



Pyrolýzní zpracování vybraných odpadů
Bakalářská práce

Vedoucí práce:
Ing. Bohdan Stejskal, Ph.D.

Vypracoval:
Ondřej Lokaj

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Pyrolýzní zpracování vybraných odpadů“ vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše

V Brně dne:.....

.....

podpis

ZADÁNÍ BP

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Bohdanu Stejskalovi Ph.D. za jeho ochotu a trpělivost, za dobré rady a připomínky. Dále chci poděkovat panu Ing. Jaroslavu Frantíkovi PhD. z VŠB v Ostravě, za jeho čas a ochotu při realizaci návštěvy pyrolýzní linky Pyromatic a také za jeho rady a informace.

ABSTRAKT

Tato rešeršní bakalářská práce je zaměřena na pyrolýzní zpracování vybraných odpadů, konkrétně plastů a pneumatik.

Do teoretické části je zahrnuto legislativní prostředí týkající se zpracování odpadů, zaměřené na pyrolýzu. Poznatky týkající se zpracování odpadů pomocí pyrolýzy, včetně dostupných technologií se zaměřením na odpadní plasty a pneumatiky. Dále je v teoretické části výčet odpadů, které je možné pyrolýzou zpracovat, jejich výstupy včetně jejich využití.

V praktické části popisuji zařízení, které jsem navštívil, po technické a provozní stránce. Popisuji zde, jaké odpady v něm lze zpracovat a složení výstupů. Rovněž zde popisuji i technické problémy, spojené se zpracováním odpadních plastů a pneumatik.

Na závěr práce hodnotím potenciál technologie.

Klíčová slova: pyrolýza, odpad, plasty, pneumatiky

ABSTRACT

This literature search bachelor's thesis is focused on a pyrolysis treatment of a selected waste, especially plastic and tire waste.

The legislation, regarding waste treatment which is focused on pyrolysis, is summarized in the theoretical part. Findings related to the waste treatment are focused on pyrolysis, within the available technology which is focused on plastic waste and tires. There is a list of a waste that can be processed by pyrolysis, its output, within its usage.

Establishment which I visited, is described technologically and operationally in the practical part of the thesis. I am describing, which type of the waste can be processed there, and the output composition. I also describe the technical problems which are connected with the treatment of plastic waste and tires.

In the end of the thesis, I reviewed the potential of the technology.

Key words: pyrolysis, waste, plastics, tires

OBSAH

OBSAH.....	6
1 ÚVOD.....	8
2 CÍL PRÁCE.....	10
3 MATERIÁL A METODIKA.....	10
4 LITERÁRNÍ PŘEHLED	11
4.1 Legislativní přehled	11
4.1.1 Zákony	12
4.1.2 Vyhlášky	13
4.1.3 Katalog odpadů	13
4.2 Základní pojmy	14
4.3 Hierarchie způsobů nakládání s odpady	17
5 TECHNOLOGIE	18
5.1 Druhy pyrolýzy	19
5.1.1 Pomalá pyrolýza	20
5.1.2 Rychlá pyrolýza	21
5.2 Procesy.....	22
5.3 Reakce.....	23
5.4 Vstupy.....	24
5.5 Výstupy a jejich využitelnost.....	25
6 PYROLÝZA PLASTŮ A PNEUMATIK.....	27
6.1 Plasty.....	27
6.1.1 Charakteristika odpadu	28
6.1.2 Produkty pyrolýzy plastů	29
6.2 Pneumatiky	30
6.2.1 Charakteristika odpadu	30

6.2.2	Produkty pyrolýzy pneumatik.....	31
6.3	Schéma pyrolýzní linky	32
6.4	Druhy pyrolýzních postupů	34
6.5	Současná zařízení v provozu.....	40
	Česká republika:	40
	Zahraničí:	41
6.6	Neúspěšné projekty.....	41
6.7	Navštívené zařízení.....	42
7	ZÁVĚR	44
8	Seznam použité literatury	46
	Odborné publikace a zákony:	46
	Materiály dostupné online:	46
9	Seznam fotografií a obrázků.....	49
10	Seznam grafů a tabulek.....	49
11	Seznam zkratek.....	50

1 ÚVOD

Na světě existuje obrovské množství druhů plastů, které jsou vyráběny. Co je to vlastně plast, plastická nebo umělá hmota? Jedná se o syntetické nebo polosyntetické polymerní látky uměle vytvořené člověkem. Vzhledem k jejich téměř neomezenému využití, vysoké odolnosti a možnostem tvarování, nacházejí uplatnění v našem každodenním životě. Jsou z nich vyrobeny obaly potravin, oblečení, části vozidel a letadel, různé potrubní vedení a spousta dalších věcí, se kterými přicházíme každý den do styku. Bohužel se však jejich kladné vlastnosti v případě ukončení jejich služby stávají jejich obrovskou nevýhodou.

Plastové odpady jsou největším problémem naší společnosti, jelikož naše společnost vyprodukuje obrovské množství odpadních plastů. Díky obrovskému rozmachu průmyslu zaměřeného na produkci polymerů, narůstá rovněž vysoké množství odpadů buď z výroby, nebo přímo z využívání těchto látek. Vzhledem k jejich vlastnostem je přirozenými biodegradabilními procesy v životním prostředí velmi obtížné odbourat. Doba jejich rozpadu je od několika minut v případě PVA až po několik tisíc až desítek tisíc let.

V roce 2015 byla produkce plastů v České Republice 383 351 tisíc tun. [12] A v celé Evropě se ročně vyprodukuje okolo 25 milionů tun plastových odpadů. [13] Z toho důvodu se snažíme přijít s dalšími efektivnějšími postupy jak tyto odpady beze zbytku a šetrně k životnímu prostředí využít a zhodnotit. Jedním z takových postupů je i pyrolýza, kterou se budu zabývat v této práci.

Jedná se o starý postup tepelného zpracování a rozkladu neinertního materiálu s vysokým obsahem organické hmoty, uhlovodíků a polymerů za minimálního, téměř žádného přístupu kyslíku za přesně daných teplot. Složité organické materiály, které jsou obsažené ve zpracovávané surovině, se štěpí na jednoduché chemické sloučeniny a pevný zbytek. V závislosti na vstupní surovině, výchozím produktu a použité technologii, se odvíjí také teplota zpracování materiálu, která se pohybuje v rozpětí od 150 °C do 1 500 °C v některých speciálních případech až 20 000 °C.

Tuhle metodu zpracování materiálu využívali již ve středověku uhlíři ke zpracování dřeva, za účelem výroby dřevěného uhlí, které má mnohem vyšší výhřevnost a menší hmotnost než klasické dřevo, protože se jednalo téměř o čistý uhlík. Stejným způsobem dochází taktéž ke zpracování ropy, takzvaným krakováním. Kdy vznikají z dlouhých

řetězců uhlíkatých látek, řetězce s menším počtem atomů uhlíků. Nicméně v uvedených případech se nejedná o pyrolýzu odpadu.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této rešeršní bakalářské práce je shrnutí co největšího množství informací týkajících se řešené problematiky, kterým je pyrolýzní zpracování vybraných odpadů, kterými jsou odpadní plasty, pneumatiky a různé pryže.

Cílem práce je také vymezení základních pojmů, základních chemických reakcí, typy možných použitelných odpadů a možných technologií, kterými může být pyrolýza prováděna.

Důraz je kladen na seznámení s technologií různých typů reaktorů včetně jejich výhod a nevýhod. Také je popsána charakteristika cílových produktů, které se získají pyrolýzním zpracováním odpadu, včetně možností jejich využití.

Součástí práce je také soupis zařízení, které se nacházejí v České Republice a v zahraničí.

3 MATERIÁL A METODIKA

V první části mé bakalářské práce jsem se zaměřil na zajištění informací týkajících se problematiky termického zpracování odpadů, konkrétně pyrolýzního zpracování odpadů. Uvedl jsem výčet všech nejdůležitějších zákonů a vyhlášek týkajících se řešené problematiky.

Ve druhé části práce jsem se zaměřil na technologii pyrolytického zpracování odpadu. To zahrnuje reakce probíhající uvnitř reaktoru, různé vstupy, výstupy a jejich praktické využití. Z odpadů které jsem vyjmenoval, jsem se pak zaměřil konkrétně na pyrolýzu odpadních plastů a pneumatik, jelikož jde o složky odpadu dosti problematické, co se týče recyklace a jejich následného využití. Následně jsem uvedl výčet různých druhů pyrolýzních postupů, včetně schémat jejich reaktorů.

Ve třetí části jsem z dostupných zdrojů zjišťoval, kdo se v České republice a v okolních státech zabývá pyrolýzou plastových odpadů a pneumatik. Následně jsem vyhodnotil nejvhodnější zařízení, kde jsem si domluvil osobní prohlídku včetně konzultace, za účelem získání co největšího množství informací včetně fotodokumentace.

V závěru práce jsem zhodnotil možnosti a potenciál technologie.

4 LITERÁRNÍ PŘEHLED

4.1 Legislativní přehled

V legislativním prostředí týkajícím se životního prostředí je výkonnou mocí ministerstvo životního prostředí, které vydává nové zákony, vyhlášky, popřípadě novely k vyhláškám. Ministerstvo životního prostředí rovněž prostřednictvím České informační agentury životního prostředí (CENIA), která pod něj spadá, spravuje informační systém odpadového hospodářství (ISOH) ve kterém shromažďuje informace o produkci a nakládání s odpady na základě zákona 185/2001 sb. o odpadech ve znění pozdějších předpisů.

Dalším dozorovým orgánem je Česká inspekce životního prostředí (ČIŽP), která spadá přímo pod Ministerstvo životního prostředí. Má pravomoci ke vstupu do objektů, které produkují nebo nakládají s odpady a kontrolovat zde dodržování platných právních předpisů, zjišťování nedostatků, řešení a zjišťování škod na životním prostředí včetně zjištění viníků, a případné udělování pokut.

Také je vhodné v této kapitole zmínit, že samotné zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů je z pohledu legislativy neznámý pojem. Pyrolýza není definována v žádném zákoně České republiky a taktéž není definována ani v žádném právním předpisu Evropské unie. Proto bývá posuzována jako spalovna odpadů, ačkoliv při její činnosti nedochází ke spalování odpadu. A díky tomu jsou na ni kladeny stejné nároky jako na spalovny odpadů.

Na základě výše uvedených faktů, je potřeba se při navrhování zařízení k pyrolýznímu zpracování odpadů, zabývat různými zákony zabývajícími se ochranou životního prostředí, ochranou ovzduší, ochranou vod, včetně „integrovaného povolení“.

4.1.1 Zákony

185/2001 sb. – zákon o odpadech ve znění pozdějších předpisů (dále je „zákon o odpadech“)

Zákon o odpadech je hlavním pilířem odpadového hospodářství. Tento zákon je v pořadí již 2. zákonem, který se zabývá produkcí, zpracováním, odstraněním, skladováním a přepravou všech odpadů. Upravuje, za jakých podmínek lze s odpady nakládat, dále stanovuje hierarchii nakládání s odpady včetně osob, které s odpady mohou nakládat.

201/2012 sb. – zákon o ochraně ovzduší ve znění pozdějších předpisů

Zákon o ochraně ovzduší je dalším důležitým zákonem, protože je zde zakotveno mnoho důležitých bodů, jimiž se řídí spalovny nebo zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů. Především se jedná o emisní limity. Jeho cílem je předcházení a snižování úrovně znečištění ovzduší aby byla omezena rizika pro lidské zdraví a také byla snížena zátěž pro životní prostředí.

254/2001 sb. – zákon o vodách a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů

Zákon o vodách je důležitým zákonem ve vztahu k ochraně povrchových a podzemních vod. Jelikož při činnosti zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů dochází k nakládání s chemickými látkami nebo s vodami, které jsou využívány k chlazení a údržbě, a při jejichž úniku může dojít ke znečištění podzemních nebo povrchových vod.

100/2001 sb. – zákon o posuzování vlivů na životní prostředí ve znění pozdějších předpisů

Na základě zákona na ochranu životního prostředí, podléhá zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů posuzování vlivů na životní prostředí. V příloze č. 1 tohoto zákona je uvedeno, že tento typ zařízení podléhá vždy posuzování ze strany ministerstva životního prostředí. Jedná se konkrétně o záměr 10.1 v případě, že by se v zařízení zpracovávaly nebezpečné odpady, a pak pokud by se jednalo o záměr 10.2 v případě, že by zařízení bylo schopno zpracovávat více jak 100 Mg obyčejného odpadu za den.

76/2002 sb. – o integrované prevenci a omezování znečištění, o integrovaném registru znečišťování o změně některých zákonů (zákon o integrované prevenci)

Zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadu podléhá ohlašovací povinnosti. A to na základě integrovaného povolení a údajů uvedených v příloze č. 1 tohoto zákona. Konkrétně se jedná o písmena „a)“ a „b)“ v podkapitole 5.2 Odstranění nebo využití odpadu v zařízeních určených k tepelnému zpracování odpadu.

V písm. a) se jedná o zpracování při kapacitě větší než 3 Mg za hodinu v případě ostatního odpadu. A v písm. b) se jedná o zpracování při kapacitě větší než 10 Mg za den v případě nebezpečného odpadu.

133/1985 sb. – zákon České národní rady o požární ochraně ve znění pozdějších předpisů

V neposlední řadě je třeba zmínit zákon o požární ochraně, jelikož se jedná o zařízení pro termo-chemickou úpravu odpadů, při které hrozí riziko požáru.

4.1.2 Vyhlášky

383/2001 sb. - vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady

415/2012 sb. - vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší

288/2013 sb. - vyhláška o provedení některých ustanovení zákona o integrované prevenci

93/2016 sb. - vyhláška Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů)

4.1.3 Katalog odpadů

Pomocí katalogu odpadů se odpad dělí na odpad kategorie ostatní „O“ a odpad kategorie nebezpečný „N“. Nebezpečný odpad je v katalogu označen hvězdičkou.

Odpady jsou zde opatřeny číselným kódem, skládajícím se ze tří dvoučíslí.

XX YY ZZ – například: „20 01 39“ [5] kde:

XX je skupina odpadů – třídění odpadů podle odvětví, oboru nebo technologického procesu, při němž odpady vznikly

20 – Komunální odpady (odpady z domácnosti a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů), včetně složek z odděleného sběru

YY je podskupina odpadů – třídění dle způsobu vzniku

01 – Složky z odděleného sběru

ZZ je kategorie odpadů – konkrétně určuje druh odpadu

39 – Plasty, odpad kategorie „O“

4.2 Základní pojmy

Odpad

Dle §3 odst. 1 zákona o odpadech je odpadem každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. [4]

Nebezpečný odpad

Odpad vykazující jednu nebo více nebezpečných vlastností H1 – H15 uvedených v nařízení 1357/2004 evropské komise EU; dále odpad, který je uveden v Katalogu odpadů jako nebezpečný; nebo odpad, který je smíšen nebo znečištěn některým z odpadů, který je v Katalogu odpadů uveden jako nebezpečný. [4]

Komunální odpad

Veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících při činnosti právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. [4]

Odpadové hospodářství

Činnost zaměřená na předcházení vzniku odpadů, na nakládání s odpady a na následnou péči o místo, kde jsou odpady trvale uloženy, a kontrola těchto činností. [4]

Nakládání s odpady

Obchodování s odpady, shromažďování, sběr, výkup, přeprava, doprava, skladování, úprava, využití a odstranění odpadů. [4]

Zařízení

Technické zařízení, místo, stavba nebo část stavby. [4]

Shromažďování odpadů

Krátkodobé soustředování odpadů do shromažďovacích prostředků v místě jejich vzniku před dalším nakládáním s odpady. [4]

Skladování odpadů

Přechodné soustředování odpadů v zařízení k tomu určeném po dobu nejvýše 3 let před jejich využitím nebo 1 roku před jejich odstraněním. [4]

Sběr odpadů

Soustředování odpadů právnickou osobou nebo fyzickou osobou oprávněnou k podnikání od jiných osob včetně jejich předběžného třídění a předběžného skladování za účelem jejich přepravy do zařízení na zpracování odpadu. [4]

Úprava odpadů

Každá činnost, která vede ke změně chemických, biologických nebo fyzikálních vlastností odpadů (včetně jejich třídění) za účelem umožnění nebo usnadnění jejich dopravy, využití, odstraňování nebo za účelem snížení jejich objemu, případně snížení jejich nebezpečných vlastností. [4]

Opětovné použití

Postupy, kterými jsou výrobky nebo jejich části, které nejsou odpadem, znovu použity ke stejnému účelu, ke kterému byly původně určeny. [4]

Využití odpadů

Činnost, jejímž výsledkem je, že odpad slouží užitečnému účelu tím, že nahradí materiály používané ke konkrétnímu účelu, a to i v zařízení neurčeném k využití odpadů podle § 14 odst. 2, nebo že je k tomuto konkrétnímu účelu upraven.

Výčet způsobů využití odpadů je uveden v příloze č. 3 k zákonu o odpadech. [4]

Příprava k opětovnému použití

Způsob využití odpadů zahrnující čištění nebo opravu použitých výrobků nebo jejich částí a kontrolu provedenou osobou oprávněnou podle zvláštního právního předpisu spočívající v prověření, že použitý výrobek nebo jeho část, které byly odpady, jsou po čištění nebo opravě schopné bez dalšího zpracování opětovného použití. [4]

Materiálové využití odpadu

Způsob využití odpadů zahrnující recyklaci a další způsoby využití odpadů jako materiálu k původnímu nebo jiným účelům, s výjimkou bezprostředního získání energie. [4]

Recyklace odpadu

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. [4]

Odstranění odpadu

Činnost, která není využitím odpadů, a to i v případě, že tato činnost má jako druhotný důsledek znovuzískání látek nebo energie.

Výčet způsobů odstranění odpadů je uveden v příloze č. 4 zákona o odpadech. [4]

Zpracování odpadu

Využití nebo odstranění odpadů zahrnující i přípravu před využitím nebo odstraněním odpadů. [4]

Původce odpadu

Právnícká osoba nebo fyzická osoba oprávněná k podnikání, při jejichž činnosti vznikají odpady, nebo právnícká osoba nebo fyzická osoba oprávněná k podnikání, které provádějí úpravu odpadů nebo jiné činnosti, jejichž výsledkem je změna povahy nebo složení odpadů, a dále obec od okamžiku, kdy nepodnikající fyzická osoba odpad odloží na místě k tomu určeném; obec se současně stane vlastníkem tohoto odpadu. [4]

Oprávněná osoba

Každá osoba, která je oprávněna k nakládání s odpady podle zákona o odpadech nebo podle zvláštních právních předpisů. [4]

4.3 Hierarchie způsobů nakládání s odpady

Hierarchie způsobů nakládání s odpady vychází z evropské směrnice 75/442/ES ze dne 17. 6. 2008 a je na základě téhle směrnice přímo zakotvena v zákoně o odpadech a má 5 bodů:

1. Předcházení vzniku odpadů

Jedná se o navrácení suroviny, zpět do výroby. V případě, že by se tahle surovina, do výroby již nevrátila a neměla by již další využití, tak by se stala odpadem. Nebo také o návrh výrobku tak, aby již přímo ve výrobním procesu vznikalo co nejméně odpadů. Díky předcházení vzniku odpadů, lze snížit náklady na vzniklý odpad.

2. Opětovné použití

Zde se jedná o hledání možností dalšího využití výrobku nebo věci, která by se jinak stala odpadem.

3. Recyklace

Odpad je roztříděn na jednotlivé složky, kterými jsou plasty, kovy, sklo a papír. Sklo a plasty se dále třídí podle druhů a barev. Tyhle druhotné suroviny se následně použijí k výrobě nových výrobků.

Například: využití PET lahví na výrobu textilních vláken popřípadě nových PET lahví, využití starého papíru k výrobě nového papíru (papír může být recyklován pouze 7x z důvodu zkracování vláken při recyklaci), protektorování starých pneumatik (stáří může být maximálně však 7 let od data výroby)

4. Energetické využití

Je využití odpadu k výrobě elektrické nebo tepelné energie ve spalovně odpadu, popřípadě ve spolu-spalovacím zařízení. Případně rozklad odpadu na další energeticky využitelné látky pomocí pyrolýzy, jako je pyrolýzní olej nebo koks.

Například: pyrolýza pneumatik a plastů, spalování komunálních odpadů ve spalovně odpadů nebo spalování pneumatik ve spoluspalovacím zařízení.

5. Skládkování

Jedná se o nevhodný způsob nakládání s odpadem, který může být znovu využit. Dle stávajícího plánu odpadového hospodářství ČR, se má do roku 2024 úplně zastavit skládkování využitelného komunálního odpadu. Nyní je využitelný odpad bez užitku uložen na skládku.

5 TECHNOLOGIE

Název procesu pyrolýza se skládá z řeckého slova „pyros“, což je oheň a „lysis“, což je rozklad. Ze slov je patrné, že při pyrolýze dochází k rozkladu materiálu na jednodušší složky. Pyrolýza patří spolu se zplyňováním a spalováním mezi metody termochemické konverze. Pyrolýza ale probíhá na rozdíl od zplyňování a spalování bez přístupu oxidačního média. [15] Oxidačním médiem je myšlen vzduch, oxid uhličitý nebo vodní pára. Srovnání spalovacího a pyrolýzního procesu je uvedeno v tabulce č.1.

Zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadu a pro zplyňování, má jako každé jiné zařízení také mnoho svých výhod, ale i nevýhod oproti klasickým zařízením na spalování odpadů.

Výhody[9]:

1. Schopnost využití chemické energie odpadu ve formě vodíku a dalších chemikálií, místo jejich přeměny na spaliny
2. Menší problémy s korozí
3. Menší požadavky na čištění spalin – jsou zde menší objemy spalin s vyšší kvalitou
4. Žádné emise dioxinů a furanů
5. Lepší kvalita pevného zbytku, především u vysokoteplotních procesů
6. Zplyňovací jednotka může pracovat s menším prosazením paliv, což umožňuje budování malých závodů s kapacitou menší než 1 MW

Nevýhody[9]:

1. Potřeba relativně homogenního paliva; což znamená, že jako surovina musí být specifická materiálová frakce, případně směsný odpad upraven a homogenizován
2. Relativně obtížné řízení a regulace pyrolýzních a zplyňovacích procesů, spojené se struskováním a tvorbou dehtu
3. Technologie pyrolýzy a zplyňování odpadů se vyvíjely většinou pouze jako demonstrační jednotky, jsou s nimi tudíž malé zkušenosti v provozním měřítku, a některá již vyvinutá průmyslová zařízení byla dokonce již vyřazena z provozu
4. Celková kapacita současných zařízení je mnohonásobně menší ve srovnání s moderními velkokapacitními zařízeními na přímé spalování odpadů
5. Vyšší provozní náklady proti spalování odpadů

Tabulka 1: Srovnání parametrů – podmínek a produktů při pyrolýze a spalování [6]

	Pyrolýza	Spalování
Princip procesu	tepelný rozklad	oxidace, reakce s kyslíkem
Podmínky	redukční	oxidační
Teplota [°C]	500 - 1000	800 - 1500
Převládající reakce	endotermní	exotermní
Produkty	pyrolýzní koks	škvára, popílek
Odpady	H ₂ S, NH ₃ , CO, CO ₂ , CH ₄ a další lehké uhlovodíky	H ₂ O, CO ₂ , SO ₂ , SO ₃ , NO _x

5.1 Druhy pyrolýzy

Pyrolýza se dělí podle dosahovaných teplot na[23]:

1. Nízko teplotní - reakční teploty jsou do 500 °C
2. Středně teplotní - reakční teploty jsou v rozmezí 500 – 800 °C
3. Vysoko teplotní - reakční teploty jsou nad 800 °C

Pak se dále dělí podle rychlosti na:

1. Pomalou pyrolýzu
2. Rychlou pyrolýzu

5.1.1 Pomalá pyrolýza

Pomalá pyrolýza jinými slovy také karbonizační nebo Blatch proces. [23] Dochází při ní k pomalému ohřevu zpracovávaného materiálu, při němž lze dokonale oddělovat vznikající produkty. [23]

Pomalá pyrolýza probíhá za nízkých teplot, které se pohybují do 400 °C za nepřístupu oxidačního média kterým je O₂. Díky nízkým teplotám zde dochází především ke vzniku syntetického plynu, pyrolýzního oleje a pyrolýzního uhlí. Produkce pyrolýzního uhlí je vyšší než produkce ostatních produktů. [2] Rychlost ohřevu odpadu je zde zhruba 5-7 °C za minutu, což je důvod pro možnost materiálu z větších částic, než u rychlé pyrolýzy. Díky pomalému ohřevu je také doba zdržení v materiálu větší, než u rychlé pyrolýzy a to od 30 minut až po několik hodin, v závislosti na zpracovávaném množství. Pomalá pyrolýza využívá nejčastěji technologii válcové pece. [1]

Výhody:

1. Pyrolýzní jednotka je levnější než jednotka pro rychlou pyrolýzu
2. Schopnost zpracování více druhů vstupních surovin
3. U vstupní suroviny nezáleží tak moc na zrnitosti materiálu díky rychlosti ohřevu, tak jak tomu je u rychlé pyrolýzy
4. Menší dodávky tepla a elektrické energie

Nevýhody:

1. Pomalý přenos tepla do materiálu
2. Dlouhá doba zdržení v pyrolýzní komoře

5.1.2 Rychlá pyrolýza

Jedná se o nový proces. Při rychlé pyrolýze se vstupní surovina ohřívá vysokou rychlostí oproti pomalé pyrolýze a to 500 až 1 000°C za minutu bez přístupu kyslíku. Rychlost ohřevu ovšem požaduje, aby byly vstupní suroviny podrceny na co nejmenší částice, tak aby se odpad rychle ohřál v celém svém objemu.[1]

Teplota při rychlé pyrolýze bývá řízena v rozmezí 425 – 500 °C. Nutností je také, aby pára, která vzniká při odpařování vody, nezůstala v reaktoru moc dlouho maximálně 2 s, z důvodu sekundárních reakcí s dalšími vznikajícími produkty, a taktéž aby docházelo k rychlému ochlazení vzniklých par a aerosolů. Při rychlé pyrolýze se maximalizuje zisk kapalných uhlovodíků a pyrolýzního oleje nebo bio-oleje (v případě pyrolýzy biomasy), zastoupení pevného zbytku je oproti pomalé pyrolýze menší.

Rychlá pyrolýza je tedy žádoucím procesem, kdy je požadovaný co nejvyšší výtěžek pyrolýzního oleje z odpadního materiálu. Přibližné % hmotnostní složení ze vstupní suroviny rychlé pyrolýzy je 60 – 75 % pyrolýzního oleje (v případě biomasy se jedná o bio-olej), 15 – 25 % tvoří pevný zbytek a 10 – 20 % tvoří pyrolýzní plyn. [1]

Výhody:

1. Vysoká efektivita při produkci pyrolýzního oleje
2. Vysoká rychlost zpracování materiálu

Nevýhody:

1. Nutnost aby byl materiál zpracován na co nejmenší částice
2. Vysoké pořizovací náklady na pyrolýzní jednotku
3. Vysoké energetické nároky

5.2 Procesy

Pyrolýza probíhá v několika fázích, které jsou charakterizovány určitými fyzikálními a později i chemickými procesy, kdy ke každému pochodu dochází při určitém teplotním rozsahu. Tyhle procesy vedou k vysoušení, a později k rozkladu materiálu na jednotlivé frakce. Všechny tyto fyzikálně-chemické procesy, ke kterým dochází v průběhu zvyšování teploty v odpadu, jsou podrobněji uvedeny a rozepsány v tabulce č. 2. Obecně se jednotlivé fáze dají rozdělit na sušení, karbonizaci a zplyňování. [1]

Sušení

Sušení je prvním procesem, kterým prochází každý odpad, který v sobě obsahuje vlhkost. Probíhá v teplotním rozpětí do 150 °C. V téhle fázi dochází k odpaření fyzikálně vázané vody a dochází ke snižování hmotnosti o hmotnost odpařené vody. [11]

Karbonizace

Probíhá v teplotním rozpětí mezi 300 °C až 500 °C. V téhle fázi dochází k odštěpení radikálových skupin vysokomolekulárních organických látek, jako jsou celulóza, bílkoviny, tuky a plasty. Dochází ke vzniku pevné uhlíkaté, plynné frakce a také dochází k odštěpení chemicky vázané vody. Kapalná frakce vzniká dále kondenzací pyrolýzních plynů po opuštění reaktoru. [11]

Tvorba plynu (zplyňování)

Probíhá při teplotách nad 500 °C. V téhle fázi se kapalné a plynné frakce dále štěpí. Z pevného uhlíku a kapalných organických látek vznikají stabilní plyny vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a metan, které odchází z reaktoru. [11]

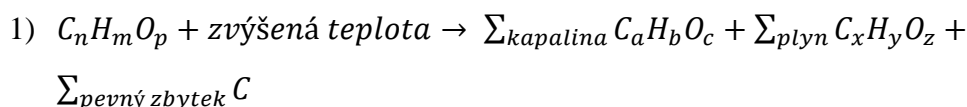
Tabulka 2: Chemické reakce v průběhu pyrolytického procesu v závislosti na teplotě [11]

Teplota [°C]	Chemická 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: dimerizace etylenu na buten, dehydrogenace na butadien, dienová reakce s etylenem na cyklohexan, termická aromatizace na benzen a výševroucí aromáty

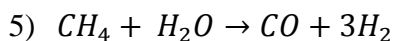
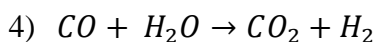
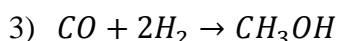
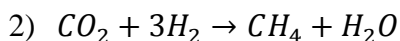
5.3 Reakce

Během procesu pyrolýzy se těžší a složitější uhlovodíkové molekuly štěpí na lehčí a menší molekuly uhlovodíků, nekondenzující plyny jako jsou CO, CO₂ a na pevný zbytek ve formě uhlíku. [2]

Rovnice pyrolýzy [2]:



Rovnice dehydratace [2]:



Rovnice vzniku HCl:



5.4 Vstupy

V zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů lze zpracovat širokou škálu různých odpadů, kterou vyprodukuje naše společnost. Jedná se hlavně o látky skládající se z organických látek nebo různých polymerů, které se vlivem vysokých teplot, zplyňují, zkapalňují a tím se štěpí na jednodušší molekulární látky společně za vzniku dalších energeticky využitelných produktů. Vzhledem k omezeným možnostem využití například nebezpečných odpadů, pneumatik, některých plastů nebo komunálního odpadu, se pyrolýza těchto odpadů jeví jako jejich nejlepší možný způsob využití.

Komunální odpad

Jedná se o druh odpadu o nehomogenní směsi různých odpadních složek. Nikdy nemá totožné složení. Komunální odpad také obsahuje vysoký podíl vlhkosti. Proto je tenhle odpad vhodné před pyrolýzním zpracováním patřičně vytřídit a vhodné je také jeho předsušení pro snížení energie, která by byla potřebná k jeho finálnímu zpracování a také z důvodu menšího množství vytvořené vodní páry.

Nebezpečný odpad

Nebezpečné druhy odpadu jsou vzhledem ke svým nebezpečným vlastnostem a svojí nebezpečností pro ŽP a zdraví lidí, potenciální cílovou skupinou odpadů, která by se mohla pomocí pyrolýzy zpracovávat, jelikož dojde k využití materiálu k výrobě tepelné a elektrické energie a také lze jeho zpracováním získat i další využitelné a cenné produkty. Například pomocí plazmové pyrolýzy, při které dojde k úplné destrukci materiálu.

Plasty a polymery

Plasty a polymery jsou vhodnou vstupní surovinou pro pyrolýzu, zejména silně znečištěné a kompozitní plasty, které jsou obtížně recyklovatelné. Především proto že

k jejich výrobě se používají různé monomery jako je ethylen, fenol, formaldehyd, propylen, styren, butadien a isopropen. [9]

Pneumatiky

Pneumatiky se řadí mezi uměle vytvořené látky. Existuje pro ně málo využití mimo protektorování, spalování nebo využití při stavbě skládky popřípadě jako bariéry tlumící nárazy vozů na závodních tratích. [1] Jsou potenciálním zdrojem velkého množství sazí, a kvalitního pyrolýzního oleje. [9]

Kaly z čistíren odpadních vod

Jsou vhodnou vstupní surovinou díky své konzistenci a také díky jeho množství, které naše společnost respektive čistírny odpadních vod dokáží vyprodukovat.

Nejčastější zpracování kalů z čistíren odpadních vod probíhá anaerobní stabilizací (vyhňíváním), odvodněním a jejich následným uložením na skládku nebo k její rekultivaci, popřípadě se v omezené míře může aplikovat na zemědělskou půdu. Kromě těchto uvedených možností nakládání, se pyrolýza jeví jako další vhodný způsob jeho energetického a materiálového využití.

Odpadní biomasa

Biomasa je nejstarším materiálem, ze kterého se získává tepelná energie. Jelikož se jedná o biologický produkt rostlinného původu, tak je velmi snadné ji získat například z lesnictví, zemědělství nebo z údržby veřejné zeleně. Může být získávána jako vedlejší produkt, nebo cíleně pěstována kvůli zisku energie. Výstupy z pyrolýzního zpracování biomasy jsou především pyrolýzní koks a pyrolýzní bio-olej.

5.5 Výstupy a jejich využitelnost

Složení výstupů závisí na druhu vstupní suroviny, na zvolené technologii, na homogenitě materiálu a v neposlední řadě na rychlosti ohřevu materiálu. Při použití separovaného odpadu a odpadní biomasy, je vyšší podíl pevné frakce. [10] Materiály jako plasty poskytují především výtěžek oleje a plynů. Odpady z pryže a pneumatik poskytují především výtěžek oleje a pevného zbytku (sazí).

Pyrolýzní olej

Jedná se o kondenzát vznikající kondenzací pyrolýzních plynů do podoby surového oleje tzv. „crude oil“, který se dále zpracovává. Olej se dá rozdělit do tří frakcí: lehký, střední a těžký. Jedná se o směs dehtu, oleje a vody obsahující složitou směs uhlovodíků a dalších organických látek, kterými jsou kyseliny, fenoly, alkoholy, polyaromatické uhlovodíky. Významnou součástí pyrolýzního oleje je také pyrolýzní voda. Výtěžnost se pohybuje v rozmezí 20-50 % hm. ze vstupní suroviny. [10,30]

Úpravou jako je destilace na jednotlivé frakce (lehkou, střední a těžkou) je možné získat velmi cenné oleje, které mohou být využity v chemickém průmyslu jako vstupní surovina pro výrobu, nebo také lze získat i oleje, které jsou svými vlastnostmi srovnatelné s motorovou naftou. V budoucnu mají tedy vysoký potenciál nahradit ropné produkty. [30] Pyrolýzní olej je také možné využít jako palivo.

Pyrolýzní plyn

Jedná se o nezkondenzovaný zbytek uhlovodíkových par a plynů vzniklých zplyněním v bezkyslíkovém prostředí pyrolýzního reaktoru. Je to především směs vodíku, metanu, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a dalších těkavých látek z odpadů. Výtěžek plynu je v rozmezí 20-50 % hm. ze vstupní suroviny.

Pyrolýzní plyn, který je pročištěn je možné dále využít k výrobě elektrické a tepelné energie pomocí kogenerační jednotky. Taktéž je možné ho využít k ohřevu pyrolýzního reaktoru. Možností jeho využití je také plnění do lahví a jejich prodej odběratelům. [10,30]

Pevný zbytek

Pevný zbytek má velkou variabilitu ve složení, které závisí na vstupním zpracovávaném materiálu a druhu procesu. V pevném zbytku může být obsažen polokoks, který vzniká při teplotách do 500 °C který se následně při teplotách nad 600 °C mění na koks, další produkty jsou vitrifikovaná skelná struska, jemné saze, minerální popeloviny, zbytkové procesem nezpracovatelné anorganické produkty, jakými jsou kovy, sklo, písek apod. Pevný zbytek se po opuštění reaktoru se dále třídí. Výtěžnost pevného zbytku je v rozmezí 10-50% hm. v závislosti na vstupní surovině. [10,22]

Například potenciál využití sazí je obrovský napříč celým průmyslem, jelikož se jedná o téměř čistý uhlík, který je moderním hojně využívaným materiálem se spoustou

možností aplikace. Dají se znovu využít například v gumárenství, kde se saze využívají jako plnivo polymeru, ze kterého je vyrobená pneumatika. Dále je využít k výrobě aktivního uhlí pomocí parní aktivace. K výrobě různých uhlíkatých vláken a kompozitů, katalyzátorů, nanokompozitu solárních článků, palivových článků nebo ultrakapacitorů. [30,32].

Polokoks a koks mohou být využity jako palivo. Získané kovy mohou být recyklovány a znovu využity. Skelná vitrifikovaná struska může být použita jako stavební materiál nebo může být uložena jako ostatní odpad na skládku.

6 PYROLÝZA PLASTŮ A PNEUMATIK

6.1 Plasty

Plasty je možné zpracovávat pomocí pyrolýzy i vzhledem k jejich rozdílnému mechanismu štěpení oproti jiným druhům odpadů, na různé frakce a cílené chemické látky pyrolýzou, při které lze ovládat teplotu. Vzhledem ke složitosti procesu a velkému množství nežádoucích vedlejších produktů, se tenhle proces nedokázal realizovat v jednoduché formě. [11] Při pyrolýze plastů dochází k mnoha reakcím, které vedou ke vzniku velkého množství různých uhlovodíků a aromátů. Mezi chemické fáze štěpení plastů patří iniciace, propagace a terminace. Mezi další reakce patří adice, cykloadice, transfer vodíku a kondenzace. Při procesu převládá především produkce pyrolýzního oleje a pyrolýzního plynu. Pevný zbytek tvoří pouze malou část produktu. Při vyšších teplotách dochází především ke tvorbě pyrolýzního plynu, k této tvorbě dochází také při použití rychlé pyrolýzy. Naopak při zvýšení tlaku během pyrolýzního procesu, dochází k útlumu produkce plynu. [25]

Plasty jsou také podstatnou součástí komunálního odpadu, zastoupení jednotlivých druhů plastů je znázorněno v tabulce č. 3.

Tabulka č. 3: Zastoupení plastů v SKO [10]

Polymer	Zastoupení [%]
PE	59
PS	12
PVC	9
PP	6
PET	6
ostatní	8

6.1.1 Charakteristika odpadu

Plasty patří mezi polymery, které mají širokou škálu vlastností, a to díky svým velkým molekulám. [16] Polymery se skládají z makromolekulárních látek, v jejichž řetězci se opakují základní látky (monomery). Monomery mohou být ve struktuře polymeru různě uspořádány a tím se mohou měnit vlastnosti výsledného polymeru. [18]

Polymery se dělí na elastomery a plasty, které se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty.

Elastomery

Elastomer je vysoce elastický polymer, který je schopen deformací za použití vnější síly, a následného navrácení do původního stavu bez jakéhokoliv poškození. Mohou být buď přírodní, nebo syntetické. Typickým zástupcem elastomerů je například pryž, která se vyrábí z přírodního nebo syntetického kaučuku. [16]

Plasty

Plast je obecné pojmenování pro materiály, které jsou z podstatné části tvořeny organickými makromolekulárními látkami (polymery). Vedle těchto látek obsahují i doplňující látky, takzvaná „aditiva“, která zlepšují jejich vlastnosti. [16] Dělí se do dvou skupin na termoplasty a reaktoplasty.

Termoplasty

Jedná se o plasty, které lze po ztuhnutí opakovaně zahřívat a převádět je do taveniny a tím měnit jejich tvar. Díky této jejich vlastnosti je lze bez problémů využít k recyklaci. [16]

Reaktoplasty

Jsou opakem termoplastu. Při zpracování se mění jeho struktura díky chemickým reakcím na základě účinku tepla, záření nebo vytvrzovacího činidla. Vytvářejí se husté prostorově zesíťované struktury, díky kterým je reaktoplast ve vytvrzeném stavu netavitelný a nerozpustný, jsou to například různé pryskyřice. [10,16]

6.1.2 Produkty pyrolýzy plastů

Na produkty pyrolýzy plastů má vysoký vliv zpracovávaná surovina a také různá aditiva přidávaná do plastů. Různé plasty mají různé složení výstupů, některé druhy plastů mohou poskytovat hlavně produkty obsahující nerozvětvené uhlovodíky, další druhy mohou poskytovat především produkty s vysokým obsahem rozvětvených nebo také aromatických uhlovodíků. Pyrolýzní olej se skládá ze dvou frakcí, a to z netuhnoucí kapalné frakce a z tuhnutí voskovité frakce. Pevný zbytek se skládá především z nezreagovaných polymerů, polokoksu, koksu, sazí.

Při laboratorním zpracování plastů jako je třeba PE se zjistilo, že nejvhodnější teplota ke zpracování plastů je okolo 750 – 850°C kdy při téhle teplotě docházelo k největším štěpným reakcím. Zkoumaný materiál se v tomhle případě PE se rozštěpil na plyny 5 %, střední destiláty 35 – 42 % oleje 25 – 28 % a lehkou benzinovou frakci 25 – 28 % což tvoří více jak 95 % hmotnosti zkoumaného materiálu. V případě PS došlo ke štěpení až 99 % hmotnosti zkoumaného materiálu [25]

Tabulka č. 4: Porovnání produktů pyrolýzy a spalování plastů [24]

Polymer	Produkty pyrolýzy	Produkty spalování
Polyakryláty	akrylové monomery	CO, CO ₂
Polyolefiny	alkeny, alkany, alicyklické uhlovodíky	CO, CO ₂
Acetát celulózy	CO, CO ₂ , kyselina octová	CO, CO ₂ , kyselina octová
Polyamid 66	aminy, CO, CO ₂	CO, CO ₂ , NH ₂ , aminy
Polyvinylchlorid	HCl, aromatické uhlovodíky	HCl, CO CO ₂
Polyetylenglykotereftalát	alkeny, kyselina benzoová	
Polykarbonát	CO ₂ , fenol	CO, CO ₂
Fenolplasty	fenol, formaldehyd	CO, CO ₂ , HCOOH
Nenasycené polyestery	styren, kyselina benzoová	CO, CO ₂
Melaminformaldehydové pryskyřice	NH ₃ , aminy	
Polystyren	styren	CO, CO ₂

6.2 Pneumatiky

6.2.1 Charakteristika odpadu

Pneumatiku lze zařadit do skupiny kompozitních elastomerů, tudíž ji lze zařadit mezi plasty. Je vyráběna z vulkanizovaného přírodního nebo syntetického kaučuku.

Vulkanizace je proces, při němž se za pomoci vulkanizačního činidla, zesílují molekuly kaučuku, za zisku lepších vlastností. Vulkanizace je buď sírová, nebo radikálová. Při sírové vulkanizaci vzniká mezi sousedními atomy uhlíku s dvojnou vazbou vazba C – S – C, za vzniku prostorové sítě. Při radikálové vulkanizaci (bezsírové) vzniká síť mezi sousedními uhlíky s vazbou C – C, tahle vazba je stálejší a má lepší vlastnosti. Radikálovou vulkanizaci lze použít pouze u kaučuků, které nemají ve své struktuře dvojnou vazbu mezi sousedními uhlíky. [21]

Pneumatika je z hlediska svého složení velmi heterogenní materiál, vyrábí se z vulkanizovaného kaučuku. Jedná se o vyztužený pryžový kompozit, jelikož k její výrobě se používá velké množství různých součástí. Základními surovinami pro výrobu pneumatik jsou elastomery, ocelová a různá chemická vlákna. Procentuální složení pneumatiky je pryž 80 – 85 %, vlákna 12 – 15 % a ocelový kord 2 – 3 %. [20] Všechny její součásti kromě ocelového kordu podléhají termochemické degradaci na jednodušší látky.

6.2.2 Produkty pyrolýzy pneumatik

Při pyrolýze pneumatik převládá mezi produkty pyrolýzní olej a pevný zbytek. Pevný zbytek se skládá především uhlíku a ocelových drátů. Jejich obrovskou výhodou je také to, že jejich složení zůstává téměř stejné u každého výrobce pneumatik. Z toho plyne, že složení výsledných produktů úzce závisí na teplotě a také na rychlosti, při které probíhá pyrolýza. Teoretické procentuální zastoupení jednotlivých složek po pyrolýze pneumatik:

40 – 60 %	pyrolýzního oleje
35 – 45 %	pevného zbytku
10 – 25 %	pyrolýzního plynu

Jak již bylo řečeno, pevný zbytek obsahuje vysoké množství téměř čistého uhlíku, který obsahuje malé množství různých příměsí, jako jsou síra a chlor. Přibližné procentuální zastoupení těchto prvků je uvedeno v tabulce č. 5. Dále jsou v pevném zbytku obsaženy dráty vysoce kvalitní uhlíkaté oceli, které mohou být dále zpracovávány v hutích. Pyrolýzní olej, který může být využit po odstředění na tři základní frakce využit jako topný olej, popřípadě může být použit znovu jako vstupní chemikálie v průmyslu, jelikož výroba těchto vstupů je energeticky a finančně velmi náročná. Další možnost využití je úprava na syntetickou naftu popřípadě benzín a jejich následné použití jako paliva. Pyrolýzní plyn může být po vyčištění znovu vrácen do procesu, a může sloužit k ohřevu reaktoru a tak snížit náklady na udržení celého procesu. V tabulce č. 7 je uvedena výhřevnost a chemické složení plynu v závislosti na teplotě.

Hodnoty v tabulkách jsou ovšem orientační, vždy záleží na teplotě procesu, jeho rychlosti, použité technologii, době zdržení plynů v reaktoru a v neposlední řadě také záleží na tlaku. [19]

Tabulka č. 5: Vybrané chemicko-fyzikální vlastnosti pevného zbytku [1]

Vlastnosti	Hodnota [%]
Vlhkost	0,40
Uhlík	90,60
Popeloviny	11,60
Síra	2,30
Chlor	0,08

V tabulce č. 6 jsou uvedené základní informace o složení a výhřevnosti pyrolýzního oleje v závislosti na teplotě, při které byl odpad zpracován.

Tabulka č. 6: Chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolýzního oleje [1]

pyrolýzní teplota [°C]	Výhřevnost [MJ/kg]	Obsah uhlíku [%]	Obsah síry [%]
300	43,20	86,50	1
500	42,10	85,60	1,40
700	42,30	86	1,20

Tabulka č. 7: Vybrané chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolýzního plynu [1]

Druh analýzy	Vlastnost	Teplota procesu [°C]		
		500	550	600
Fyzikální	Výhřevnost [MJ * kg ⁻¹]	18,41	19,37	22,18
Prvková	H ₂	0,97	1,21	1,42
	CO	20,43	17,64	15,14
	CO ₂	41,52	42,71	39,63
	CH ₄	5,41	5,76	7,03
	C ₂ H ₄	4,87	5,01	6,05
	ostatní vyšší uhlovodíky	26,80	27,67	30,73

6.3 Schéma pyrolýzní linky

Pyrolýzní linka technologicky poměrně složité zařízení. V provozu dosahuje malých rozměrů oproti spalovně komunálních odpadů, přesto však jsou na ni kladeny stejné nároky.

Pyrolýzní linka se skládá z následujících technologických částí [23]:

Zařízení pro příjem a úpravu odpadu

Je základním a velmi důležitým zařízením skládajícím se z několika částí, kterými jsou: třídící linka, drtiče a popřípadě i peletovací linka, magnetický separátor, sklad, dávkovací šnekové nebo pásové dopravníky případně i dozimetry k měření radiace v odpadu.

Pyrolýzní komora

Válcovitá retorta, rotační popřípadě jiný reaktor (dle druhu pyrolýzy) včetně ohřevu na požadovanou teplotu a případného pohonu například šneků u šnekového reaktoru. Ohřev je prováděn buď přímo zahřátým inertním plynem, nebo přes mezistěnu zemním plynem nebo plynem vyprodukovaným z procesu. A v případě plazmové pyrolýzy přímo elektrickým obloukem.

Zařízení pro sběr čištění a jímání plynu

Jedná se především o sběrné a transportní potrubí, kondenzační jednotky, separační jednotky, odlučovače TZL, plynojem, plynová plnicí stanice.

Chemický a úpravárenský provoz

Zpracování olejů a kondenzátů, kterým je například čištění a jejich následné uskladnění do nádob, do doby jejich dalšího využití.

Kogenerační jednotka

Zde se dá využít vyčištěný pyrolýzní plyn pro výrobu elektrické a tepelné energie. Nejedná se o přímou část pyrolýzní linky, ale může být její součástí a její výstupy mohou být použity pro provoz linky.

Zařízení pro čištění spalin.

Pyrolýzní linka je vždy vybavena vícestupňovým čištěním spalin, přes které se spalinou pouští dále do komína. Vícestupňové čištění spalin zahrnuje [23]:

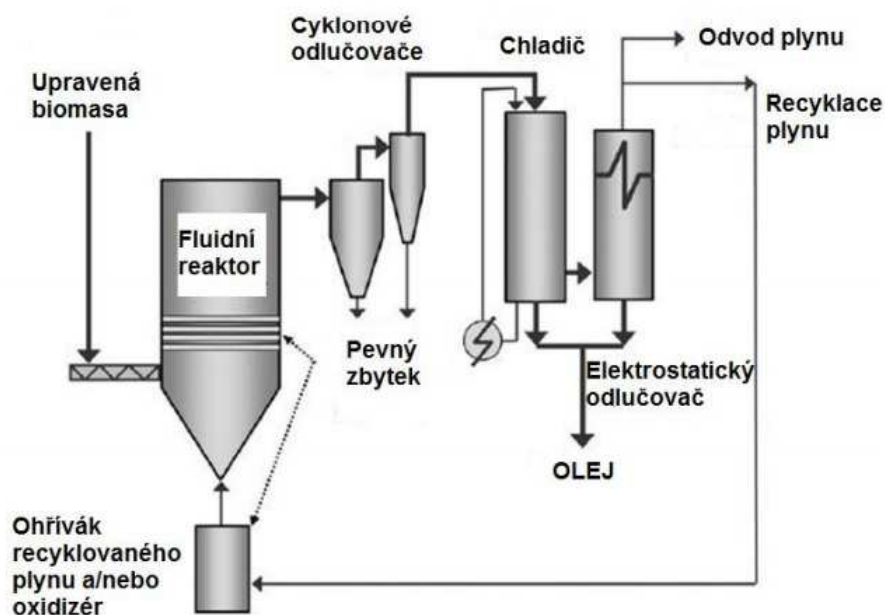
1. Odprašování spalin pomocí elektrostatických odlučovačů nebo venturiho proudových odlučovačů.
2. Absorpci plynných kyselých složek zplodin alkalickými vodnými roztoky hydroxidu sodného a uhličitanu vápenatého.
3. Adsorpci polyhalogenovaných dibenzodioxinů, benzo- a dibenzofuranů na aktivním uhlí nebo aktivním koksu.
4. Katalytickou oxidaci polyhalogenovaných dibenzodioxinů, benzo- a dibenzofuranů peroxidem vodíku.
5. Redukci NO_x – selektivní nekatalytickou (SNCR), selektivní katalytickou (SCR).

6.4 Druhy pyrolýzních postupů

Pyrolýza se stacionární fluidní vrstvou (Bubbling Fluid Bed - BFB)

Jedná se o provozem velmi dobře osvědčenou technologii s jednoduchou konstrukcí a provozem. Teplota uvnitř reaktoru se velmi dobře reguluje a během procesu dochází k výraznému přenosu tepla do částic zpracovávaného materiálu. Velikost částic materiálu by měla být přibližně stejná, ideální velikost je 2 – 3 mm.

Fluidní pyrolýza má vysoký výtěžek kapalné frakce 70 – 75 % hm zpracovaného materiálu. [1] Schéma reaktoru je na obrázku č. 1.

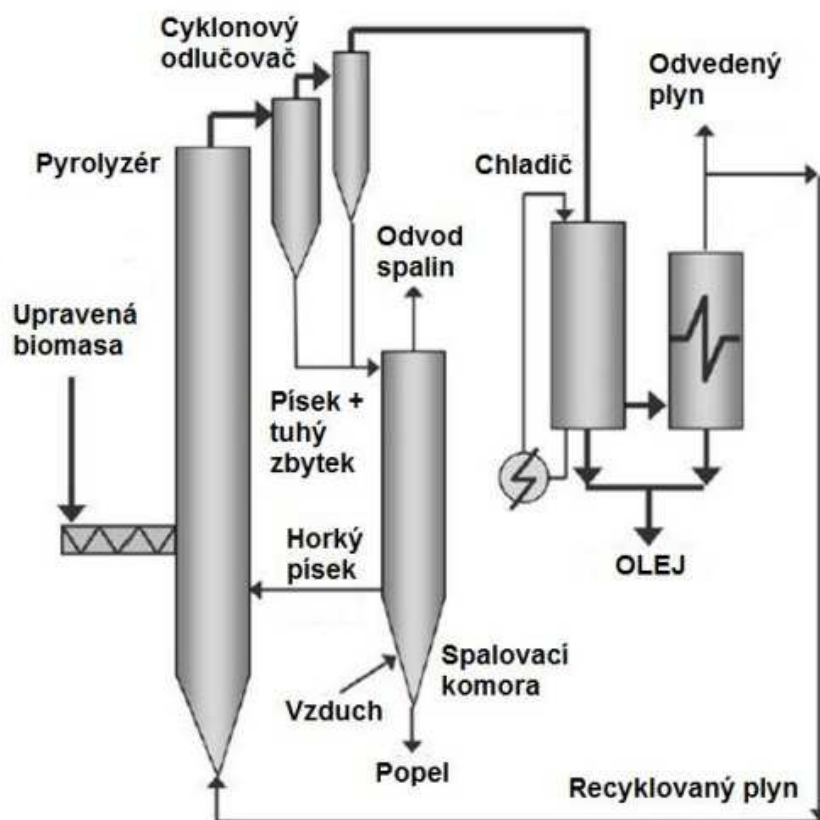


Obrázek 1: Schéma reaktoru se stacionární fluidní vrstvou [1]

Pyrolýza s cirkulující fluidní vrstvou (Circulating Fluidized Bed – CFB)

Základ této pyrolýzy je stejný jako u pyrolýzy se stacionární fluidní vrstvou. Hlavním rozdílem je, že materiál, ze kterého je lože složeno, je ve spalovací komoře pročištěn a předehřátý navrácen zpět do reaktoru. Také je zde doba zdržení pevného zbytku téměř stejná jako doba zdržení par a plynů. Takle technologie je vhodná pro vyšší průtoky. Nedostatkem této technologie je že díky rychlosti plynů uvnitř reaktoru dochází k narušování struktury pevného zbytku, a díky této skutečnosti je vyšší obsah pevného

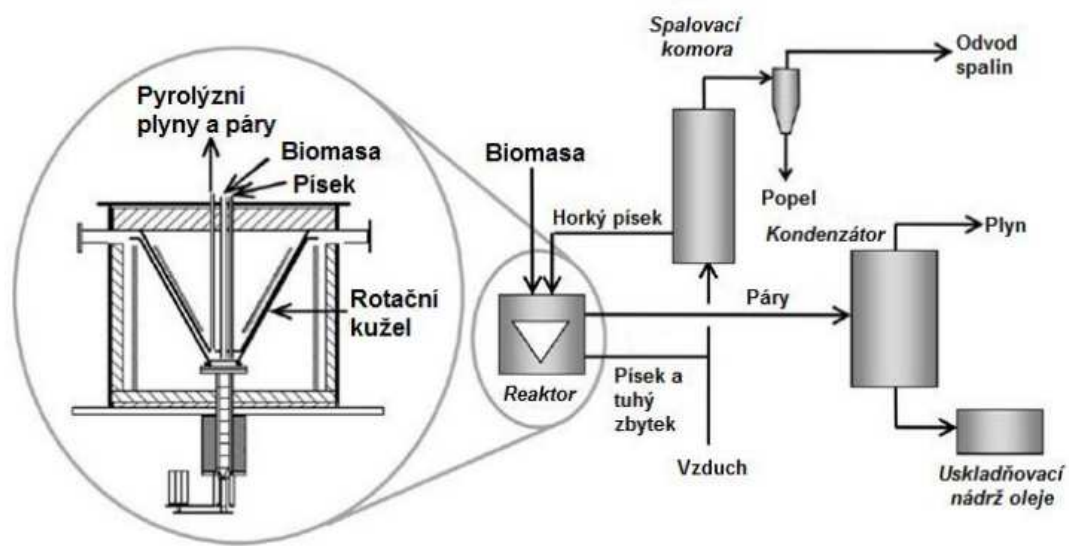
podílu v pyrolýzním oleji. Proto je vhodné mít zakomponované v pyrolýzní lince dočišťování pyrolýzního oleje. [1] Schéma reaktoru je na obrázku č. 2.



Obrázek 2: Technologie reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou [1]

Pyrolýza v rotačním kuželovém reaktoru (Rotating Cone)

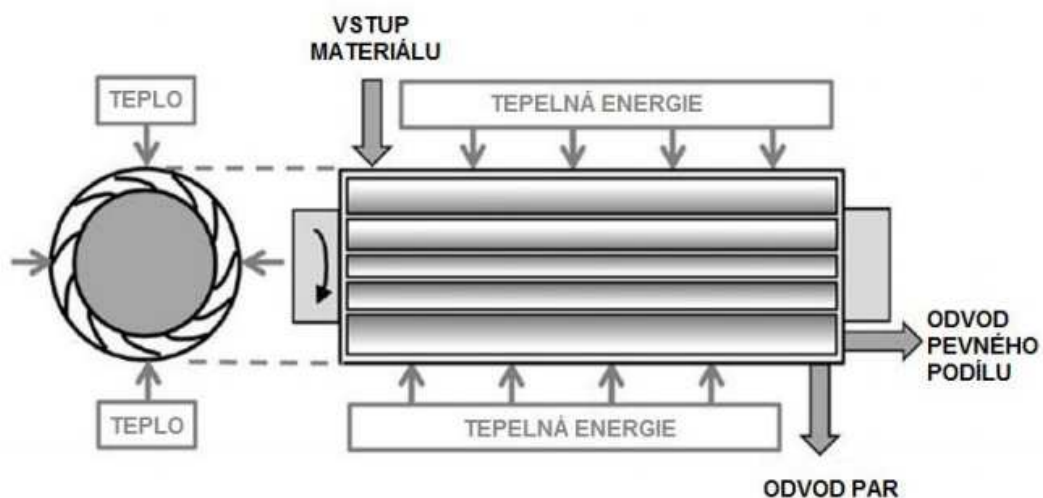
Jedná se o novější, ale ne moc rozšířenou technologii vynalezenou na univerzitě v Twente v Holandsku. Pyrolýza probíhá v rotačním kuželovém reaktoru podobném trychtýři, kde je zpracovávaný materiál smíchaný s přehřátým pískem. Princip funkce je podobný jako u CFB pyrolýzy, s tím rozdílem že zde je transport materiálu prováděn pomocí odstředivých sil, které na materiál působí při rotaci reaktoru. Pevný zbytek po zpracování klesá společně s pískem do fluidního lože, které se nachází pod reaktorem a je následně spálen v zařízení s fluidním ložem, které navazuje jako další stupeň pyrolýzní linky. Horký písek se odtud vrací zpět do reaktoru. Při téhle technologii je vysoký zisk pyrolýzního oleje a to 60 – 70 %. [1,17] Schéma reaktoru je na obrázku č. 3.



Obrázek 3: Schéma rotačního kuželového reaktoru [1]

Ablační pyrolýza (Ablative Pyrolysis)

Ablační pyrolýza funguje na principu odstředivých sil, které působí na materiál a tlačí ho na stěny reaktoru. To v praxi znamená, že čím je vyšší teplota procesu a tlak, který je vyvíjen na materiál pomocí odstředivých sil, tím je proces efektivnější. Dochází k tavení a rozpouštění materiálu. Materiál je ohříván pomocí ohřívané stěny. Hlavními výhodami zařízení je, že materiál může být složen z velkých částic a že zařízení je poměrně malé, a také není třeba využívat inertní plyn. Teplota procesu nepřesahuje 600 °C [1,17] Schéma reaktoru je na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Schéma ablačního reaktoru [1]

Hydrotermální pyrolýza (Hydrothermal Carbonization - HTC)

Hydrotermální pyrolýza byla objevena zhruba v roce 1910. Funguje v závislosti na zpracovávaném druhu odpadu v slabě kyselém prostředí nebo i zásaditém prostředí s různými druhy katalyzátorů za zvýšeného tlaku v rozmezí 2 – 10 MPa a při teplotách v rozmezí 180 – 350 °C, kvůli potřebě zvýšeného tlaku pracuje pyrolýzní komora na principu autoklávu.

Je vhodná především pro odpad organického původu, který obsahuje vysoké množství vlhkosti, mezi takové materiály patří hlavně kal z čistíren odpadních vod nebo odpadní biomasa. Při zpracování pomocí HTC se dá získat pomocí řízení procesu popřípadě jeho přerušováním mnoho výstupů, jako je například humus nebo pyrolýzní olej. Hlavním produktem je ovšem palivo, které se svými vlastnostmi blíží vlastnostem hnědého uhlí. [23,29]

Vakuová pyrolýza (Flash Vacuum Pyrolysis - FVP)

Vakuová pyrolýza byla vyvinuta v Kanadě. Za sníženého tlaku, nepřístupu kyslíku probíhá tepelná depolymerizace uhlíkatých materiálů za vzniku pyrolýzního oleje a sazí, které jsou majoritní složkou výstupní suroviny. Pyrolýzní plyn, který vzniká, se může dočistit a použít jako palivo pro pyrolýzní proces, nebo může být veden na kogenerační jednotku a tak použitý pro výrobu elektrické a tepelné energie.

Je vhodná ke zpracování pneumatik, jelikož při rozkladu pneumatik vzniká vysoké množství kvalitních a téměř čistých sazí, jejich složení je uvedené v tabulce č. 7. [23,30]

Tabulka č.8: Vlastnosti sazí vzniklých při vakuové pyrolýze pneumatik [30]

Vlastnosti	Zastoupení [%]
Čistý uhlík	88 – 85
těkavé látky	1,70
vlhkost	1,50
Síra	1,50 – 2

Plazmová pyrolýza (Plasma Pyrolysis)

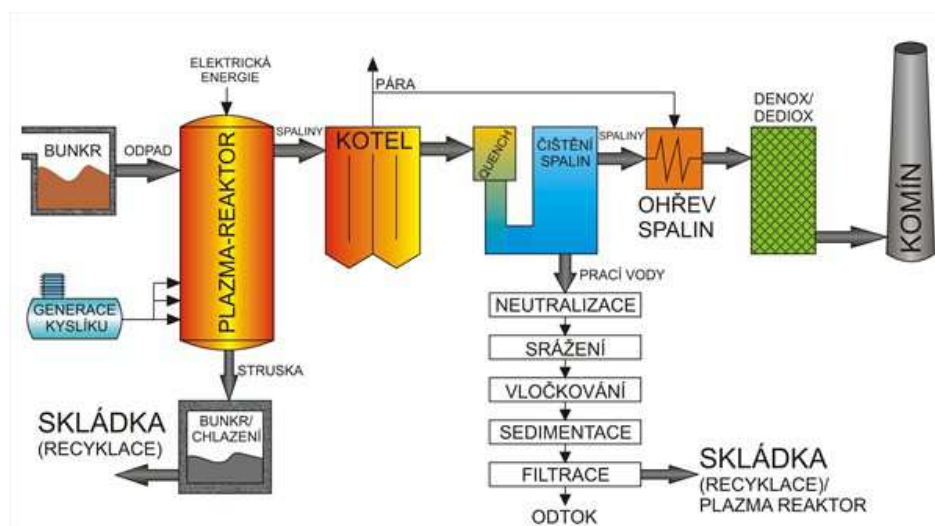
Jedná se o novou technologii v oblasti zpracování odpadů. Technologie plazmového hořáku pracuje na principu elektrického oblouku. Odpad je zahříván přímo obloukem, není tedy zahříván nepřímo, jak tomu bylo u ostatních druhů pyrolýzy. Díky regulaci proudu a napětí, je dobře ovladatelná teplota procesu. Dosahované teploty jsou

v rozmezí 4000 – 5000 °C, ale maximální dosažitelná teplota je až 20 000 °C. Takhle vysoké teploty rozkládají všechny silné chemické vazby a díky tomu dochází k úplnému rozkladu materiálu. Výkon instalovaného hořáku se může pohybovat kolem 1 500 kW a díky tomuhle faktu, je tahle technologie vysoce energeticky náročná, díky množství přivedené elektrické energie, která je vzhledem k výtěžkům z materiálu značně vysoká. Ale díky dosahovaným teplotám, lze bezpečně zneškodňovat jakékoliv nebezpečné odpady bez rizika, že by došlo k poškození životního prostředí. Zpracovaný odpad se rozkládá na nejjednodušší plyny jako je H₂ a lehké uhlovodíky viz tabulka č. 9. Další vzniklé produkty jsou struska a saze.

Struska vzniká především z anorganické složky odpadu, a ještě v tekutém stavu při teplotě přes 1 500 °C se z reaktoru vypouští a nechá se ztuhnout. Ztuhlá struska se ztuhnutím vytrifikuje, protože získá skelnou strukturu. Takhle upravená struska je vhodná k dalšímu využití, nebo k uložení na skládku.

Vzniklý pyrolýzní plyn, který vzniká, může být spalován v oxidační části reaktoru. Takhle vzniklý plyn, který má teplotu kolem 1 000 °C, je využit v kotli k výrobě horké páry a elektrické energie.

Vzniklé spaliny jsou několikanásobně pročištěny a vypuštěny prostřednictvím komína do ovzduší. Výstupní emisní hodnoty dosahují zlomku zákonných emisních limitů. [23,27,28,30,32]



Obrázek 5: Blokové schéma zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů [28]

(zdroj: www.odpadjeenergie.cz/mbu-a-jine/pyrolyza-a-plazma/plazma-technologie)

Při výzkumu na Teheránské univerzitě Shahida Beheshtiho zaměřeném na produkci H_2 při plazmové pyrolýze vybraných druhů plastů PVC, PE, PP a ABS, bylo zjištěno na základě analýzy vzniklého pyrolýzního plynu, že se vzrůstající teplotou procesu se zvyšovali výnosy H_2 , a že se snižovaly zisky plyných uhlovodíků jako CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 nebo Iso- C_4H_{10} . Nejvyšší zisky H_2 byly dosaženy při zpracování ABS a PVC u kterých byly na úkor vysokých zisků H_2 nízké výnosy plyných uhlovodíků. Nejnižší zisky H_2 byly při zpracování PP a PE, u kterých byly zastoupeny ve velkém množství plyné uhlovodíky i při nejvyšší teplotě zpracování viz tabulka č. 9. [32]

Tabulka č. 9: Plyné produkty plasmové pyrolýzy plastů [32]

Materiál	Teplota [°C]	Koncentrace [%]				
		H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	Iso- C_4H_{10}
PVC	10 747,85	64,10	14,70	1,80	7,70	10,00
	12 286,85	71,30	12,10	0,60	6,40	8,80
	14 854,85	71,50	10,90	0,40	6,20	10,10
	16 068,85	74,30	9,10	0,30	5,10	0,00
PE	10 747,85	53,50	9,30	0,50	12,60	15,20
	12 286,85	54,80	8,90	1,20	18,10	14,50
	14 854,85	62,10	7,20	0,40	12,50	0,10
	16 068,85	67,40	7,00	0,50	10,80	13,00
PP	10 747,85	51,20	13,80	0,90	10,20	0,10
	12 286,85	53,80	12,70	0,10	9,70	0,00
	14 854,85	56,50	12,60	0,90	9,90	0,00
	16 068,85	62,80	12,30	0,90	7,90	0,10
ABS	10 747,85	75,20	5,40	0,00	4,60	14,60
	12 286,85	75,30	6,20	0,30	5,00	12,70
	14 854,85	76,40	6,90	0,00	5,50	10,90
	16 068,85	79,40	5,10	0,00	3,00	0,20

V tabulce č. 10 je uvedeno srovnání složení pyrolýzního plynu při použití vakuové a plazmové pyrolýzy.

Tabulka č. 10: Zastoupení složek plynu u vakuové a plazmové pyrolýzy [23]

Složka	Zastoupení	
	Vakuová pyrolýza (pneumatiky) [%]	Plazmová pyrolýza (nebezpečné odpady)
H ₂	19,87	ano
CO	3,27	ano
CH ₄	35,70	ne
CO ₂	5,24	ne
C _m H _m	31,16	ne
O ₂	0,71	ano
N ₂	2,20	ano
H ₂ S	1,90	ne

Mikrovlňná pyrolýza (Microwave Pyrolysis)

Mikrovlňná pyrolýza je již známá delší dobu, nicméně v její oblasti probíhá zatím ještě základní výzkum a vývoj technologií, které by bylo možné uvést do průmyslového provozu. Cílem mikrovlňné pyrolýzy je poskytnutí kvalitnějších produktů v kratším časovém intervalu, než je tomu u konvenčních a již fungujících postupů.

Tenhle druh pyrolýzy je odlišný od ostatních druhů pyrolýzy, tím že zde dochází k ohřevu materiálu vlivem působení mikrovln směrem zevnitř napovrch. U ostatních druhů pyrolýzy dochází k ohřevu směrem dovnitř, jelikož je zde zdrojem tepelné energie externí zdroj například horký plyn.

Tuhle metodu ovšem není možné použít pro všechny materiály, třeba plasty vzhledem k jejich dielektrické konstantě není možné pomocí mikrovlňné pyrolýzy zpracovat. Do budoucna se jedná o zajímavý a pravděpodobně málo energeticky náročný způsob pyrolýzního zpracování materiálu, jelikož množství energie, které je třeba přivést do materiálu je menší než energie získaná. [1,27,26]

6.5 Současná zařízení v provozu

Česká republika:

Pyromatic, VŠB TU Ostrava – poloprovozní výzkumné zařízení, pyrolýza biomasy, plastů a pneumatik

FÉNIX recyklace, s.r.o., Beroun – pyrolýza pneumatik [31]

Hutní projekt Frýdek-Místek, a.s. – pyrolýza pneumatik [31]

Rumpold s.r.o. – pyrolýza plastů a pneumatik

Nemocnice Rudolfa a Stefanie Benešov a.s. – pyrolýza plastů a pneumatik

Zahraničí:

Mitsubishi, Tokio, Japonsko – pyrolýza směsných plastů [11]

Waterloo University, Kanada – pyrolýza plastů [11]

Universita Hamburg, Ebenhausen Ingolstadt SRN – pyrolýza plastů [11]

BASF, Ludwigshafen am Rhein, SRN – pyrolýza plastových odpadů obsahujících PVC [14]

RGS 90 A/S, Kodaň, Dánsko – pyrolýza plastových odpadů obsahujících PVC [14]

Linde Gasification Process, Linde KCA, SRN – pyrolýza plastů obsahujících PVC [14]

NKT Pyrolysis Process, NKT Research Centre, Dánsko – pyrolýza plastů obsahujících PVC [14]

Conrad Industries Inc., USA – pyrolýza pneumatik a směsných plastů [31]

DAL, Plaidt bei Koblenz, SRN – pyrolýza pneumatik, SKO, kabely [11]

Abf Entwicklungsbetrieb für innovatives Reifenrecycling GmbH, SRN – pyrolýza pneumatik [31]

Kouei industries international – pyrolýza pneumatik [17]

Jiangyin Xinda MachineryCo., Ltd, Čína – pyrolýza pneumatik [17]

Jingcheng, India Xinxiang, Indie – pyrolýza pneumatik [17]

6.6 Neúspěšné projekty

Agmeco LT s.r.o. a Eliav a.s. – Velká Dobrá

Firma ELIAV a.s. provozující zařízení pro ekologickou likvidaci autovraků pronajala část svého areálu firmě Agmeco LT s.r.o., která měla v plánu zde postavit “Laboratorní a demonstrační linku na likvidaci odpadů metodou vakuové pyrolýzy“. Projekt byl zrušen, jelikož se proti záměru postavili občanská sdružení a občané z Velké Dobré a z okolních obcí.

6.7 Navštívené zařízení

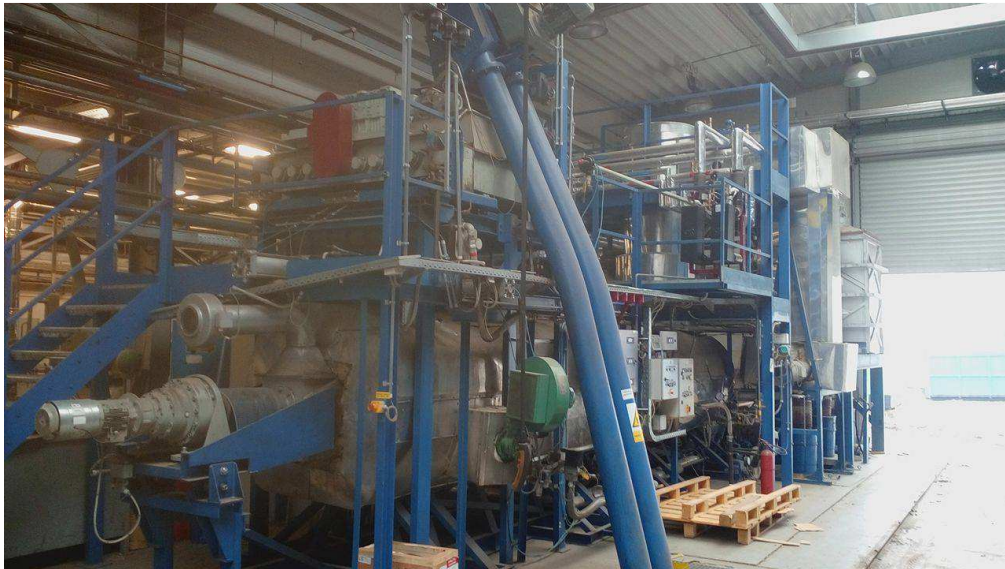
V rámci bakalářské práce byla také provedena návštěva zařízení na pyrolýzní zpracování odpadů na Vysoké škole báňské v Ostravě. Provozují zde poloprovozní výzkumné zařízení Pyromatic viz obrázek č. 6 a 7. Jedná se v pořadí již o třetí zařízení, jelikož původní zařízení prošlo modernizací.

Zařízení má šnekový reaktor a pracuje na principu pomalé pyrolýzy. Je schopné zpracovávat téměř jakýkoliv materiál, který lze pyrolýzou rozložit. Jeho kapacita je 250 kg/h v případě zhomogenizovaného materiálu to znamená, že musí být v podobě štěrky nebo pelet, maximální velikost zrn je v tomhle případě 30 mm². Při nezhomogenizovaném materiálu je kapacita zařízení pouze 100 kg/h. Doba zdržení materiálu je 30 – 45 minut. Reaktor je zde řešen pomocí šnekové válcové pece, ohřívané zemním plynem. Maximální provozní teplota je 750 °C, a je schopné dosáhnout provozní teploty zhruba za 1 hodinu.

Při zpracování plastů lze získat zhruba 5 % pevného zbytku, 50 % pyrolýzního oleje a 45 % pyrolýzního plynu, zde ale záleží na teplotě, při které dochází k pyrolýze. V rozmezí teplot 400 – 500 °C je především produkce oleje. S korozí v zařízení vlivem působení HCl není žádný problém, jelikož zařízení je celé z nerezové oceli. Ale při skladování pyrolýzního oleje, dochází k sedimentaci, a rozdělení oleje na jednotlivé frakce dle hustoty, v tomhle případě vrstva HCl, která se oddělila od ostatních částí pyrolýzního oleje, naleptávala sudy, v nichž byl pyrolýzní olej uskladněn. Jediný problém při provozu byl při zpracování PVC sáčků, které se při transportu do násypné části namotávaly na šnekové dopravníky.

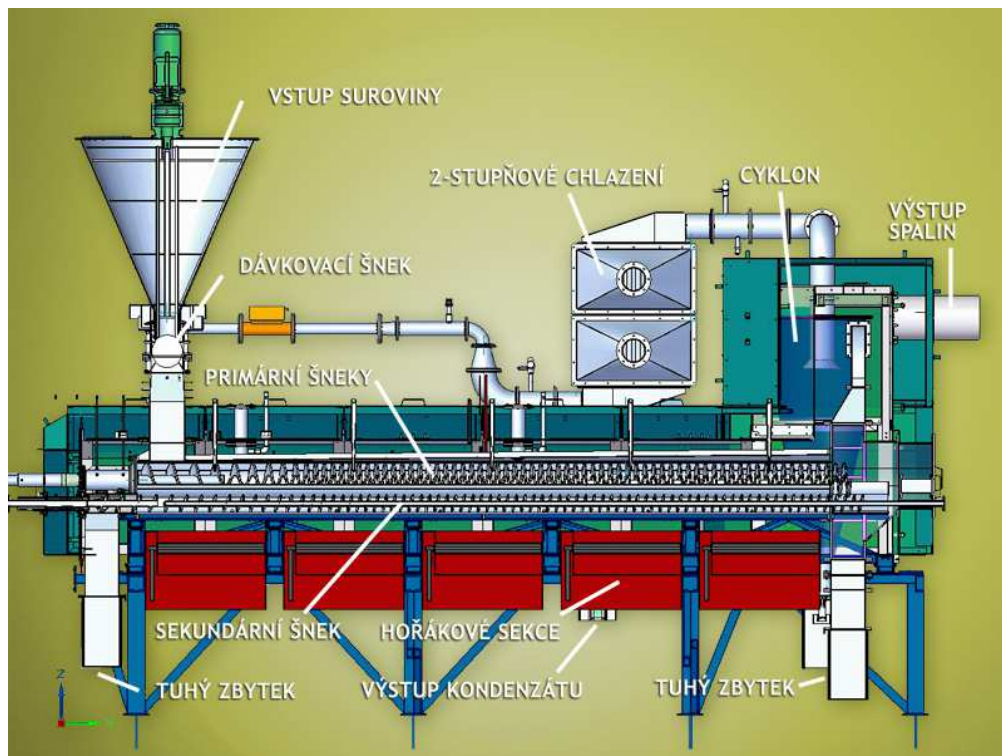
Při zpracování pneumatik lze získat pevný zbytek, pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn v poměru zhruba 1 : 1 : 1. Při jejich zpracování nedochází k žádným problémům, saze se zde zkondenzují v chladiči a stékají v podobě dehtu do sběrných nádob.

Pevný produkt je využit dále ve spalovně odpadů. Pyrolýzní plyn se čistí, stlačuje a spaluje za současné výroby tepelné a elektrické energie. Pyrolýzní olej se prodává odběratelům.



Obrázek 6: Zařízení Pyromatic

(zdroj: vlastní fotografie)



Obrázek 7: Schéma zařízení Pyromatic

(zdroj: <http://www.envicrack.cz/img/pyrolyza02.jpg>)

7 ZÁVĚR

Jelikož odpady jsou součástí života člověka a prakticky neexistuje možnost zabránění jejich vzniku, přičemž do roku 2024 je v plánu úplný zákaz skládkování recyklovatelných a jinak využitelných odpadů, je vhodné umět maximálně využít jejich veškerý surovinový a energetický potenciál.

Pyrolýza je proces, díky kterému jsou odpady využívány k výrobě tepelné a elektrické energie. Kromě toho je tato technologie také zdrojem cenných surovin, u kterých je výroba velmi náročná, jak z finančního, tak z energetického a surovinového hlediska. Pyrolýzou získané materiály jsou následně využitelné např. v petrochemickém, ale i spoustě dalších odvětvích průmyslu. Získané kapalné produkty se dají po rafinaci použít také jako palivo, jelikož se lehké složky kvalitativně blíží naftě nebo také benzinu.

Fosilní paliva, jako jsou ropa a zemní plyn nejsou nekonečnými zdroji energie a dá se očekávat, že jejich zásoby jednou zcela vymizí, nebo minimálně bude jejich získávání mnohem dražší záležitostí než získávání surovin pomocí pyrolýzy. Pyrolýza se tak jeví do budoucnosti např. oproti spalovně, jako vysoce perspektivní postup zpracování odpadních materiálů.

Při pyrolýzním zpracování odpadů nevzniká tolik nebezpečných látek, jako jsou di-oxiny, tak jako je tomu při oxidačním hoření ve spalovně. Taktéž teploty jsou při pyrolytickém zpracování odpadů mnohem nižší, díky tomu že materiál nepřichází do přímého styku s hořáky, ale tepelná energie je do něj předávána přes stěny reaktoru. V neposlední řadě je zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů mnohem menší než spalovna komunálního odpadu a také je finančně mnohem méně náročné na pořízení. V jeho neprospěch ovšem hovoří kapacita zařízení, která je oproti spalovně komunálního odpadu mnohonásobně menší. A také díky tomu, že pyrolýza nemá vlastní definici v legislativě, tak je posuzována jako spalovna odpadů, čímž jsou na ni kladené i stejné nároky, což se negativně odráží např. na občanech, kteří mají následkem nedostatečné osvěty vůči tomuto typu zařízení negativní postoje, o čemž svědčí i neúspěšný projekt pyrolýzního zpracování pneumatik firmy Agmeco LT s.r.o ve Velké Dobré v ČR. Do budoucnosti by tedy bylo vhodné, kdyby se legislativa ve vztahu k pyrolýznímu zpracování odpadů upravila a pyrolýza tak dostala také svoji definici v zákoně a byla tak posuzována mírněji. Také by byla vhodná lepší informovanost občanů ze stran médií, vzdě-

lávacích institucí, nebo také i ze strany státu, který by se měl zasadit o prosazování těchto technologií do popředí zájmu, ve vztahu s nakládáním s odpady.

V současné době většina projektů spojených s pyrolýzou naráží na finanční problémy, kdy např. investice vložené do těchto technologií mnohonásobně převyšují výnosy. Do budoucna by České republice jako vzor v tomto ohledu mohly jít některé zahraniční firmy např. v SRN, Indii, Japonsku nebo USA, které disponují vysoce vyspělými a funkčními technologiemi pyrolýzního zpracování odpadů aplikovanými v průmyslovém měřítku a které jsou schopny zpracovat i několik Mg odpadu za hodinu, zatímco naše technologie se zatím pohybují v řádech několika set kg za hodinu.

8 Seznam použité literatury

Odborné publikace a zákony:

- [1] TRÁVNÍČEK Petr, VITÁZEK Ivan, VÍTĚZ Tomáš, KOTEK Luboš a JUNGA Petr, 2015: *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, ISBN: 978-80-7509-206-9
- [2] BASU Prabir, 2013: *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. Vyd. 2. London: Academic Press, ISBN: 978-0-12-396488-5
- [3] KUDELOVÁ Kamila, 1999: *Odpady*. Olomouc: Univerzita Palackého, ISBN: 80-244-0046-4
- [4] *Zákon 185/2001 sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů*, 2001
- [5] *Vyhláška 93/2016 sb. o katalogu odpadů*, 2016
- [6] RICHTER Miroslav, 2008: *Technologie ochrany životního prostředí. Část III. Technologie zneškodňování odpadů*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, ISBN: 978-80-7414-042-6
- [7] JUCHELKOVÁ Dagmar, 2000: *Likvidace a využití odpadů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, ISBN: 80-7078-747-3
- [8] KURAŠ Mečislav, 2008: *Odpadové hospodářství. Vodní zdroje Ekomonitor*, Chrudim, ISBN: 978-80-86832-34-0
- [9] KURAŠ Mečisla, 2014: *Odpady a jejich zpracování. Vodní zdroje Ekomonitor*, Chrudim, ISBN: 978-80-86832-80-7

Materiály dostupné online:

- [10] DUNDÁLKOVÁ Petra, Využití plastů, recyklace plastů [online]. Brno, dostupné z: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/2062/Knihovna%20k%20projektu/Vyu%BFit%DD%20a%20recyklace%20plast%A8.pdf>
- [11] FITE a.s. a VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA FAKULTA STROJNÍ, 2010: Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů I [online]. Ostrava, dostupné z: http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf

- [12] Český statistický úřad, 2017: Produkce vybraných průmyslových výrobků [online]. oddíl 22. dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&z=T&f=TABULKA&katalog=30835&pvo=PRU07&c=v3~8__RP2015#w=
- [13] Ekoservis – komplexní nakládání s odpady s.r.o., Co se děje se starými plasty? [online]. dostupné z: <http://www.ecoservis.eu/co-se-deje-se-starymi-plasty>
- [14] Odpadové fórum č.9 [online], str. 10-24, 2005, dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/9-2005-pdf.pdf>
- [15] EnwiWeb, 2013: Pyrolýza odpadů – moderní způsob jejich zneškodnění [online]. dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/archiv/94618/>
- [16] ZČU – Fakulta strojní, Plasty [online]. dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/plasty.pdf>
- [17] MENDELU – Agronomická fakulta, Pyrolýzní zpracování biomasy a jiných materiálů [online]. Brno. dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/211/17221.pdf
- [18] LEDNICKÁ Táňa, 2016: Druhy odpadních plastů z hlediska následného využití [online]. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně – Agronomická fakulta, dostupné z: http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=14574;download_prace=1
- [19] PROKEŠ Karel, 2011: Vakuová pyrolýza a její realizace v ČR [online]. Kouty nad Desnou: Konference OZE 2011, dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vakuova-pyrolyza-a-jeji-realizace-v-cr>
- [20] SAIDL Jan. Konstrukce pneumatiky [online]. Autolexicon.net. dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/>
- [21] Miroslav Novák – konstrukční kancelář. Technologie výroby technické pryže [online], dostupné z: <http://www.mn-kk.freepage.cz/nova-stranka-155756/>
- [22] JÍLKOVÁ Lenka, CIAHOTNÝ Karel, ČERNÝ Radek, 2012: Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů [online]. Paliva 4, dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=76>
- [23] BARTUSEK Stanislav a kol., 2015: Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách u stacionárních zdrojů nespádajících pod BREF [online]. Ministerstvo životního prostředí, dostupné z:

[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/\\$FILE/000-Pyrolyza_vyroba_bioplynu-20160222.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/$FILE/000-Pyrolyza_vyroba_bioplynu-20160222.pdf)

[24] KUPILÍK Václav, 2016: Vliv struktury na vlastnosti a zpracovatelnost plastů [online]. ČVUT v Praze – Fakulta stavební, Praha, dostupné z:
http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/4/4-2_Vliv_struktury_plastu.pdf

[25] PROCHÁSKA František, STAŠ Martin, KAPASNÝ Ondřej, 2012: Mžiková mikropyrolýza plastů [online]. Paliva 4, dostupné z:
<http://paliva.vscht.cz/download.php?id=71>

[26] BENEROSO D., MONTI T., KOSTAS E.T., ROBINSON J., 2017: Microwave pyrolysis of biomass for bio-oil production: Scalable processing concepts [online]. Nottingham: The university of Nottingham – Faculty of Engineering, dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717301250>

[27] ANDĚL Matouš, 2016: Pyrolytické zpracování odpadů [online]. ČVUT v Praze – Fakulta strojní, Praha, dostupné z:
[https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66530/F2-BP-2016-Andel-Matous-Matous%20Andel_Bakalarska%20prace\(2016\)-Pyrolyticke%20zpracovani%20odpadu.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66530/F2-BP-2016-Andel-Matous-Matous%20Andel_Bakalarska%20prace(2016)-Pyrolyticke%20zpracovani%20odpadu.pdf?sequence=-1)

[28] Odpad je energie. Plazma – Technologie [online], dostupné z:
<http://www.odpadjeenergie.cz/mbu-a-jine/pyrolyza-a-plazma/plazma-technologie>

[29] ZHAI Yunbo, PENG Chuan, XU Bibo, TENGFEI Wang, LI Caiting, ZENG Guangming, ZHU Yun, 2016: Hydrothermal carbonisation of sewage sludge for char production with different waste biomass: Effects of reaction temperature and energy recycling [online]. Changsha: Hunan University, dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421730508X>

[30] ŠEJVL Radovan, 2009: Energetické zplyňování a jeho cesta k vyšší účinnosti a energetickému využití odpadů [online], dostupné z:
<http://www.energis24.cz/300/technick%C3%A9-syst%C3%A9my-pro-evo>

[31] Odpadové fórum č.1 [online], str. 10 - 19, 2004, dostupné z:
<http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/1-2004-pdf.pdf>

[32] MOHSENIAN Sina, ESMAILI Mahdieh Sadat, FATHI Jafar, SHOKRI Babak, 2015: Hydrogen and carbon black nano-spheres production via thermal plasma pyrolysis of polymers [online]. Tehran: Shahid Beheshti University - Laser-Plasma Research Institute, dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915313252>

9 Seznam fotografií a obrázků

Obrázek 1: Schéma reaktoru se stacionární fluidní vrstvou [1]

Obrázek 2: Technologie reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou [1]

Obrázek 3: Schéma rotačního kuželového reaktoru [1]

Obrázek 4: Schéma ablačního reaktoru [1]

Obrázek 5: Blokové schéma zařízení pro pyrolýzní zpracování odpadů [28]

Obrázek 6: Zařízení Pyromatic

Obrázek 7: Schéma zařízení Pyromatic

10 Seznam grafů a tabulek

Tabulka č. 1: Srovnání parametrů – podmínek a produktů při pyrolýze a spalování [6]

Tabulka č. 2: Chemické reakce v průběhu pyrolytického procesu v závislosti na teplotě [11]

Tabulka č. 3: Zastoupení plastů v SKO [10]

Tabulka č. 4: Porovnání produktů pyrolýzy a spalování plastů [24]

Tabulka č. 5: Vybrané chemicko-fyzikální vlastnosti pevného zbytku [1]

Tabulka č. 6: Chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolýzního oleje [1]

Tabulka č. 7: Vybrané chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolýzního plynu [1]

Tabulka č. 8: Vlastnosti sazí vzniklých při vakuové pyrolýze pneumatik [30]

Tabulka č. 9: Plynné produkty plasmové pyrolýzy plastů [32]

Tabulka č.10: Zastoupení složek plynu u vakuové a plazmové pyrolýzy [23]

11 Seznam zkratk

TZL	–	Tuhé znečišťující látky
HTC	–	Hydrothermal carbonization
PP	–	Polypropylen
PE	–	Polyethylen
PET	–	Polyethylenglykoltereftalát
PVC	–	Polyvinylchlorid
ABS	–	Akrylonitrilbutadienstyren
PS	–	Polystyren
SKO	–	Směsný komunální odpad
SRN	–	Spolková Republika Německo
FVP	–	Flash Vacuum Pyrolysis
BFB	–	Bubbling Fluid Bed
CFB	–	Circulating Fluidized Bed
CENIA	–	Česká informační agentura životního prostředí
ISOH	–	Integrovaný systém ohlašovacích povinností
ČIŽP	–	Česká inspekce životního prostředí