíku zhruba na 6,5%hm. Tabulka (3) ukazuje chemicko-fyzikální analýzu pyrolýzního plynu, vzniklého pyrolýzou při 650°C. [2]

Analýza		Jednotka	Dřevo
Fyzikální	Relativní hustota	1	0,76
	Měrná tepelná kap.	kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹	1,02
	Výhřevnost	MJ·m ⁻³	16,97
	Hustota	kg·m ⁻³	0,99
Prvková analýza	H ₂	%	19,9
	CO		30,5
	CO ₂		16,2
	CH ₄		15,1
	C ₂ H ₄		3,9
	C ₂ H ₆		1,4

Tabulka 4: Chemicko-fyzikální analýza pyrolýzního plynu [2]

2.3.2 Pyrolýza komunálního odpadu

Hlavním problémem komunálního odpadu je jeho různorodost, neboť může obsahovat všechny lidmi vyráběné produkty. Tento faktor je sice velmi nepříjemným, ale vzhledem

k množství produkovaného komunálního odpadu (např. v roce 2012 se ČR vyprodukovalo 3,2 milionu tun [2]), se jeho pyrolýzou zabývá množství firem a laboratoří. Složení komunálního odpadu záleží především na tom odkud a v jakém období je svážen. Tuhý komunální odpad je složen z:

- biologicky rozložitelného komunálního odpadu (40 – 65 % hm)
- plastů (12 – 20 % hm)
- inertních odpadů (1 – 5 % hm)
- kovů (1 – 5 % hm)
- skla (3 – 7 % hm)
- nebezpečného odpadu (0,2 – 1 % hm) [2]

Mezi biologicky rozložitelný odpad lze zařadit: dřevo, kompostovatelný odpad, textil, papír aj. Inertní materiály jsou: keramika, porcelán. Baterie a nádoby se zbytky ropných produktů jsou pak příkladem nebezpečných odpadů.

V tabulce (5) jsou uvedeny chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolýzního oleje z tuhého komunálního odpadu. Díky vysokému obsahu uhlíku a vodíku a oproti tomu nízkému obsahu kyslíku se jedná o vhodný produkt pro úpravu pyrolýzního oleje na palivo. [2]

Druh analýzy	Vlastnost	Jednotka	Pomalá pyrolýza (550°C)	Rychlá pyrolýza (480°C)	Rychlá pyrolýza (510°C)
Fyzikální analýza	Vlhkost	% hm	8,5	6,4	7,7
	Výhřevnost	MJ·kg ⁻¹	44,0	38,4	37,4
Prvková analýza	C	% hm	70,1	73,4	72,7
	H	% hm	10,8	11,7	11,4
	N	% hm	1,1	0,4	0,3
	S	% hm	méně než 0,1		
	O	% hm	18	14,5	15,6

Tabulka 5: Chemicko-fyzikální analýza pyrolýzního oleje komunálního odpadu pro různé doby a teploty zpracování [2]

V další tabulce je rozbor pevného zbytku. V tomto případě se jednalo o experiment ve válcové peci při teplotě 500°C po dobu 1 hodiny.

Analýza	Vlastnost a prvek	Jednotka	Hodnota
Fyzikální analýza	Výhřevnost	MJ·kg ⁻¹	15,8
	Prchavé hořlaviny	% hm	24,0
	Vázaný uhlík		37,0
	Popeloviny		39,0
Prvková analýza	C		43,0
	H		1,9
	N		1,5
	S		0,2
	Cl		1,9

Tabulka 6: Chemicko-fyzikální analýza pevného zbytku [2]

Příklad chemicko-fyzikálních vlastností pyrolýzního plynu je v tabulce (6). Šlo o experiment ve vsázkovém reaktoru při atmosferickém tlaku a při inertizaci dusíkem. [2]

Druh analýzy	Vlastnost	Jednotka	500°C	550°C	600°C
Fyzikální analýza	Výhřevnost	MJ·kg ⁻¹	18,41	19,37	22,18
Prvková analýza	H ₂	% hm	0,97	1,21	1,42
	CO	% hm	20,43	17,64	15,14
	CO ₂	% hm	41,52	42,71	39,63
	CH ₄	% hm	5,41	5,76	7,03
	C ₂ H ₄	% hm	4,87	5,01	6,05
	Ostatní vyšší uhlovodíky	% hm	26,8	27,67	30,73

Tabulka 7: chemicko-fyzikální analýza pyrolýzního plynu [2]

2.3.3 Pyrolýza pneumatik

Pneumatiky jsou velmi zajímavým druhem odpadu, protože se jich jen v Evropě spotřebují řádově miliony tun ročně a zároveň se na rozdíl od třeba komunálního odpadu jedná o stále stejný druh materiálu s dobře známým složením a vlastnostmi. V dnešní době se buď skladují, nebo se spalují v cementárnách, neboť mají podobnou výhřevnost jako černé uhlí (25-32 MJ·kg⁻¹). Pyrolýza je ale také jednou z možností, jak se starými pneumatikami naložit. V závislosti na parametrech procesu dosahujeme výsledného výtěžku: 40-60% biooleje, 35-45% pyrolýzního koksu a 10-25% pyrolýzního plynu. [2]

V tabulce (8) jsou uvedeny některé chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolytického oleje. V experimentu byl použit dusík jako inertizující atmosféra v reaktoru s fixním ložem při rychlosti ohřevu 15°C/min.

Teplota [°C]	Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	C [% hm]	S [% hm]
300	43,2	86,5	1,0
500	42,1	85,6	1,4
700	42,3	86	1,2

Tabulka 8: Chemico-fyzikální vlastnosti biooleje [2]

Vlastnosti pevného zbytku jsou pak v tabulce (9). Pokus proběhl při 500°C v reaktoru s fixním ložem.

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Vlhkost	% hm	0,4
Prchavé hořlaviny		2,8
Popeloviny		11,6
C		90,6
H		0,9
N		0,7
S		2,3
Cl		0,08
Výhřevnost	MJ·kg ⁻¹	30,5

Tabulka 9: Chemicko-fyzikální vlastnosti pevného zbytku [2]

Dále jsou uvedeny výtěžky jednotlivých produktů a výhřevnost pyrolýzního plynu pro pokus v laboratorním vsázkovém reaktoru při různých teplotách. [2]

Parametr		Jednotka	400 [°C]	500 [°C]	600 [°C]	700 [°C]
Složení	Pevná část	% hm	53,4	44,1	44,5	43,4
	Kapalná	% hm	28,3	41,1	39,4	40,5
	Plynná	% hm	6,8	8,0	8,1	8,8
Výhřevnost		MJ·kg ⁻¹	81,6	76,7	73,8	69,5

Tabulka 10: Výtěžky jednotlivých produktů pyrolýzy pneumatik a výhřevnost pyrolýzního plynu [2]

3. Technologie pyrolytického zpracování

Většina existujících provozních a poloprovozních pyrolýzních technologií (zejména na zpracování komunálního odpadu) může být charakterizována následujícími vlastnostmi:

- **Kombinované technologie**

Komerční technologie pyrolýzních procesů většinou nebývají zaměřeny jen na koncové produkty, ale jsou kombinovány se zplyňováním, spalováním, případně tavením.[3]

- **Předúprava materiálu**

Pyrolýzní jednotky téměř vždy potřebují vstupní materiál nějakým způsobem upravit kvůli zvýšení efektivity zpracování v reaktoru. Předúprava je samozřejmě závislá na typu vstupního materiálu a na typu reaktoru. Při zpracování biomasy se materiál musí nejdříve vysušit a poté rozdrtit na kusy určité maximální velikosti. Při zpracování komunálního odpadu je třeba provést před vsazením separaci nevhodných materiálů a následně také úpravu na určitou velikost. Nicméně předúprava materiálu je jedním z faktorů ovlivňujících efektivnost celého procesu.[3]

- **Druhotné využití produktů**

Komerční technologie jsou charakterizovány okamžitým využitím produktů pyrolýzy. To může znamenat např. ve spalovacích komorách, kdy dochází ke spalování tuhého uhlíkatého zbytku nebo dále nevyužitelných plynů (u pyrolýz zaměřených na kapalný produkt) ve spalovacích komorách. Vzniká tak potřebné teplo k ohřátí pyrolýzního reaktoru. Spaliny z těchto komor se pak dají využít do vysokotlakých turbín na výrobu elektřiny, která se může odvádět do přilehlých zařízení, nebo můžou být využity k výrobě tepla. [3]

- **Vybavenost zařízení pro snižování emisí**

Všechny komerčně využívané pyrolýzní technologie jsou vybavené zařízeními pro snižování emisí, podobně jako továrny, aby bylo zajištěno, že se jedná o čisté procesy. Typicky tato zařízení obsahují částicový filtr, chladicí věž atd. jenom ve srovnání s továrnami nebo spalovnami s menšími rozměry. [3]

- **Technologické uspořádání**

Existuje velké množství různých technologických uspořádání v závislosti zejména na zpracovávaném odpadu, použitém typu reaktoru a převažující požadované složce produktu, nicméně obecně může být pyrolytická jednotka charakterizována několika hlavními společnými prvky. V drtivé většině případů je nutné upravit velikost materiálu na určitou velikost, zejména kvůli lepšímu přestupu tepla a rychlejšímu zpracování. Prvním zařízením je tedy drtička,

případně sušička. Dalším prvkem je doprava materiálu do reaktoru, který je hlavní složkou celého procesu. Dopravu může zajišťovat např. pásový dopravník, šnekový dopravník aj.. V reaktoru dochází k samotné reakci a k přeměně vsázky na pevné a plynné složky. Jedná se o nejdůležitější část celého procesu s významným vlivem na celkový průběh. Z reaktoru následně odcházejí horké plynné produkty s příměsí pevných uhlíkatých zbytků. Dalším zařízením jsou pak cyklonové odlučovače sloužící k oddělení pevných a plyných látek. Dalším krokem je přivedení horkého plynu do kondenzátoru, kde dojde ke zchlazení a zkapalnění za vzniku pyrolytického oleje. Nezkondenzovatelné plyny se buď také použijí jako produkty nebo např. jako palivo pro ohřev reaktoru. Poté dochází k úpravám a dalšímu čištění na požadovanou kvalitu cílových produktů. Pokud se jedná o pomalou pyrolýzu, dochází pak ještě ke zpracování tuhého zbytku.

Schémata jednotlivých existujících procesů jsou ukázána v kapitole o pyrolyzních zařízeních ve světě.

3.1 Pyrolýzní reaktory

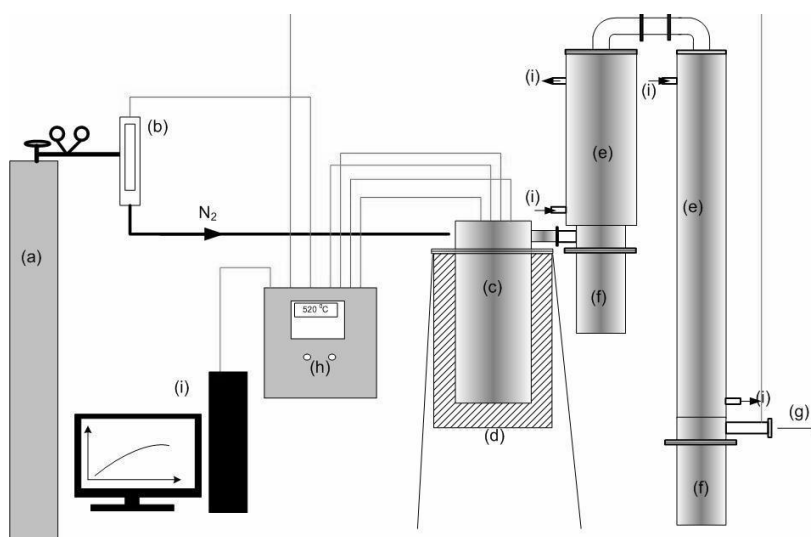
Hlavní část celého procesu probíhá v reaktoru. Do reaktoru se přivádí teplo a dochází zde k samotnému termickému rozkladu vkládaného materiálu. Těchto reaktorů je pro zpracování odpadů a biomasy několik hlavních druhů:

- reaktor s pevným ložem
- reaktor s rotační pecí
- fluidní reaktor se stacionární vrstvou
- fluidní reaktor s cirkulující vrstvou
- rotační kuželový reaktor
- šnekový reaktor
- ablační (pánvový) reaktor

V souvislosti s reakčními podmínkami, většina těchto procesů probíhá za atmosférického tlaku. Druhou možností je průběh pyrolýzního procesu ve vakuu. Vakuová pyrolýza se ale používá v daleko menší míře, protože se jedná o celkově náročnější proces, ačkoli má vakuová pyrolýza řadu výhod před ostatními způsoby, jako např. zkrácení času pobytu nestálých produktů ve vysokoteplotní zóně, čímž se snižuje sekundární rozklad a zvyšuje se tepelná hodnota plyných produktů.[3]

3.1.1 Reaktor s pevným ložem

Konstrukčně nejjednodušším typem reaktoru je reaktor s pevným ložem. Pro tento reaktor je charakteristická nižší rychlost ohřevu, než u ostatních typů, a proto pokud je vzorek



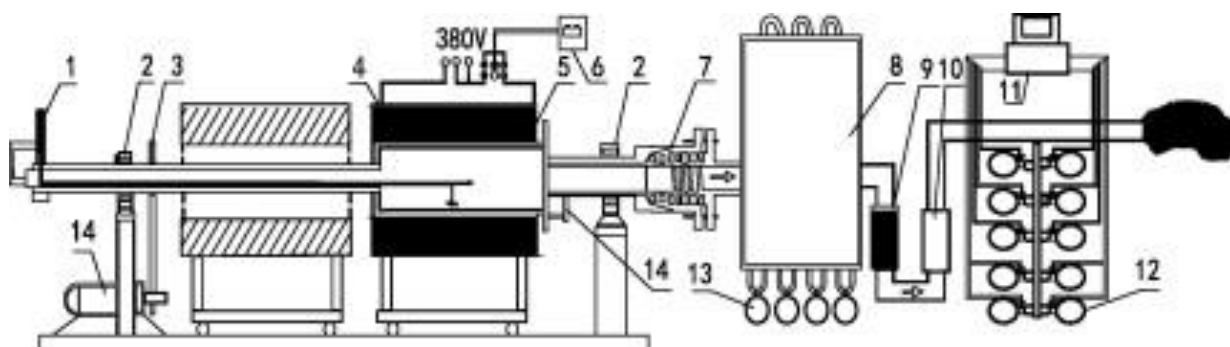
Obrázek 1: Schéma uspořádání s pevným ložem [4]

a) dusík; b) plynoměr; c) reaktor; d) tepelná izolace; e) kondenzátor; f) separátor; g) výpust nekondenzovatelných plynů; h) rozvodná skříň pro regulační systém

vkládaneho materiálu větší, nedochází k rovnoměrnému ohřevu a vkládaná surovina se rozkládá za různých teplot současně. Reaktor s pevným ložem se kvůli své neefektivnosti ve větším měřítku používá zřídka. Na obrázku (1) je vidět příklad pilotního laboratorní zařízení. [3] [4]

3.1.2. Reaktory s rotační pecí

Tento druh reaktorů je více efektivní než druh předchozí, zejména pak v ohřátí vkládané suroviny. Díky rotaci také dochází k dobrému promíchání odpadu. Reaktory s rotační pecí se využívají široce pro pomalou pyrolýzu, protože rychlost ohřevu je relativně pomalá. Dosahuje hodnot okolo $100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ a čas zdržení v peci je okolo jedné hodiny. To je způsobeno tím, že během pyrolýzy dochází k přenosu tepla mezi okolím a ohřívaným materiálem jen díky vedení tepla stěnou pece a materiálem. Nicméně tento druh je velmi často používán pro pyrolýzu komunálního odpadu, neboť má mnoho výhod oproti ostatním druhům. Díky nastavitelnému času zdržení v peci a velkému vstupu pro odpadní materiál je možné jako surovinu používat i heterogenní materiály, čímž odpadá z procesu mnohdy nákladná předúprava surovin a údržba je také jednoduchá. Rotační pece jsou vyhřívány externě např. spalováním pyrolýzních plynů nebo elektricky. Na obrázku (2) je příklad technologie s rotační pecí, vyhřívanou elektricky. [3]



Obrázek 2: Schéma uspořádání s rotační pecí [3]

1) teploměr; 2) ložiska; 3) převod; 4) elektrická pec; 5) rotační b; 6) kontrola teploty; 7) těsnění; 8) dvoukrokový kondenzátor; 9) filtr; 10) kumulativní průtokoměr; 11) počítač; 12) odběrná zařízení; 13) výpust; 14) elektromotor [3]

3.1.3. Reaktory s fluidním ložem

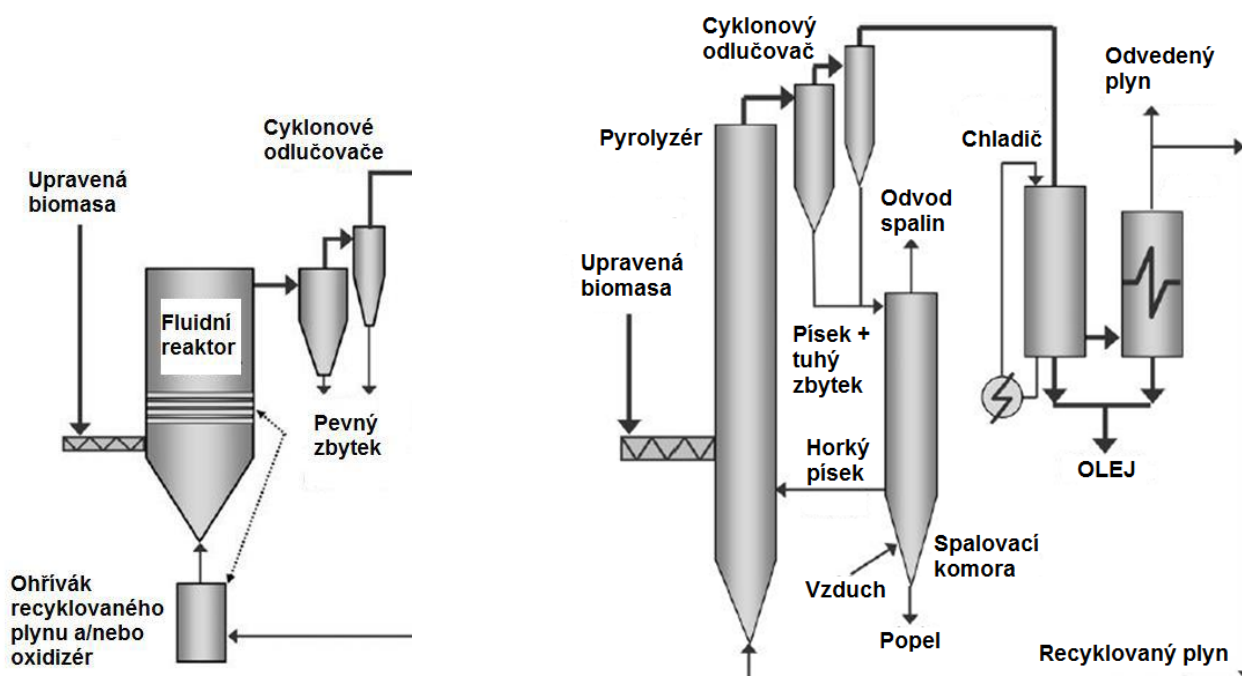
Pro tento druh reaktorů je typická vysoká rychlost ohřevu a velmi dobré míchání. Pracují na principu nadnášení vsazeného materiálu proudem horkého plynu. V průběhu ohřevu suroviny dochází zároveň k vysušování materiálu a tím i ke změně hustoty. Vysušený materiál pak opouští reaktor. Tento typ reaktoru je využíván při rychlé pyrolýze zejména biomasy a také k pyrolýze plastových odpadů. [3]

Fluidní reaktor se stacionární (bublinkující) fluidní vrstvou

V současné době po technické stránce velmi dobře zvládnutá technologie s jednoduchou konstrukcí. Teplota je velmi dobře regulovatelná a v průběhu procesu dochází k velmi výraznému přenosu tepla do částic. Tento systém se využívá zejména pro rychlou pyrolýzu biomasy a dosahuje stabilní výkonnosti s vysokým výtěžkem kapalného podílu (70-75 %hm). Je ale potřeba upravit vstupní materiál na velikost okolo 2-3 mm, protože při těchto velikostech dochází k neefektivnějšímu přenosu tepla. Na obrázku (3) je vidět proudové schéma zařízení na zpracování předupravené biomasy. [2]

Fluidní reaktor s cirkulující vrstvou

Velmi podobný reaktor předešlému typu. Rozdíl je v tom, že materiál, ze kterého se lože skládá, cirkuluje s využitím odlučovačů v průběhu procesu. Dochází k recyklaci a navrácení do reaktoru. Tento druh reaktoru má kratší dobu zdržení pro pevné i plynné části, což vede k vyšší rychlosti plynu i tuhých částí a vyššímu obsahu uhlíkatých pevných zbytků v kapalném produktu. Vyznačuje se vyšší procesní kapacitou a hodí se tedy pro vyšší průtoky. Má také lepší kontakt pevná látka-plyn a lepší schopnost zvládat pevné látky obtížné k fluidizování lépe než fluidní reaktor se stacionární vrstvou. [2]



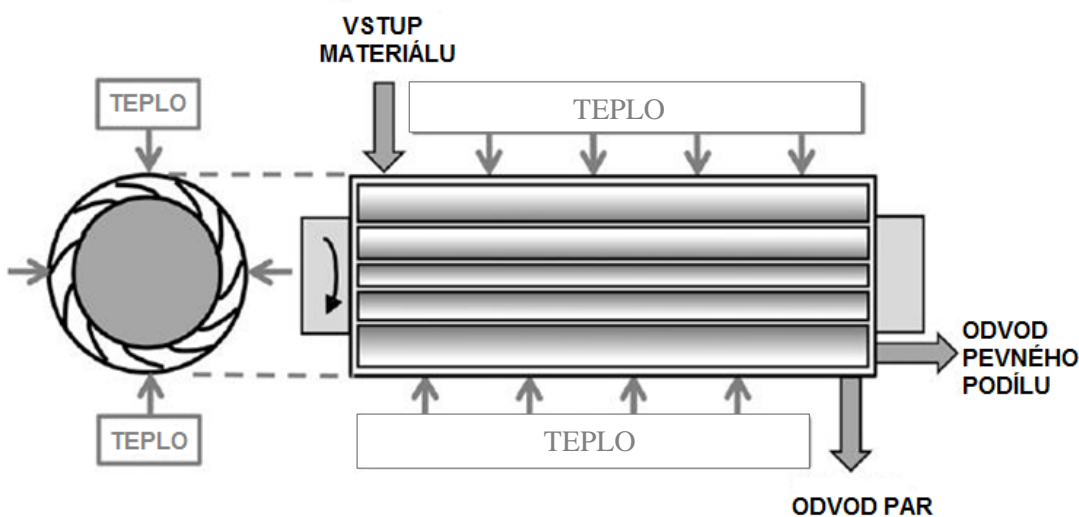
Obrázek 1: **vlevo:** fluidní reaktor se stacionární vrstvou; **vpravo:** fluidní reaktor s cirkulující vrstvou [2]

3.1.4. Abláční reaktor

Tato technologie je odlišná od ostatních, které se využívají k procesu rychlé pyrolýzy, u kterých je rychlost reakce omezena rychlostí přenosu tepla mezi částicemi, které z toho důvodu potřebují úpravu vsazeného materiálu na malé kousky. Abláční pyrolýza funguje na principu přenosu tepla vedením stěnou reaktoru, aby došlo k tavení materiálu, který je tlačěn na stěnu. Vsazený materiál se posunuje směrem ven a dochází k postupnému odpařování roztavené vrstvy, čímž dostáváme pyrolytický plyn, a zároveň slouží jako lubrikace dalším částem vsazeného materiálu. Rychlost reakce je výrazně ovlivněna velikostí tlaku vyvíjeného na vsazený materiál. Obecně jsou hlavními vlastnostmi této technologie:

- vysoký tlak dosažený pomocí odstředivých sil nebo mechanickým způsobem
- vysoká rychlost částic vůči stěnám reaktoru
- teplota stěny reaktoru nepřesahující 600°C

Reakce není limitována schopností přenosu tepla mezi jednotlivými částicemi, ale spíše velikostí tepla dodávaného do reaktoru. Díky tomu může docházet k pyrolýze větších částic. Také není zapotřebí použití inertní atmosféry, což umožňuje menší procesní zařízení a větší intenzitu reakce. Proces je ale z hlediska řízení složitý. Obrázek (4) ukazuje schéma a princip ablačního reaktoru. [2]

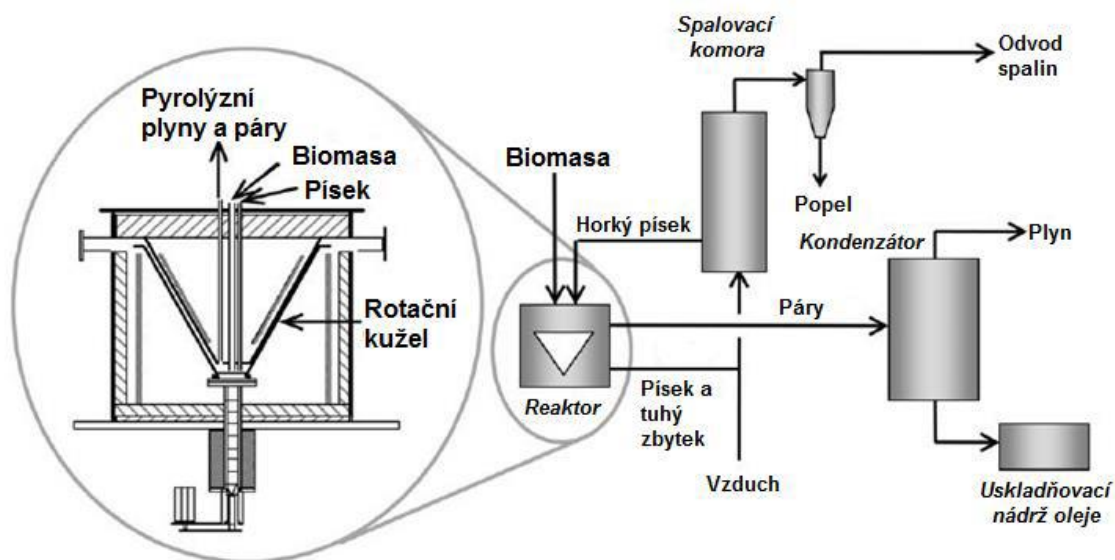


Obrázek 2: Schéma ablačního reaktoru [2]

3.1.5. Rotační kuželový reaktor

V tomto reaktoru, podobně jako ve fluidním reaktoru s cirkulující vrstvou, dochází k oběhu teplotného materiálu. V tomto případě se jedná většinou o horký písek. Dochází

k tomu však odstředivými silami díky rychlému otáčení reaktoru. Vkládaný materiál k pyrolýze a písek zahřátý na určitou teplotu se smíchají u dna kuželu a odstředivými silami jsou pak unášeny nahoru. Díky tomu není nutné používat inertní recyklovaný plyn jako u fluidních reaktorů. [2],[5] Schéma rotačního kuželového reaktoru je vidět na obrázku (5).



Obrázek 5: Schéma rotačního kuželového reaktoru se zařazením do procesu [2]

3.1.6. Šnekový reaktor

Tato technologie zajišťuje kontinuální provoz a skládá se z jednoho nebo více šnekových šroubů. Může být využit jak v horizontální, tak ve svislé poloze. Je nejčastěji ohříván nepřímo pomocí otopné kapaliny. Ta je vedena uvnitř šroubu nebo v obalu reaktoru. Tím ale vznikají horké zóny, na kterých může docházet ke spáleninám. Délka zdržení materiálu v reaktoru je závislá na délce šneku a rychlosti otáčení, a díky tomu je i jednoduše regulovatelná. Velikost šnekového reaktoru ale nemůže být libovolná, protože se zvyšující se velikostí reaktoru se výrazně snižuje poměr plochy povrchu šroubu k objemu vsázky. Technologie šnekového reaktoru se využívá například při vakuové pyrolýze pneumatik. [2]

3.2. Porovnání jednotlivých druhů reaktorů

V následující tabulce 11 je vidět srovnání jednotlivých výše zmiňovaných reaktorů z hlediska způsobu ohřevu a jejich výhod a nevýhod. Jejich využitím v průmyslovém či polopřemyslovém měřítku se věnuje další kapitola s příklady technologií pyrolýzy z celého světa.

Typ reaktoru	Způsob ohřevu	Výhody	Nevýhody
Fluidní reaktor	horkým inertním (recyklovaným) plynem	dobrá regulace teploty vysoká rychlost přenosu tepla jednoduchá technologie	nutná malá velikost vstupních částic (pod 2 mm)
Cirkulační fluidní reaktor	horkým pískem	dobrá regulace teploty vysoká rychlost přenosu tepla možné použití větších vstupních částic (do 6 mm) velkokapacitní reaktor	komplikovaná hydrodynamika odbrušování popelovin z biomasy, vysoký obsah popelovin v oleji
Rotující kuželový	horkým pískem	odstředivá síla pohybuje s obsahem reaktoru (horký písek a biomasa)	nutná malá velikost vstupních částic
Šnekový reaktor	ohřátou stěnou	kompaktní reaktor, není zapotřebí přivádět plyn nižší teplota procesu (400 °C)	pohyblivé části v horké zóně, možnost problémů s přenosem tepla ve velkém měřítku, nízký výtěžek
Ablační (pánvový) reaktor	ohřátou stěnou	možné použít větší částice suroviny není zapotřebí inertní plyn	rychlost reakce je omezena přenosem tepla do reaktoru, nikoli do biomasy drahý reaktor → proces musí být v reakční zóně povrchově řízen
S pevným ložem	ohřátou stěnou	jednoduchost zařízení	špatný přestup tepla, nízká rychlost ohřevu
S rotační pecí	ohřátou stěnou	zpracování větších i nehomogenních materiálů dobré promíchání	větší doba zdržení pomalá pyrolýza

Tabulka 11: Porovnání některých typů reaktorů z hlediska způsobu ohřevu, výhod a nevýhod [2]

4. Pyrolýza ve světě

4.1. BTG

BTL (Biomass To Liquid) je technologie vyvíjená holandskou společností Biomass Technology Group (BTG) od devadesátých let minulého století. Jejím cílem je přeměna různých složek biomasy (např. dřevo, rýžové slupky, bagasa, kal, drůbeží trus aj.) na tzv. bioolej, který může být použit jako palivo. Jedná se o proces rychlé pyrolýzy, kdy rychlost reakce dosahuje několika jednotek sekund. Pyrolýza probíhá v rotujícím kuželovém reaktoru a k přenosu tepla slouží rozehřátý písek, se kterým je biomasa promíchávána.

Princip technologie:

- Vysušené části biomasy jsou vkládány do reaktoru spolu s pískem, který funguje jako oběhový nosič tepla
- Obě tyto složky jsou v reaktoru promíchány a přeměněny v pyrolýzní olejové výpary, plyny a tuhý zbytek
- Po reaktoru následuje separátor, kde dojde k rozdělení na písek a tuhý zbytek a plynné produkty
- Produkováné plyny a výpary projdou řadou cyklonů, než se dostanou do kondenzátoru, kde jsou zchlazeny cirkulujícím olejem
- Písek a tuhý zbytek jsou transportovány do fluidního spalovače, kde se přidává vzduch a je zde spalován tuhý uhlíkatý zbytek z procesu. Ve spalovači se také spalují nezkondenzovatelné plyny
- Ze spalovače se znovu ohřátý písek přesune zpět do reaktoru přes chladič, který zajistí stálou teplotu v reaktoru
- Přebytečné teplo z pískového chladiče a spaliny ze spalovače se uchovávají a slouží jako vysokotlaká pára, která může pohánět parní turbínu [5]

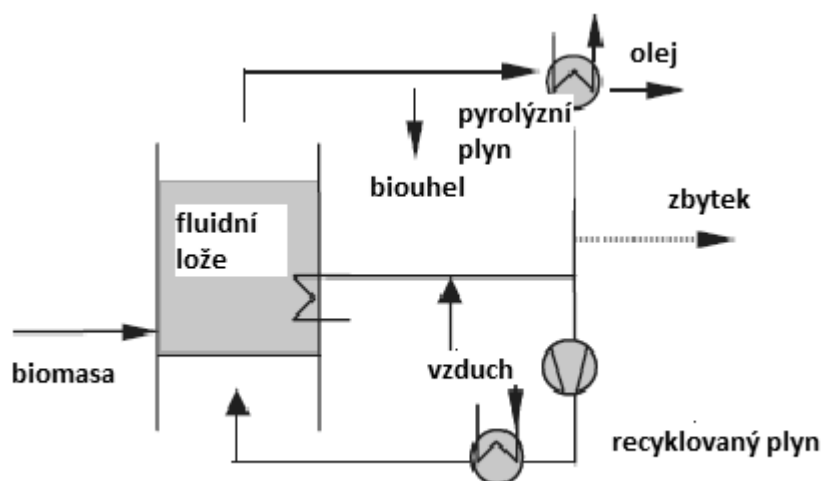
Firma BTG provozuje od roku 2005 jednu jednotku v Malajsii. Její kapacita je 2 tuny za hodinu a zpracovává vysušené slupky a vlákna z kokosových ořechů. Výtěžek biooleje je 50-60%. Další jednotka byla instalována v roce 2015 v Nizozemsku v Hengelu s kapacitou 5 tun za hodinu při využití dřevního odpadu. V následující tabulce je vidět příklad výtěžků z různých druhů biomasy. Výtěžek oleje se pohybuje kolem 60%. [5]

Vzorky	Odpad z cukrové třtiny	Piliny	Slupky
Výtěžek oleje [% hm]	55-65	65-70	50-60
Výhřevnost oleje [$GJ \cdot t^{-1}$]	16-19	15-18	16-18

Tabulka 12: Příklady výtěžků oleje z různých druhů biomasy [5]

4.2. Technologie BioTherm

Technologie vyvíjená partnerskými společnostmi Dynamotive Energy Systems a Resource Transforms International Ltd. Again. Jedná se o systém využívající bublinkující fluidní reaktor při rychlé pyrolýze biomasy. Organické odpady z lesního a zemědělského hospodářství jsou pyrolýzovány v čase okolo 2 sekund při teplotě cca 500°C. Proud produkovaného plynu se recykluje pro výrobu tepla a zároveň pro fluidní plyn. Fluidní lože tvoří jemný písek. Produkovaný bioolej je spalován v turbíně o výkonu 2,5 MW a je používán k výrobě elektrické energie. [6]



Obrázek 4: Schéma technologie Biotherm [6]

4.3. RTP (rapid thermal processing)

Tuto technologii provozuje společnost Envergent Technologies. Jedná se o velmi podobnou technologii jako v předchozím případě. Při procesu jsou zpracovávány různé biologické odpady z lesnického a zemědělského hospodářství. Pyrolýza probíhá ve fluidním loži s cirkulující vrstvou horkého písku v čase cca 2 vteřin. Hlavním produktem je bioolej, který může být využit k výrobě tepla, elektřiny nebo upraven k transportním palivům. Mateřská společnost Envergent Technologies UOP staví demonstrační zařízení na Havaji, které bude z místních organických odpadů vyrábět transportní paliva. [7]

Materiál	Výtěžek [hm.%]	Výhřevnost [GJ· t ⁻¹]
tvrdé dřevo	70-75	17,2-19,1
měkké dřevo	70-80	16,9-18,6
kůra tvrdého dřeva	60-65	16,7-20,1
kůra měkkého dřeva	55-65	16,7-19,8
kukuřičná vláknina	65-75	17,6-20,1
cukrová třtina	70-75	18,8-19,1

Tabulka 13: Výtěžek a výhřevnost různých druhů biomasy technologií RTP [7]

4.4 GB Pyrolysis

Technologie Nízkoteplotní katalické depolymerizace je jednou z oblastí, kterou se zabývá společnost GB Energy. Jedná se o technologii zpracovávající plastové odpady, pneumatiky, odpadní oleje a tříděný komunální odpad. Díky přítomnosti patentovaného katalyzátoru je reakční teplota oproti jiným technologiím relativně nízká, pohybuje se v rozmezí 275 - 445°C. Produkty jsou klasicky syntetický olej, plyn a uhlíkatý pevný zbytek, firmou nazývány Poly-fuel, Poly-gas, Poly-carbon. Po světě již bylo instalováno zhruba 45 zařízení, převážně v Indii. [8]

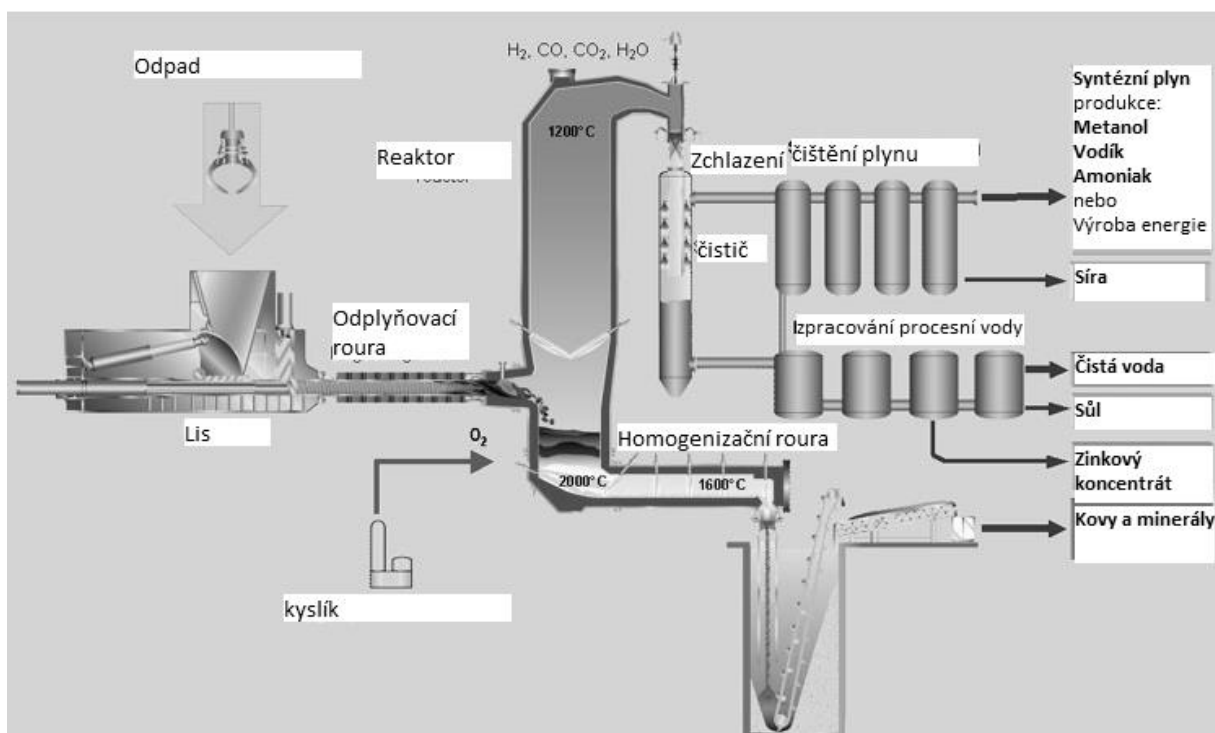
Vstupní materiál	Vstupní množství	Přibližné výstupní množství
Směs odpadů ze smíšeného plastu	1000 kg	700-900 l oleje 50-100 kg plynu 30-50 kg uhlíkatý zbytek
Odpad z nylonových pneumatik	1000 kg	450-600 l oleje 100-120 kg plynu 250-350 kg uhlíkatý zbytek
Odpad z radiálních pneumatik	1000 kg	400-550 oleje 100-120 kg plynu 200-300 kg uhlíkatý zbytek 80-100 kg úlomky ocelového drátu
Odpad motorových a průmyslových olejů	1000 kg	900-1000 l oleje

Tabulka 14: Výtěžek produktů pyrolýzou GB Pyrolysis [8]

4.5. Thermoselect

Tato technologie se zabývá likvidací a zpracováním tuhého komunálního odpadu již od roku 1990. Produkty procesu jsou zejména syntézní plyn, sklu podobné materiály, kovy bohaté na železo a síra. Princip procesu je trochu jiný, než u předchozích technologií, protože jde o kombinaci pyrolýzy a zplyňování. Během první fáze je materiál stlačen a nalisován do kostek, které jsou vpraveny do odplyňovací roury. V té za nepřítomnosti vzduchu a za zvyšujícího tlaku a teploty dochází k odplynění a karbonizaci organické složky materiálu. Anorganické materiály obsažené v odpadech prochází touto fází bez větších změn. Následně je pak tato směs vpravena do vysokoteplotního reaktoru. Zde je přidáváno kontrolované množství kyslíku a za teplot okolo 2000°C a v prostředí bohatém na vodní páry je tuhý uhlíkatý zbytek zplyňován. Kovové a minerální zbytky jsou roztaveny a dále využity k recyklaci. Syntetický plyn je následně prudce zchlazen na teplotu okolo 90°C a prochází několika stupňovou čistící fází, kde dochází k absorpci nebo kondenzaci kontaminantů. Anorganické materiály, roztavené v reaktoru, jsou homogenizovány v homogenizační trubce napojené na reaktor. Následně jsou zchlazeny vodou do podoby granulátu, který je nakonec magneticky roztríděn a připraven k recyklaci. [9]

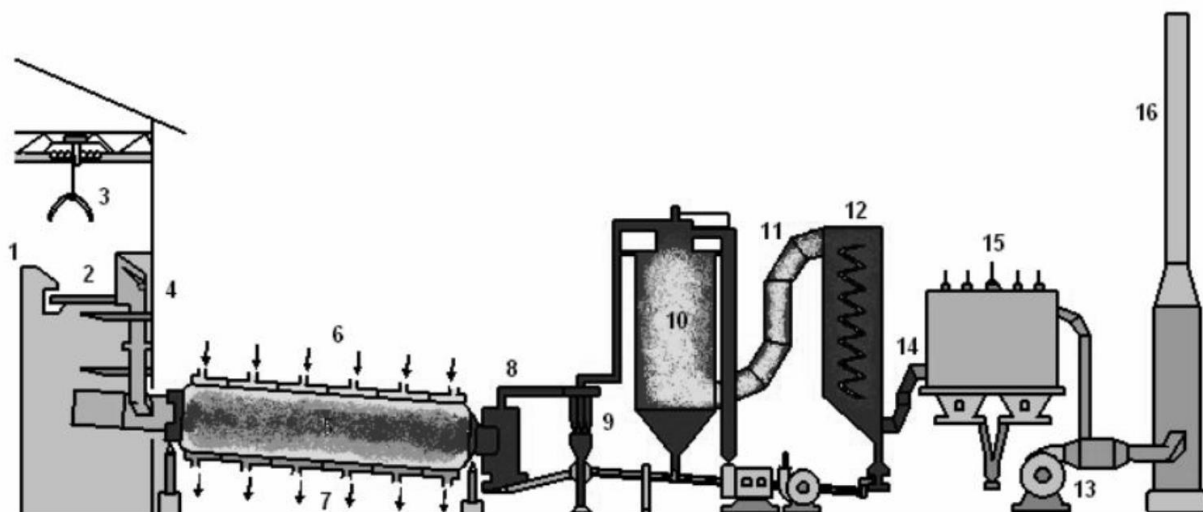
Bylo postaveno celkem 9 zařízení, přičemž nejvíce úspěšná jsou v Japonsku, kde je v provozu 7 jednotek. Zbylé 2 byly postaveny v Itálii a v Německu, ale nakonec se je nepodařilo z technických důvodů udržet v provozu. [9]



Obrázek 5: Princip technologie Thermoselect [9]

4.6. Babcock

Podobně zaměřená technologie jako předchozí je proces Babcock, který byl navržen za účelem zpracování tuhých komunálních odpadů, čistírenských kalů a podobných druhů odpadů. Jedná se o kombinaci pyrolýzy a řízeného spalování neupravovaného surového plynu. Reaktorem je nepřímo otápěný válec ohříváný na teploty 500 – 600°C. Pyrolýzní plyn je po vyčištění v cyklonových odlučovačích spálen ve spalovací komoře, kde hoří za teploty přibližně 1200°C. Spaliny se využijí za prvé pro vyhřátí reaktoru a za druhé se využijí v kotli na odpadní teplo. Za kotlem je tkaninový filtr na finální jemné odprášení. K čištění plynů dochází suchou cestou za pomoci vápna, které je přidáváno už do samotného vstupujícího odpadu a dále do proudu spalin před tkaninovým filtrem. [6]



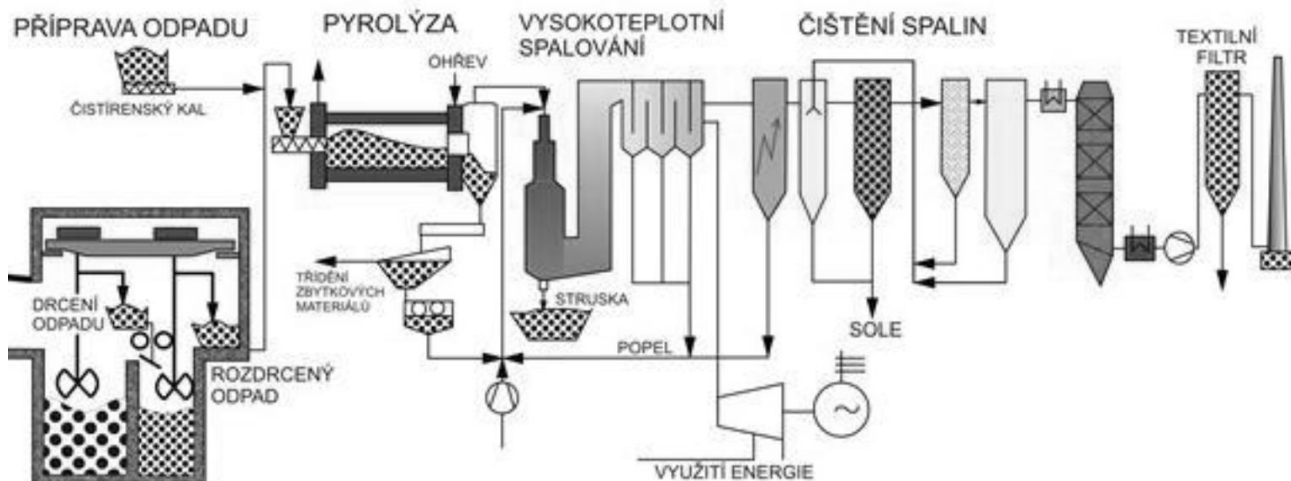
Obrázek 6: Schéma pyrolýzní jednotky Babcock

1 – svoz odpadu do bunkru, 2 – násypka, 3 – drapák suroviny, 4 – vstup vápna, 5 – rotační pyrolýzní pec, 6 – vstup otopových spalin, 7 – odtah otopových spalin, 8 – vynášecí komora, 9 – cyklon, 10 – spalovací komora, 11 – vstup spalin do kotle, 12 – kotel na odpadní teplo, 13 – spalinový ventilátor, 14 – sekundární vstup vápna, 15 – tkaninový filtr, 16 – komín [6]

4.7. Technologie S-B-V (Schwel-Brenn-Verfahren)

Tato technologie byla realizována již v roce 1988 díky patentu společnosti Siemens-KWU. Pilotní jednotka se nacházela v Ulm-Wiblingenu a o deset let později byla zprovozněna další, tentokrát již provozní jednotka, ve Fürthu. Toto provozní zařízení je schopno zpracovat 100 000 tun drceného odpadu a čistírenských kalů za rok. Tento odpad se kontinuálně přivádí do rotační pyrolýzní komory, kde je zahříván na teplotu 450°C. Jedná se tedy o proces pomalé pyrolýzy. Z tuhého zbytku se poté vytrídí hrubá frakce, tvořená převážně sklem, kamením a kovy. Vyčištěný pevný zbytek a pyrolýzní plyn jsou vedeny do spalovacího prostoru, kde za

teplot 1200-1300°C probíhá téměř dokonalé spalování. Při procesu vznikající struska je chlazená ve vodní granulární lázni a poté může být využita ve stavebnictví nebo deponována na skládkách. Spaliny se dále po odprašení odsiřují, denitrifikují a dále čistí. Podle firmy Siemens je možné takto z jedné tuny tuhého komunálního odpadu získat až 1470 kWh užitečného tepla. [2]



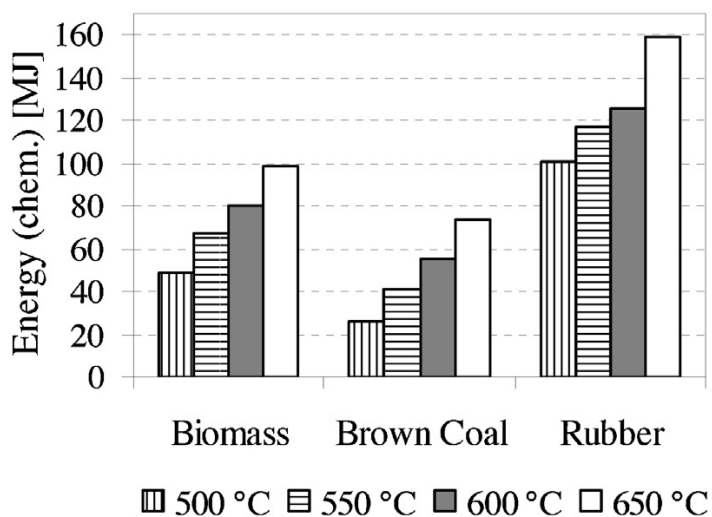
Obrázek 7: Schéma jednotky S-B-V [6]

4.8. Pyromatic

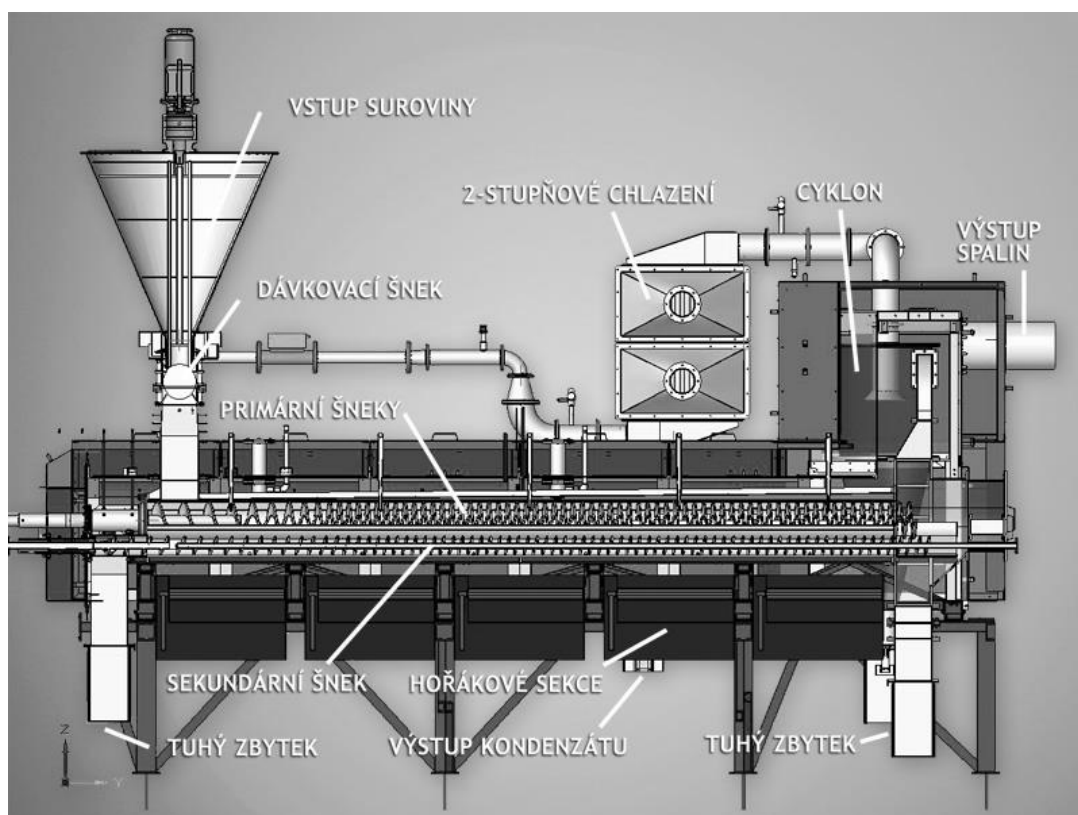
V České republice stojí jistě za zmínku technologie, na jejímž vývoji a výrobě spolupracuje VŠB - TU Ostrava spolu s firmou Klastř Envicrack, s názvem Pyromatic. Jedná se o jednotku využívající šnekový reaktor s kapacitou 50 - 200kg/hod. Zpracovávaným odpadem jsou zejména pneumatiky a plasty, ale i jiné. [1]

Mechanicky upravený materiál se nejdříve naváží na požadovanou hmotnost a je nadávkován pásovým dopravníkem do vzduchotěsného zásobníku, ze kterého je dále pomocí zásobníkové stěrky a šnekového dopravníku dávkován do pyrolýzní pece. Posun materiálu v peci je zajištěn třemi bezjádrovými šneky. Regulací otáček může být nastavována doba zdržení odpadu v aktivní zóně retorty (pohybuje se od 20 do 80 minut). Ohřev probíhá pomocí pěti sekcí propanových hořáků, které umožní dosažení provozní teploty až 800°C. Pevný uhlíkatý zbytek je jímán do popelového boxu a plyny jdou do cyklonových odlučovačů. Takto vyčištěný plyn projde dvěma stupni chlazení. Primární tvoří dva křížové chladiče typu pyrolýzní plyn - vzduch, sekundární pak výměník pyrolýzní plyn - voda, kde je plyn podchlazován tak, aby v potrubí už dále nekondenzoval. Kondenzát se shromažďuje v nádrži s míchadlem a ochlazený plyn je veden přes odběrovou sondu a průtokoměr do zásobníku. Dále

je využíván například v kogenerační jednotce. Na obrázku (10) je vidět celková chemická energie pyrolýzního plynu vyprodukovaného za 30 minut procesu z různých materiálů při teplotách od 500°C do 650°C. Je vidět, že množství energie roste s teplotou a dosahuje největších hodnot pro gumové odpady. [10],[11]



Obrázek 10: Energetický výtěžek při různých teplotách z různých druhů vsázky [10]



Obrázek 11: Schéma jednotky Pyromatic [13]

5. Speciální technologie pyrolytického zpracování

5.1. Plasmová pyrolýza

Jedná se o proces zahřívání odpadu velmi vysokými teplotami přesahující 1000°C (klidně v rozmezí 4000°C - 5000°C) pomocí plasmy bez přístupu kyslíku. Tím se docílí přeměny odpadů zejména na plyn CO a H₂. Plasmový hořák pracuje většinou na principu elektrického oblouku a je napájen stejnosměrným proudem. Díky vysoce efektivnímu dodávání tepla pro podporu fyzikálních i chemických změn odpadního materiálu je dosahováno lepší kontroly teploty procesu, nižšího objemu reakce a velmi dobrého složení plynného produktu. Vlastnosti produktů jsou dobře předvídatelné a vhodné pro materiálové a energetické využití. Zároveň se jedná o technologii velmi ekologickou bez velkých dopadů na zdraví a životní prostředí. Nicméně plasmová technologie je vysoce energeticky náročná. Jeden plasmový hořák spotřebuje okolo 1000 - 1500 kW na kilogram vsazeného materiálu, což ho s rychlostí zpracování odpadů okolo 0,1 - 1 t/h činí vysoce energeticky neefektivním. Proto je jediné významné využití plazmové pyrolýzy v oblasti likvidace nebezpečných odpadů. [3], [11]

5.2. Vakuová pyrolýza

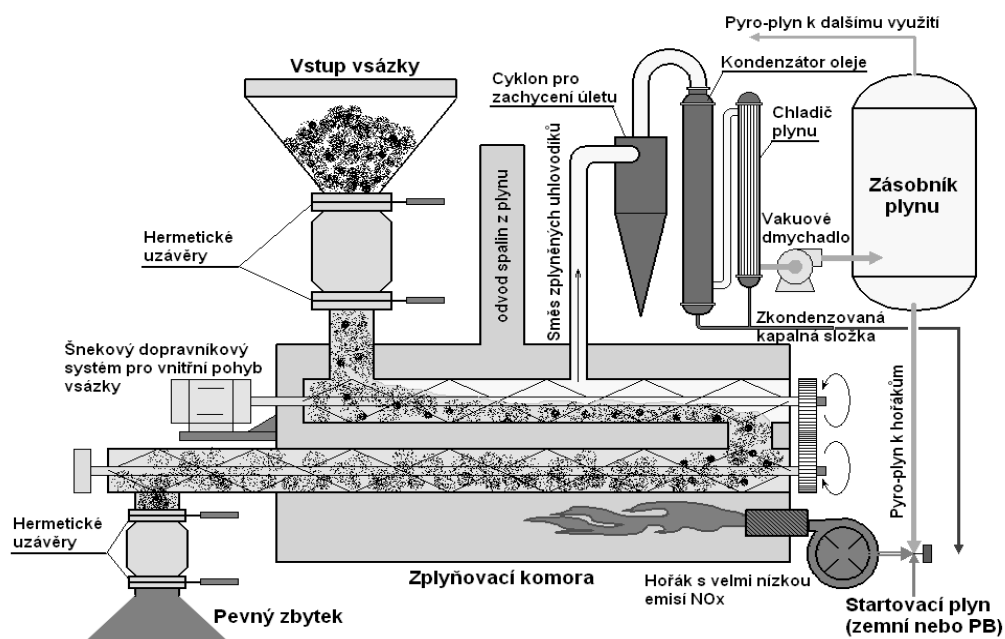
Vakuová pyrolýza byla vyvinuta v Kanadě společností Pyrovac. Technologie byla vyvinuta na principu tzv. *Multiple hearth furnace*. Česky se nazývá také etážová pec a jde v principu o kontinuální reaktor rozdělený do několika pater. Použit je šnekový reaktor v horizontálním uspořádání kvůli rozměrům. Díky tomu je proces poměrně nákladný. Výhodou je, že je možno zpracovávat větší částice, než u jiných technologií a také, že reakce probíhají za velmi sníženého tlaku, čímž se dosáhne dobrého inertního prostředí.[2]

Jednou z možností využití vakuové pyrolýzy je zpracování ojetých pneumatik jako součást likvidace autovraků. Příkladem může být jednotka, kterou chtěla zprovoznit společnost ELIAV, a.s. ve Velké Dobré. Proces v této jednotce probíhá v několika etapách. Nejdříve je dopravníkem pro vsázku s jemnou frakcí o velikosti 50 mm materiál dopraven nad násypku se dvěma kruhovými šoupátky, tvořící hermetický uzávěr. Před začátkem procesu dojde k automatickému vyčištění komory od vzduchu parou. Po ukončení této fáze se zažehnou hořáky s velmi nízkými emisemi NO_x a čistící ventil se zavře. Dojde ke spuštění vakuových dmychadel a díky šoupátkovému systému je udržován požadovaný podtlak po celou dobu procesu. Retorta je hermeticky uzavřená a je v ní udržován konstantní podtlak od -50 do -200 mm vodního sloupce. Je vybavena šnekovými dopravníky. Když je vsazená drť z pneumatik zplyněna, dojde k usazení uhlíkového zbytku, který je reverzním chodem šnekového dopravníku vyprázdněn do hermeticky uzavřeného kontejneru. Teplota uhlíku se sníží ze

zhruba 450 °C na 260°C, díky vodou chlazenému vyprazdňovacímu šnekovému dopravníku, což zabraňuje jeho oxidaci. Vznikající plyn prochází cyklonem a dále do Venturiho separátoru se dvěma sadami olejových vstříkovacích trysek, jednou pro kolmé vstříkování a druhou pro podélné kolem obrysové linie Venturiho pračky. Plyny, které nepřilnou k částicám oleje a nezkondenzují, jdou do kondenzační věže, kde se zkapalní. Nezkapalněné plyny jdou do dalšího tepelného výměníku, kde proběhne konečná separace plynné a pevné fáze. Poslední částí je magnetická separace oceli z kordů pneumatik z uhlíkatého zbytku, mletí, peletizace a balení. Ten se dá využít znovu jako saze pro gumárenský průmysl, případně je možné ho využít pro výrobu aktivního uhlí. Uhlíkové saze z pyrolýzou zpracovaných ojetých pneumatik obsahují až 85-88% čistého uhlíku. Z pyrolýzního oleje se můžou frakční destilací na rektifikační koloně získat dvě frakce olejů: ELTO (extra lehký topný olej) a LTO (lehký topný olej). Některé vlastnosti produktů jsou popsány v tabulce (15). [11]

Produkt		Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Výhřevnost [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
pyrolýzní plyn		1,2	47,5
pyrolýzní olej	ELTO	829,4	43,3
	LTO	861,5	42,3

Tabulka 15: Některé vlastnosti pyrolýzního plynu a oleje při pyrolýze pneumatik [11]



Obrázek 12: Schéma procesu zpracování pneumatik vakuovou metodou [11]

5.3. Mikrovlnná pyrolýza

Jako další alternativní možnost pro pyrolytické zpracování je možnost využití k ohřevu vsázky mikrovlnného záření. Jedná se o relativně nový proces, vyvinutý v Hainaultu ve Velké Británii a ukázalo se, že se jedná o efektivní metodu znovuzískání chemikálií v různých druzích odpadů, jako například plastů, odpadních kalů a kávových slupek. Mikrovlnné záření může být využito přímo pro zahřátí odpadního materiálu, pokud dobře absorbuje záření, ale i pro materiály, které jsou průsvitné pro mikrovlnné záření (např. plasty) nebo ho absorbují velmi špatně (jako např. motorový olej), a to smícháním s dobrým mikrovlnným receptorem, který zaručí zahřátí odpadu na potřebnou teplotu pro vznik pyrolýzy. Použití materiálů na základě uhlíku (částicový uhlík, pevný zbytek produkovaný pyrolýzou) jako mikrovlnného receptoru nabízí množství výhod oproti ostatním způsobům pyrolytického zpracování. Při použití těchto materiálů v reaktoru lze dosáhnout vysoce redukčního chemického prostředí, což sníží formování nežádoucích oxidovaných prvků vznikajících při pyrolýze. Navíc dochází k ohřátí jen cílených materiálů a ne plynů v reaktoru a reaktoru samotného. To mimo jiné umožňuje dosáhnout určitých chemických reakcí způsobem nemožným v ostatních druzích pyrolytického zpracování, díky selektivnímu zahřátí reaktantů. To umožňuje vznik více jednotného teplotního profilu a lepšího výtěžku konkrétních požadovaných produktů. Nicméně mikrovlnné záření způsobuje určitý risk oproti ostatním druhům, což může být kompenzováno vhodnou Faradayovou klecí.

Na základě několika studií bylo objeveno, že proces mikrovlnné pyrolýzy je schopen kladné energetické bilance, protože například vzniklé uhlovodíkové oleje mají několikanásobně větší energetickou hodnotu, než elektrická energie spotřebovaná na mikrovlnný ohřev odpadu. V určitých studiích bylo zjištěno, že pyrolýza může být prováděna kontinuálně a je možné dosáhnout energetického poměru až 8. Produkovaný olej dosahoval asi 90% energetické hodnoty odpadního zpracovávaného oleje. Nicméně je nutné dodat, že takovýto energetický poměr byl brán za předpokladu, že spotřebovávaná energie je pouze elektrická energie využívaná k mikrovlnnému záření v reaktoru, což znamená, že v praxi by se dosahovalo daleko menších hodnot po započtení dalších spotřebovaných složek potřebných například k přepravě a shromažďování odpadu. [12]

Tabulka (16) ukazuje výtěžek hmotnostního podílu jednotlivých produktů mikrovlnné pyrolýzy při aplikaci různých nastavení výzkumu.

Druh odpadu	Plyn [% hm]	Olej [% hm]	Uhlí [% hm]
odpadní automobilový olej	8	85	7
plastový odpad	19-21	79-81	0
odpadní kal	36-63	2-8	30-60
použité automobilové pneumatiky	10	50	40

Tabulka 16: Porovnání výtěžnosti jednotlivých produktů z různých druhů zpracovávaných odpadů [12]

5.4. Hydropyrolýza

Další možností je tzv. hydropyrolýza. V tomto případě se kombinuje pyrolýza a hydrokrakování, což znamená, že do reaktorů jsou přidávány atomy vodíku za účelem snížení obsahu kyslíku v tekuté složce pyrolýzních produktů a to v rámci jednoho procesního kroku. Tato metoda by mohla být novým způsobem výroby kapalných uhlovodíků, má ale některé protichůdné požadavky. K zajištění účinné hydrogenace je zapotřebí vysokých tlaků, při kterých ale vzniká více pevných zbytků než kapalných, které bychom ale potřebovaly nejvíce. [2]

5.5. Shrnutí vlastních poznatků

Z výše zmíněných aplikací pyrolýzy lze vyvodit několik závěrů. Ve světě je za posledních pár desítek let celkem podstatná snaha o využití pyrolýzy při zpracování odpadů a biomasy a to zejména za účelem ekologicky šetrného a energeticky a materiálně využitelného zpracování odpadu. Za tímto účelem bylo vyvinuto několik druhů reaktorů a procesních uspořádání pro různé druhy materiálu.

Pro zpracování odpadní biomasy se využívají zejména fluidní reaktory, ablační reaktor a rotační kuželový reaktor. Až na ablační reaktor je nutné drcení biomasy na částičky o rozměrech řádově několika milimetrů. Tento postup se zdá být výhodný a zpracování biomasy se zaměřuje hlavně na získání kapalného produktu a s tím spojenou optimalizaci tohoto pyrolýzního oleje pro další využití, zejména jde o snahu vyvinout plnohodnotné palivo do spalovacích motorů.

Další velkou skupinou odpadu je komunální odpad, u kterého pyrolýza v celkovém procesu zpracování plní spíše dílčí roli a je následována procesy jako je spalování a zplyňování. Je to dáno materiálovou povahou komunálního odpadu, který se obtížněji pyrolyzuje a obsahuje

i části, které pyrolýzou procházejí téměř beze změny. Komunální odpad je zpracováván pomalou pyrolýzou. Pro tento druh odpadu se používají hlavně reaktory s rotační pecí, které se zdají být zatím ideálním řešením pro průmyslové využití.

Poslední velkou skupinou odpadů jsou pneumatiky. Ty se zpracovávají buď v reaktorech s rotační pecí, nebo je snaha o vakuovou pyrolýzu, kdy se využívá šnekového reaktoru. Odpadní pneumatiky jsou odpadem s velkým významem a několika podstatnými výhodami. Jejich počet se zatím neustále zvyšuje a jedná se při tom o velmi specifický odpad se stále stejnými vlastnostmi. Je tedy zřejmé, že investice do specifického materiálového a energetického využití pneumatik by se měla vyplatit.

Reaktor, který se zřejmě opravdu nevyplatí pro průmyslové použití, je reaktor s pevným ložem, a to kvůli špatnému přestupu tepla a tím způsobenému pomalému ohřevu. Také se musí materiál zpracovávat ve várkách, což by způsobovalo další časové prodlevy.

6. Návrh blokového schématu pyrolytického zpracování komunálního odpadu

Jedním z cílů bakalářské práce bylo navrhnout blokové schéma na zpracování komunálního odpadu. Komunální odpad má velikou nevýhodu, kterou je jeho vysoká nehomogenita. Klasický komunální odpad se skládá z biologicky rozložitelného odpadu, plastu, inertních odpadů, kovů, skla a různých druhů nebezpečného odpadu, jak již bylo zmíněno výše. Pro příklad je v následující tabulce zobrazeno možné prvkové zastoupení ve směsném komunálním odpadu.

Látka	Jednotka	Hodnota	Látka	Jednotka	Hodnota
Voda	% hm	22 ± 6,5	Chlor	mg·kg ⁻¹	6500 ± 450
Uhlík	% hm	33 ± 2,5	Fluor	mg·kg ⁻¹	360 ± 26
Vodík	% hm	4,2 ± 0,4	Hliník	mg·kg ⁻¹	11000 ± 830
Kyslík	% hm	19 ± 1,9	Vápník	mg·kg ⁻¹	18000 ± 1400
Fosfor	mg·kg ⁻¹	750 ± 70	Železo	mg·kg ⁻¹	23000 ± 1800
Síra	mg·kg ⁻¹	1500 ± 150	Draslík	mg·kg ⁻¹	2100 ± 150
Brom	mg·kg ⁻¹	130 ± 11	Hořčík	mg·kg ⁻¹	2500 ± 190
Sodík	mg·kg ⁻¹	4600 ± 590	Rtuť	mg·kg ⁻¹	0,64 ± 0,06
Křemík	mg·kg ⁻¹	21000 ± 2800	Nikl	mg·kg ⁻¹	51 ± 4
Arsen	mg·kg ⁻¹	1,4 ± 0,1	Olovo	mg·kg ⁻¹	400 ± 43
Kadmium	mg·kg ⁻¹	7,8 ± 0,63	Antimon	mg·kg ⁻¹	52 ± 6
Chrom	mg·kg ⁻¹	140 ± 13	Cín	mg·kg ⁻¹	97 ± 22
Meď	mg·kg ⁻¹	910 ± 100	Zinek	mg·kg ⁻¹	1100 ± 100

Tabulka 17: Příklad prvkového zastoupení směsného komunálního odpadu [2]

V předchozí kapitole bylo ukázáno několik příkladů provozních procesů na zpracování komunálního odpadu. Je vidět, že se vždy jedná nejen o pyrolýzu samotnou, ale je spojena s dalšími procesy. U zmiňovaných procesů to je spalování nebo zplyňování, ve kterých se dále zpracovávají produkty pyrolýzy. Tady je možná na místě zmínit, proč se vlastně vyplatí odpady nejdříve zpracovat pyrolýzou a až tyto produkty potom např. spalovat.

Pokud chceme optimálně spálit materiál s vysokou účinností a nízkými emisemi, musíme zajistit dostatečný přebytek vzduchu. Ten obsahuje 78% dusíku, který musí být ohřát na spalovací teplotu a zvyšuje množství spalin, které je nutné následně čistit. Pokud palivo nejdříve zplyníme, dosáhneme relativně nižšího objemu plynu. Ten bývá následně odprášen a čištěn. Takto vyčištěný plyn může být spálen s velmi malým přebytkem vzduchu, protože je dobře mísitelný se spalovacím vzduchem. Výsledkem je, že celkový objem spalin je nižší a zároveň je i řádově nižší obsah nečistot ve spalinách (např. dioxinů a furanů), než při přímém spálení paliva. Spalování plynu je také daleko lépe regulovatelné, než spalování tuhých paliv. Další výhodou je pak, že takto vyrobený plyn můžeme snadno přepravovat a využívat v plynových motorech na výrobu elektrické nebo mechanické energie a nejsme vázáni na velké spalovací kotle, které jsou potřebné při spalování tuhých paliv. [13]

Ze strany Evropské unie je snaha o co největší podíl materiálového zpracování odpadu, což zní logicky, protože to je cesta k udržitelnému rozvoji. Realita je ale taková, že dosáhnout ekonomicky rentabilního materiálového zpracování odpadů bez dotací od vlád, se zatím dosahuje velmi těžko.

Snaha je tedy jednak zbavit se odpadu a dále pak odpad co možná nejlépe využít. V komunálním odpadu jsou obecně látky, které se dají pyrolýzou zpracovat (biomasa, plasty, textil...) a látky, které projdou pyrolýzními teplotami téměř beze změn (kovy, keramika...). Tento problém se např. v procesu Thermosteect řeší tím způsobem, že se všechny odpad nejdříve lisuje do kostek, které jsou následně zahřívány a materiály, které mohou pyrolyzovat, tak se mění na převážně pyrolýzní uhlí. Kovy a další inertní látky projdou až do další fáze, kde se produkty pyrolýzy zplyní a inertní materiály se oddělí, taví a dále recyklují. Tento postup, na rozdíl od procesu Babcock tedy využívá i nezpyrolyzované části odpadu. U procesu S-B-W je podobný systém jako u Thermosteectu, akorát se zpracovává drcený odpad v rotační peci. Rotační pece jsou obecně nejpoužívanějším typem reaktoru používaným k pyrolýze komunálního odpadu, případně pak šnekové reaktory nebo s pevným ložem, který ale není doporučován k průmyslovému použití, zejména kvůli své neflexibilitě způsobené várkovým stylem plnění.

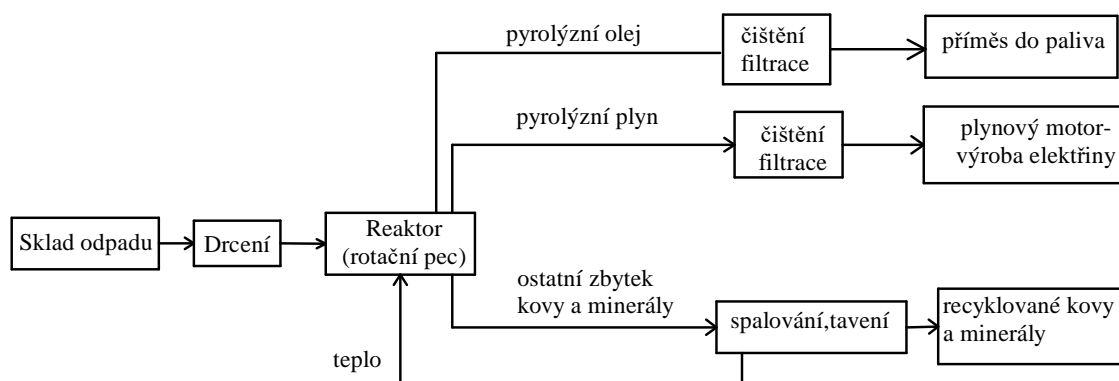
Produkty při zpracování komunálního odpadu jsou většinou plyn, který je rovnou spalován a využit k výrobě elektřiny a tepla, případně biouhel a dále nezpyrolyzované materiály. Pyrolýzní olej většinou není na prvním místě. Jedním z důvodů je to, že se v drtivé většině případů jedná o pomalou pyrolýzu a bioolej je většinou produktem rychlé pyrolýzy biomasy.

6.1 Blokové schéma

Jako první fáze jednotky bude skladování odpadu v odpadním bunkru. Jako reaktor bude použit reaktor s rotační pecí. Tento reaktor je schopen zpracovávat i větší kusy materiálu, ale pro větší efektivitu je lepší drcení na kusy velikosti přibližně 20 cm. V rotační peci bude docházet k pomalé pyrolýze při teplotách okolo 500°C. Produkovaný plyn bude odváděn a následně čištěn aby byl vhodný k použití v plynovém motoru na výrobu elektřiny, případně jako produkt vhodný k prodeji. Podobně se bude zpracovávat pyrolýzní olej, který bude čištěn a následně využíván k přimíchávání do paliva. Pevný zbytek bude spalován ve spalovací komoře spolu s kovy a minerály, které se roztaví a následně se mohou recyklovat a znovu použít. Složení produktů je u pomalé pyrolýzy pro všechny tři druhy produktů podobné a záleželo by na konkrétním nastavení a složení odpadů v procesu.

Produkty tedy budou energie v podobě elektřiny vyráběné v plynovém motoru, pyrolýzní olej a kovy a minerály vhodné pro další použití.

Výhodou takovéto jednotky má být hlavně to, že spalováním upravených surovin, a ne přímo odpadů, by měly vznikat menší emise nečistot. To je sice jedním z hlavních argumentů většiny výrobců a firem dodávající pyrolýzní jednotky, ale realita může být trochu jiná, jak uvádějí některé zdroje [14]. Důležitá je tedy opravdu kvalitní fáze čištění, aby takovýto proces mohl být tak zeleným, za jaký se s oblibou prohlašuje.



Obrázek 13: Návrh blokového technologického schématu uspořádání pyrolýzní jednotky na zpracování komunálního odpadu

7. Závěr

V této bakalářské práci bylo cílem poskytnout základní přehled o technologickém uspořádání metod pyrolýzního zpracování různých druhů odpadů od zemědělského po komunální, přehled základních reaktorů včetně informací o procesních parametrech a vlastnostech produktů a navržení blokového schématu pyrolýzní jednotky pro zpracování komunálního odpadu.

V první fázi byly popsány principy pyrolýzy a procesní parametry spolu s produkty a možnostmi jejich použití. Jako produkty pyrolýzy byly charakterizovány plynné, kapalné i pevné látky, jejichž složení a množství záleží na uvedených procesních parametrech. Část produktů je většinou rovnou použita k získávání potřebného tepla pro proces pyrolýzy.

V další části byla probrána problematika základních pyrolýzních reaktorů a jejich konstrukce a zařazení do procesu s následným porovnáním výhod a nevýhod u jednotlivých typů.

Dále je ukázka několika procesů současných nebo již ukončených, které se pyrolýzou zabývají v průmyslovém měřítku. Je popsán princip fungování procesů, případně množství a složení produktů. V této práci je jich zmíněno jen velmi malé množství v porovnání s tím, kolik jich ve skutečnosti existuje nebo bylo v provozu, protože zpracování všech by vystačilo na samostatnou knihu. Je vidět, že o problematiku pyrolýzy se zajímají v podstatě všechny vyspělé státy, protože se jedná o velmi zajímavou možnost nakládání s odpady a biomasou. Problémem ale je, že všechny firmy se sice zaštiťují téměř nulovými emisemi, ale málokdy je to ověřeno jinými nezávislými pozorováními. Také je to technologie bez větší tradice, která tím pádem může mít problém se zájmem investorů a v neposlední řadě i s přijetím veřejností, které pod ní vidí jen další spalovny, se kterými automaticky přichází znečištěné ovzduší. Na místě by tedy byla určitá společenská osvěta na toto téma. Zmíněny jsou i méně časté způsoby pyrolýzy, jako je mikrovlnná pyrolýza, plasmová pyrolýza nebo hydropyrolýza.

V poslední části je na základě informací získaných rešerší na dané téma navrženo základní blokové schéma pyrolýzní jednotky pro zpracování komunálního odpadu s možným využitím produktů.

Myslím si tedy, že pyrolýza určitě své opodstatnění ve zpracování odpadů má, protože má řadu výhod oproti konvenčním způsobům. Ideální je např. rychlá pyrolýza biomasy, jejíž produkty můžou v budoucnu nahradit paliva spalovacích motorů. Důležité je zaměřením se na zkvalitňování produktů, případně jejich standardizaci aby mohli být vhodné pro prodej a běžné užití.

Seznam použité literatury

- [1] *Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů* [online]. 2010 [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.opzp2007-2013.cz/ke-stazeni/252/10821/detail/studie-zarizeni-na-pyrolyticky-rozklad-odpadu-i/>
- [2] TRÁVNÍČEK, Petr. *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 9788075092069.
- [3] CHEN, Dezhen, Lijie YIN, Huan WANG a Pinjing HE. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management* [online]. 2014, **34**(12), 2466-2486 [cit. 2016-08-08]. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.08.004. ISSN 0956053x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X14003596>
- [4] PAPUGA, Sasa, Petar GVERO a Ljiljana VUKIC. Temperature and time influence on the waste plastics pyrolysis in the fixed bed reactor. *Thermal Science* [online]. 2016, **20**(2), 731-741 [cit. 2016-08-14]. DOI: 10.2298/TSCI141113154P. ISSN 03549836. Dostupné z: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361500154P>
- [5] *Btg-btl, biomass-to-liquid* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <https://www.btg-btl.com/en>
- [6] JÍLKOVÁ, Lenka, Karel CIAHOTNÝ a Radek ČERNÝ. Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů. *Paliva* [online]. 2012, **4**(3), 74-80 [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/cz/o-casopisu/hledani>
- [7] RTP™ rapid thermal processing from Envergent Technologies. *Envergent technologies* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <https://www.envergenttech.com/wp-content/uploads/2015/02/rtp-from-envergent-2010.pdf>
- [8] Nízkoteplotní katalytická depolymerizace. *GB Pyrolysis* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: http://www.gbpyrolysis.com/sites/default/files/content/gb_pyrolysis_cz_2015.pdf
- [9] Process Description. *Thermoselect* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.viveracorp.com/1%20process%20description%20eng.htm>
- [10] HONUS, Stanislav, Dagmar JUCHELKOVA, Adam CAMPEN a Tomasz WILTOWSKI. Gaseous components from pyrolysis—Characteristics, production and potential for energy utilization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2014, **106**, 1-8 [cit. 2016-08-14]. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.11.023. ISSN 01652370. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237013002623>

- [11] ŠEJVL, Radovan. *Technické systémy pro EVO* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14].
Dostupné z: <http://www.energis24.cz/300/technick%C3%A9-syst%C3%A9my-pro-evo>
- [12] SU SHIUNG, Lam a A. Chase HOWARD. A Review on Waste to Energy Processes Using Microwave Pyrolysis. *Energies* [online]. 2012, **5**(10), 4209-4232 [cit. 2016-08-14]. DOI: 10.3390/en5104209. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/10/4209/htm>
- [13] *Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.cpga.cz/>
- [14] Spalovny v přestrojení. *Arnika* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: http://arnika.org/soubory/dokumenty/odpady/Ke_stazeni/2006%20Spalovny%20v%20p%C5%99estrojen%C3%AD%20-%20p%C5%99%C3%ADpadov%C3%A9%20studie.pdf
- [15] Pyromatic - schéma. *Klastr envicrack* [online]. b.r. [cit. 2016-08-14]. Dostupné z: <http://www.envicrack.cz/img/pyrolyza02.jpg>