

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

PYROLÝZA V PRAXI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Praha 2018

JAN MEDEK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Medek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459585**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Pyrolýza v praxi

Název bakalářské práce anglicky:

Pyrolysis in practice

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s možnostmi zpracování odpadů pomocí pyrolýzy.
- 2) Zpracujte rešerši technologického a konstrukčního uspořádání pyrolyzních jednotek provozovaných v laboratořích a v průmyslové sféře.
- 3) Formulujte vizi možného směřování pyrolytického zpracování odpadů z pohledu bakaláře strojího inženýrství.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jírouť, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27-04-2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a veškeré k tomu využitě podklady a literaturu uvádím v příloženém seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Jméno a Příjmení

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za jeho konstruktivní připomínky, cenné rady a trpělivost v čase stráveném vedením mé práce.

Anotační list

Jméno autora: Jan

Příjmení autora: Medek

Název práce česky: Pyrolýza v praxi

Název práce anglicky: Pyrolysis in practice

Rozsah práce: počet stran: 64
počet obrázků: 26
počet tabulek: 11
počet příloh: 0

Akademický rok: 2017 / 2018

Jazyk práce: čeština

Ústav: Ú 12 118 - Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: B2342 - Teoretický základ strojního inženýrství

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

Oponent:

Konzultant práce:

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

Abstrakt

Hlavním cílem této rešeršní bakalářské práce je shromáždit a stručně informovat o pyrolýzní technologii, o možnostech jejího využití v oblasti materiálově – energetického zpracování odpadů a provést rozbor technologického a konstrukčního uspořádání významných pyrolýzních jednotek.

Úvod je přehledným shrnutím statistik produkce a složení odpadu v České Republice, které zároveň pojednává o výhodách a nevýhodách nyní využívaných technologií zpracování odpadních materiálů. Druhá kapitola stručně vysvětluje základní princip pyrolýzy a charakterizuje výstupní reakční produkty v závislosti na vstupním materiálu a nastavených provozních podmínkách. V třetí části se nachází základní rozdělení a porování pyrolýzních reaktorů dle jejich konstrukčních prvků. Následující dvě kapitoly obsahují výčet konstrukčního uspořádání a provozních parametrů významných pyrolýzních jednotek v laboratorních podmínkách i průmyslovém měřítku v České Republice a ve světě.

Klíčová slova: pyrolýza, pyrolýzní jednotka, odpad, komunální odpad

Abstract

The main goal of this research bachelor's thesis is to gather the knowledge and briefly inform about pyrolysis technology, the possibilities of its use in waste – to - energy waste processing and to carry out an analysis of the technological and structural arrangement of some significant pyrolysis units.

The introduction is a summary of statistics on waste production and composition in the Czech Republic and also deals with advantages and disadvantages of waste processing technologies currently in use. The second chapter briefly explains the main principle of pyrolysis and characterises its outputs depending on the inputs and the setting of operating parameters. The third part describes types of pyrolysis reactors and their comparison according to their structural features. Following two chapters contain a list of structural arrangement and operation parameters of some significant pyrolysis units in laboratory conditions as well as on an industrial scale in the Czech Republic and in the world.

Key words: pyrolysis, pyrolysis unit, waste, municipal waste

Obsah

1	Úvod	10
2	Pyrolýza	12
2.1	Produkty pyrolýzy	13
2.1.1	Plynné produkty	13
2.1.2	Kapalné produkty	14
2.1.3	Pevné produkty	15
2.2	Princip a průběh pyrolýzy	15
2.2.1	Vliv tlaku a teploty na průběh reakce	15
2.2.2	Vliv času zdržení vsázky v reakčním prostoru	16
2.3	Vhodné materiály pro zpracování pyrolýzními technologiemi	17
2.3.1	Pyrolýza komunálního odpadu	17
3	Pyrolýzní jednotky	21
3.1	Rozdělení jednotek podle typu pyrolýzního reaktoru	21
3.1.1	Reaktory s pevným ložem	21
3.1.2	Reaktory s fluidním ložem	22
3.1.3	Reaktory trubkové	23
3.1.4	Reaktory s rotující pecí	23
3.1.5	Rotační kuželový reaktor	24
3.1.6	Ablační reaktor	25
3.2	Speciální pyrolýzní procesy	26
3.2.1	Vakuová pyrolýza	26
3.2.2	Mikrovlákná pyrolýza	26
3.2.3	Hydropyrolýza	26
3.3	Přehled výhod a nevýhod základních konstrukčních typů reaktorů	27
4	Přehled významných jednotek provozovaných v laboratořích	28
4.1	Na území České republiky	28
4.1.1	Pyrolýzní jednotka Pyrotronic	28
4.1.2	Pyrolýzní jednotka Pyromatic 50	28
4.1.3	Pyrolýzní jednotka Pyromatic 250	31
4.1.4	Technologie mnohakanturové cirkulační pyrolýzy Pyrolun	31
4.1.5	Kontejnerové linky PolyComp	33

4.2	Významné pyrolýzní jednotky v laboratořích ve světě.....	34
4.2.1	Proces KWU	34
4.2.2	Proces Thermostelect	35
4.2.3	Proces Destrugas von Kroyer	36
4.2.4	Proces PAK.....	36
4.2.5	Proces DAL.....	37
4.2.6	Prototyp domácí pyrolýzní jednotky.....	37
5	Pyrolýzní jednotky aplikované v průmyslovém měřítku.....	40
5.1	Na území České Republiky	40
5.1.1	Vakuová pyrolýza společnosti Agmecco LT.....	40
5.1.2	Tarpo spol. s.r.o.	41
5.1.3	Technologie Ervo EnviTech	43
5.1.4	Eviko s.r.o.	45
5.1.5	Hoks Industry a.s.	46
5.2	Významné pyrolýzní jednotky aplikované v průmyslu ve světě	47
5.2.1	Proces Ebara	47
5.2.2	Proces Schwel – Brenn – Verfahren	48
5.2.3	Technologie Babcock	49
5.2.4	Technologie Hamm.....	50
5.2.5	Proces NOELL.....	51
5.2.6	Kobe - Steel	51
5.2.7	Technologie Char Oil Energy Development	52
5.2.8	Technologie RCP.....	52
6	Vlastní postřehy a vize autora	53
7	Závěr.....	59
	Seznam použité literatury	61

1 Úvod

Moderní civilizace produkuje každým dnem obrovské množství odpadů. V roce 2016 se například jen v České republice vyprodukovalo necelých 26 milionů tun odpadu. Nejvýznamnější složku, a to téměř polovinu tohoto množství, tvoří odpad ze stavebnictví a demolicí, například sutina a odpadní zemina. Dále je nejvíce zastoupený odpad ze zpracovatelského průmyslu, komunální odpad a odpad z činností souvisejících s odpadními vodami a sanacemi. [1]

Pokud se zaměříme na komunální odpad, jehož složení je nám ze všech výše uvedených nejbližší známé, lze ve statistice dohledat, že se ho během roku 2016 na území českých obcí vyprodukovalo 3,6 milionů tun. Do komunálního odpadu zahrnujeme odpad, který pochází z činnosti fyzických osob a dále i odpady vyprodukované subjekty zapojenými do obecního systému sběru odpadů, jako například školy, úřady a drobní živnostníci, včetně odděleně sbíraného obalového odpadu. V přepočtu na jednoho obyvatele je produkce komunálního odpadu zhruba 339 kg ročně a tato čísla za posledních pět let výrazně rostla. [1]

Většinu celku tvoří běžný svoz, známý jako směsný odpad, tedy obsah popelnic, kontejnerů a svozových pytlů. Deset procent celkové hmotnosti zaujímá odpad objemný, jako je například použitý domácí nábytek, koberce apod. Do 16 % celku spadá ostatní komunální odpad, kam patří odpadní zemina, kameny a jiný biologicky nerozložitelný odpad. Pouhá 2 % hmotnostního celku tvoří odpady z komunálních služeb, tedy čištění ulic a obsah odpadkových košů. Tříděný odpad složený z papíru, skla, plastů, kovů a jiných oddělených složek zaujímá 14 % hmotnosti a jeho přibližně tři čtvrtiny jsou po úpravě vhodné k recyklaci. [1]

S tak velkým množstvím vyprodukovaného odpadu je třeba se nějakým způsobem vypořádat a jelikož je z dostupných statistik zřejmé, že odpadu každým rokem přibývá, stojí za to popřemýšlet nad tím, jak budeme s odpady v následujících letech nakládat.

V České republice se v roce 2016 polovina vyprodukovaného množství komunálního odpadu skládkovala. V tomto případě jde o směsný komunální odpad, který již nelze dále třídít a z většiny je biologicky rozložitelný. Recyklováno bylo 27 % celku, 16 % bylo spáleno a 7 % kompostováno. Z dostupných statistik vyplývá, že i přes přibývající množství vyprodukovaného odpadu ročně se daří snižovat množství odkázané ke skládkování

či spalování a více ho recyklovat a kompostovat. Komunální odpad, který je skládkovaný a spalovaný, tedy tvoří stále celkem dvě třetiny veškeré jeho produkce. [1]

V poslední době roste snaha o největší možné materiálově - energetické využití odpadu. Příkladem je pražská spalovna Zevo Malešice, která se na tuto činnost specializuje. Ročně zde zpracováním 213 387 tun odpadu vznikne 49 632 tun škváry, 4 970 tun popílku a 3 111 tun želeného šrotu. Při konvenčním spalování se komunální odpad redukuje na popel, který má 25 % hmotnosti a 10 % objemu původního materiálu. Spálením takového množství odpadu odejde do ovzduší 1 037 897 043 m³ emisí a vytvoříme tepelnou energii 1 200 TJ, která by vyhřála 25 000 domácností. Vyprodukovaný popílek končí na skládkách, škváru lze využít jako druhotný stavební materiál a železný šrot je možné recyklovat. Ideální tedy je, aby byly splněny minimálně dva cíle. Jednak se zbavíme objemově velkého a hmotného materiálu a zároveň při jeho zpracování zajistíme vznik energie, látek energeticky bohatých či znovu využitelných. Tímto lze do budoucna efektivně vyřešit problém se stále rostoucí spotřebou energie a poptávkou po palivech, která jsou dnes vyráběna převážně z neobnovitelných zdrojů jako je uhlí či ropa. [2]

Jeden z více ekologických a potenciálně výhodných způsobů materiálově energetického zpracování odpadu nabízí pyrolytická technologie. Díky inertnímu reakčnímu prostředí a možnosti promývání výstupních plynů dochází při pyrolýze k výrazně menší produkci oxidů dusíku a síry než při běžném nízkoteplotním spalování komunálního odpadu. Vlivem termického rozkladu materiálu zajistíme přeměnu v dále využitelné suroviny. A aby mohl proces rozkladu efektivně probíhat, musí být jeho prostředí konstrukčně uzpůsobeno materiálu, který v něm bude zpracováván. Srdcem takového prostředí je pyrolýzní jednotka, reaktor, ve kterém samotná reakce probíhá. Cílem této bakalářské práce je stručně charakterizovat pyrolýzní technologií, pro ní vhodné vstupní materiály a její produkty, přehledně shromáždit informace o funkčních pyrolýzních jednotkách provozovaných v laboratorních podmínkách a průmyslu v Čechách i ve světě, provést technický rozbor konstrukčního uspořádání klíčových strojů a zařízení, zaměřit se na výhody a nevýhody jednotlivých konstrukcí, porovnat výkonnost jednotek a vyvodit ze zjištěných faktů závěry, kam směřuje technologie pyrolýzy z hlediska zpracování odpadů a praktického využití. [3]

2 Pyrolýza

Termín pyrolýza vznikl spojením řeckých slov pyr = oheň a lysis = rozpustit. Jde o fyzikálně - chemický děj řadící se do skupiny termických procesů, charakteristických působením teplem na materiál s cílem překročit mez jeho chemické stability a rozložit jej na jednotlivé frakce. Zmíněné procesy lze rozdělit dle chemické povahy probíhajících dějů na oxidativní a reduktivní. V průběhu oxidativních procesů dochází k chemickým reakcím za přístupu kyslíku nebo jiného oxidačního činidla, zatímco procesy reduktivní probíhají zcela bez přístupu kyslíku, nebo jen s jeho zanedbatelným množstvím. Pyrolýza patří mezi reduktivní procesy a v jejím průběhu dochází k termickému rozkladu materiálů bez přístupu kyslíku na nízkomolekulární látky a tuhý zbytek. [4]

Pyrolýza je známá tisíce let, kdy byla využívána k výrobě dřevěného uhlí. V 19. století sloužila k výrobě olejů a parafínů. K významnému rozvoji došlo ale až v období 2. světové války, kdy byly v Německu za pomoci pyrolýzy získávány pohonné hmoty z uhlí, dokud nebyl výrobní proces nahrazen zpracováním ropy. Jeden ze závodů na výrobu pohonných hmot, konkrétně z hnědého uhlí, se nacházel i na území České republiky v Záluží u Litvínova. [5]

Dnes jsou rozvíjeny nové technologie pyrolýzy za účelem získávání energie z obnovitelných zdrojů se snahou nahradit alespoň část spotřeby fosilních paliv. Termické zpracování biomasy by mohlo být příkladem. Rostlinná biomasa obsahuje vysoký podíl vody a s tím souvisí i vysoké náklady na její dopravu. Realizace decentralizovaného zpracování s navazující centrální úpravou produktů činí celý proces ekonomicky výhodnějším i tím, že sníží náklady na dopravu. Dá se tedy říct, že i jednou z předností pyrolýzní technologie je schopnost zajistit vyšší energetický obsah v jednotkovém objemu produktu než u původního materiálu. Výhodou oproti konvenčnímu spalování odpadu u pyrolýzy je, že za nepřístupu kyslíku nepůsobí v reakci korozní účinky v tak velké míře a tím pádem nevzniká velké množství nebezpečných emisí jako jsou furany a dioxiny. Za výhodu se dá považovat i možnost přizpůsobit pyrolýzní jednotku vlastnostem odpadu. Jedním ze současných problémů této technologie je, že aplikace její na zpracování směsných odpadů není prozatím dostatečně prozkoumaná a nedostalo se jí zatím ani úpravy v Evropské legislativě. Úřady tedy nahlíží na pyrolýzní technologii jako na konvenční spalování a pro vybudování pyrolýzní stanice je třeba splnit požadavky stejné jako pro schválení výstavby spalovny, což rozvoj v tomto směru komplikuje. [5], [6]

2.1 Produkty pyrolýzy

Pyrolýza spolu se spalováním a zplyňováním patří mezi procesy termochemické konverze. Tyto procesy se navzájem výrazně odlišují v obsahu kyslíku v reakčním prostoru. Na rozdíl od spalování či zplyňování dochází konkrétně při pyrolýze k rozkladu materiálu bez přístupu oxidačních médií, nebo při jejich velmi omezeném množství. Proces je endotermní, je tedy nutné dodat tepelnou energii, aby reakce proběhla. [7]

Základním principem pyrolýzy je tepelný rozklad, kdy klesá chemická stabilita vysokomolekulárních látek, což vede k jejich štěpení na látky nízkomolekulární. Dochází k uvolnění prchavé hořlaviny z tuhého materiálu. Vznikají zpravidla tři hlavní produkty, a to pyrolýzní plyn, kapalný kondenzát a pevný karbonizační zbytek. Vlastnosti produktů pyrolýzního procesu se odvíjí od jeho průběhu. Velkou roli hraje intenzita a rychlost ohřevu spolu s dobou zdržení vsázky v reakčním prostoru a samotnými provozními parametry prostředí. [4], [7]

2.1.1 Plynné produkty

Plynná fáze vzniká z odpařované vody, par těkavých uhlovodíků a desorbci adsorbovaných látek už při teplotách do 150 °C. V rozsahu teplot 300 – 500 °C z materiálu odchází s největším zastoupením v plynné fázi methan, zbytky vody, CO₂ a dehtové páry. Pyrolýzní plyn je možné využít jako palivo pro vytváření tepla potřebného k průběhu reakce. [8], [9]

V typickém složení pyrolýzního plynu tvoří většinu objemu metan, dále v něm najdeme CO, H₂, CO₂ a N₂. Složky pyrolýzního plynu lze rozdělit na hořlavé, jako jsou CO, H₂, CH₄, inertní, tedy CO₂, N₂, H₂O, a hoření podporující O₂. Ze zastoupení těchto sloučenin v plynu lze zjistit jeho fyzikální a spalovací vlastnosti. [10]

Například pomocí infračerveného spektrometru lze měřit obsah oxidu uhličitého, uhelnatého a metanu. Ke zjištění koncentrace vodíku je možné využít tepelně vodivostní analyzátor. Celkový obsah organického uhlíku lze určit pomocí plamenné ionizační detekce, kdy pomocí vodíkového plamene dochází ke spalování za vzniku elektrického proudu, který je měřen zesilovačem. [10]

Množství obsaženého oxidu uhelnatého a vodíku v plynu je 20 – 50 % objemu, kdy při zvyšující se provozní teplotě obsah vodíku roste. Nejvíce bývají v plynu obsaženy uhlíkaté látky se zastoupením v objemu 17 – 51 %, kde největší podíl má metan. V pyrolýzním plynu z pryže je vyšší obsah látek jako je propan, butan, propylen či pentan.

Často se tedy setkáme s aplikací pyrolýzní technologie na zpracování použitých pneumatik, neboť reakce při termickém rozkladu pryže produkuje energeticky bohaté látky. [10]

Výhřevnost lze považovat za jednu z nejdůležitějších energetických vlastností plynu a je závislá na vstupní surovině a provozních parametrech procesu. U pyrolýzy probíhající při teplotě 600 °C je výhřevnost výstupního plynu z pryže 33,8 MJ/m³, z hnědého uhlí 20,8 MJ/m³ a z biomasy 14,1 MJ/m³. Pyrolýzní plyn z pryže můžeme výhřevností přirovnat k zemnímu plynu. Plyn z pyrolýzy hnědého uhlí označujeme jako velmi výhřevný a plynnou frakci z rozkladu biomasy jako málo výhřevnou. [10]

Při spalování plynu je důležité znát jeho mez zápalnosti, která je závislá na množství vzduchu, kterým je možné plyn pro úspěšné zapálení zředit. Vliv na mez zápalnosti má také obsah inertních složek v objemu plynu. Pyrolýzní plyn má oproti zemnímu plynu větší obsah vodíku a oxidu uhelnatého, z čehož vyplývá, že je možné ho více ředit vzduchem. [10]

Další vlastností plynu je rychlost šíření plamene, která závisí na složení a koncentraci plynu ve směsi se vzduchem. Hořlavé složky rychlost šíření plamene podporují a zvyšují, inertní složky tuto rychlost naopak snižují. Plyn z pyrolýzy má vysokou rychlost spalování, protože obsahuje velké množství vodíku. Nejrychleji se plamen šíří v pyrolýzním plynu z hnědého uhlí. [10]

2.1.2 Kapalně produkty

Kapalná složka, tedy pyrolýzní olej, mnohdy označovaný jako bioolej, je směs látek obsahující lehký a těžký dehet, střední olej, karbonizačního benzín a pyrolýzní vodu. Mezi významné složky patří fenolové sloučeniny, organické kyseliny, furfural a jeho deriváty a další. [8]

Těžký dehet má vysoký obsah popelovin a uhelného prachu, jde tedy o produkt přímo vhodný ke spalování a dodávání tepla samotné pyrolytické reakci, podobně jako pyrolýzní plyn. V lehkém dehtu a středním oleji se vyskytuje zhruba 70 % uhlovodíků a cca 28 % fenolů. V karbonizačním benzínu je až 90 % uhlovodíků. Bioolej lze spalováním využít k získávání tepla a k výrobě elektrické energie. Nelze jej ale pro jeho kyselost, vysokou viskozitu a nestabilitu v surovém stavu využít jako palivo do klasického diesellového motoru, proto je ho třeba nejdříve hydrogenačně a rafinačně upravit a až poté ho lze do běžných paliv přidávat i samostatně využívat. Bioolej může být i zplyňován, případně pomocí Fisher - Tropschovy syntézy přeměňován na metanol, nebo fermentací na etanol. Využití

reakčních produktů jako paliv pro dopravní prostředky je jedním z hlavních cílů dnešních pyrolytických technologií. [11]

2.1.3 Pevné produkty

Pevná složka zvaná polokoks vzniká při zahřívání nad 500 °C, je velmi reaktivní a čerstvě vyrobená má sklony k samovznícení. S rostoucí teplotou nad 600 °C dochází k uvolňování pouze plynných fází se snižujícím se podílem vodíku, ubývá tuhého polokoksu, dochází k jeho přeměně na koks a roste obsah popelovin v pevném produktu. [12], [13]

2.2 Princip a průběh pyrolýzy

2.2.1 Vliv tlaku a teploty na průběh reakce

Se stoupajícím tlakem v reakčním prostoru probíhá štěpení uhlovodíků symetričtěji. Děje se tedy to, že se uhlovodíkové řetězce štěpí od svých okrajů. To má za následek odštěpení vodíku a plynů s krátkými řetězci. [14]

V závislosti na teplotě dosahované v reakčním prostoru můžeme pyrolýzu rozdělit na nízkoteplotní, středněteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotní probíhá v rozsahu teplot do 500 °C, středněteplotní od 500 °C do 800 °C a vysokoteplotní reakce probíhají při teplotách vyšších 800 °C. [14]

Děje probíhající v reaktoru se s teplotou a tlakem výrazně liší. V rozmezí teplot od 100 °C do 200 °C probíhá sušení, fyzikální odštěpení vázané vody, uvolnění dehtových par a těkavých uhlovodíků. Při zvýšení teploty na 250 °C dochází k deoxidaci, desulfuraci a depolymeraci. Při dosažení teploty 340 °C vzniká v největším zastoupení metan a jiné alifatické uhlovodíky. Karbonizační fáze probíhá při teplotě 380 °C a k rozštěpení vazeb uhlík – dusík a uhlík – kyslík dochází dosažením 400 °C. V rozmezí teplot 400 °C až 600 °C se z materiálu vylučují bitumenové složky a vzniká pyrolýzní olej. Kolem teploty 500 °C zároveň vzniká v pevné fázi polokoks. Krakováním při dosažení 600 °C a vyšších teplot vznikají plyny s krátkými uhlíkovými řetězci a aromatické uhlovodíky. S dále rostoucí teplotou se štěpí silnější vazby a dochází už k vylučování pouze plynné fáze se snižujícím se podílem vodíku. Tuhý polokoks se zároveň přeměňuje na koks a roste obsah popelovin v pevném zbytku. [12], [13], [14]

2.2.2 Vliv času zdržení vsázky v reakčním prostoru

Pyrolýzu lze ještě dále dělit dle času zdržení vsázky v reakčním prostoru a dle rychlosti jejího ohřevu na rychlou a pomalou. Tato rozdělení mají zásadní vliv na výsledný podíl složek reakčních produktů. [6]

S rostoucím časem zdržení materiálu v reakčním prostoru klesá výtěžek kapalných produktů z důvodu probíhajících sekundárních reakcí, jako je termické krakování, kondenzace nebo polymerizace, které zajišťují vznik vysokomolekulárních látek. Žádanými produkty jsou většinou právě kapalné fáze, proto je při průběhu procesu snaha nastavit provozní podmínky tak, aby příliš nedocházelo k rozkladu materiálu až na molekuly plynu a dále bylo zabráněno zmíněným druhotným reakcím. [15], [16], [17]

Pro dosažení maximálního zastoupení kapalné frakce v produktu je ideální takzvaná rychlá pyrolýza, pro kterou je charakteristický rychlý a intenzivní ohřev materiálu ať už přímým nebo nepřímým způsobem a krátké setrvání ve stálé teplotě. Pokud je pyrolýzovaný materiál vysušen, aby nedošlo k dalšímu navýšení obsahu vody na výstupu a nevzniká větší množství popela, výtěžek pyrolýzního oleje u takové reakce dosahuje až tří čtvrtin objemu celkového produktu. [18], [19]

Pyrolýza s rychlým ohřevem na teplotu 500 °C zajistí prudké odplynění vsázky. Následným zkapalněním získáme přibližně 70 % objemu produktu v kapalné fázi a 15 % plynné. Zbytek tvoří pyrolýzní koks, kterého je přibližně stejné množství, jako kdybychom v experimentu aplikovali pomalý průběh pyrolýzní reakce. Doba zdržení materiálu v reakčním prostoru je výrazně kratší a může se pohybovat v řádu od jednotek do desítek sekund. [20]

Při pomalé pyrolýze se materiál nejdříve dosuší při teplotě kolem 100 °C a následně se teplota zvýší na 300 °C až 600 °C, kdy probíhá samotný termický rozklad. Pyrolýzní plyn vzniká v plné převaze a zaujímá 81 % objemu produktu. Pyrolýzní olej je zastoupen do 5 % objemu produktu a zbytek tvoří pyrolýzní koks. Doba zdržení vsázky při pomalé pyrolýze může být v řádu minut či hodin. Výše uvedené experimentálně zjištěné procentuální zastoupení složek produktů odpovídá pyrolýze biomasy s časem zdržení do 600 sekund. [20]

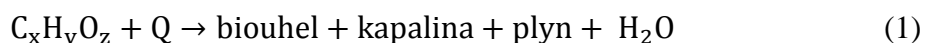
2.3 Vhodné materiály pro zpracování pyrolýzními technologiemi

K pyrolytickému zpracování jsou nejvhodnější materiály, jejichž společná vlastnost je vysoký obsah organických látek. Takové materiály jsou například odpadní plasty nebo použité pneumatiky, které jsou pro nás velmi zajímavým druhem odpadu. Jejich výhodou je, že jde stále o stejný materiál s dobře známým složením a vlastnostmi. Výhřevnost pneumatik je blízka výhřevnosti černého uhlí a uplatní se tedy jako palivo v cementárnách. Další možností využití by mohla být právě pyrolýza, která by dokázala v závislosti na parametrech reakčního procesu zajistit produkt o složení 40 – 60 % pyrolýzního oleje, 35 – 45 % pyrolýzního koksu a 10 – 25 % pyrolýzního plynu. [4], [11]

Komplikovanější situace nastává, pokud se jako vsázku rozhodneme využít tuhý směsný komunální odpad, který nemá jako již zmíněné pneumatiky stále stejné složení, ale je různorodý, a to proměnlivě v závislosti na lokaci vzniku a období jeho svozu. Mnohdy více než polovinu, tedy 40 – 65 % jeho složení, tvoří biologicky rozložitelný odpad, kam patří například dřevo, kompostovatelný odpad, textil, papír a jiné materiály. Zastoupení plastů je 12 – 20 % v hmotnostní jednotce. Celkem do 15 % hmotnosti najdeme v komunálním odpadu skla, kovů a inertních odpadů, jako je keramika nebo porcelán. Nejběžnějšími surovinami pro pyrolytické zpracování jsou biologicky rozložitelné odpady a plasty, které jsou ve směsi komunálního odpadu nejvíce zastoupeny, avšak jejich přesné prvkové složení je velmi proměnlivé. Ostatní obsažené materiály se reakce neúčastní, nebo se jí účastní jen velmi málo. [11]

2.3.1 Pyrolýza komunálního odpadu

Chemickou rovnicí lze termický rozklad obecné sloučeniny uhlíku, vodíku a kyslíku vyjádřit takto:



kde Q značí teplo, které je třeba dodat materiálu ke vzniku reakce a lze ho rozdělit na tři části. K vlastnímu termickému rozkladu dochází až po odpaření veškeré vody obsažené v materiálu, kdy teplo k tomu potřebné lze vyjádřit:

$$Q_1 = W \times 2260, \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2)$$

kde W značí hmotnostní procento vody v materiálu. Vodnaté materiály jako jsou zbytky potravin či biomasa je vhodné před samotnou pyrolýzou vytřídit a vysušit.

Teplo potřebné k termickému rozkladu sloučeniny lze popsat rovnicí:

$$Q_2 = C_{p,M} \cdot \int m_M dT + C_{p,ch} \cdot \int m_{ch} dT + C_{p,v} \cdot \int m_v dT + Q_p, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3)$$

kde $C_{p,M}$, $C_{p,ch}$, a $C_{p,v}$ jsou tepelné kapacity vyprodukovaných složek suchého materiálu, biouhlí a těkavých látek. Hmotnosti složek jsou označeny jako m_M , m_{ch} , m_v , a Q_p označuje reakční teplo. Třetí část Q_3 je ztrátové teplo při zahřívání reaktoru a při přenosu tepla. [3]

Zpracování směsného komunálního odpadu komplikuje jeho různorodost, jako je přítomnost papíru, plastů, skla, keramiky, tkanin, zbytků potravin a obsah bioodpadu o různých zrnitostech. [3]

Z výsledků experimentů popsaných ve dostupných zdrojích lze shrnout, že z rozsahu teplot 300 – 900 °C se v pyrolýzních reakcích nejčastěji využívají teploty v intervalu 500 – 550 °C pokud chceme více kapalných produktů. Při teplotách nad 700 °C je hlavním produktem syntézní plyn. Druhým stěžejním parametrem je doba zdržení vsázky v reakčním prostoru, která může být v řádu sekund i hodin a je závislá na teplotě, materiálu, průběhu reakce i požadovaném produktu. S delší dobou dochází k zlepšení vlastností plynu, avšak zhoršení kvality kapalné frakce. Třetím důležitým parametrem je rychlost ohřevu. Při vyšší rychlosti ohřevu je vyšší obsah těkavých látek v plynném produktu. [3]

Experimenty s aplikací pyrolytické technologie na tuhý komunální odpad proběhly i na Agronomické fakultě Mendelovy univerzity v Brně.

V tabulce (1) jsou uvedené vlastnosti vzniklého pyrolýzního oleje v závislosti na provozních parametrech procesů. V objemu pyrolýzního oleje byl zjištěn vysoký obsah uhlíku, vodíku a naopak nízký obsah kyslíku. Závěrem se dá říct, že takový vyprodukovaný pyrolýzní olej je vhodný k úpravě na palivo. [11], [17]

V tabulce (2) jsou uvedeny vlastnosti pevné pyrolýzní frakce z vsázky tuhého komunálního odpadu. Experiment proběhl ve válcové peci při teplotě 500 °C po dobu zdržení jedné hodiny. [11]

Druh analýzy	Vlastnost	Typ procesu a teplota procesu		
		Pomalá pyrolýza (550 °C)	Rychlá pyrolýza (480 °C)	Rychlá pyrolýza (510 °C)
Fyzikální analýza	Vlhkost	8,5%	6,4%	7,7%
	Výhřevnost [MJ/Kg]	44,0	38,4	37,4
Prvková analýza	C	70,1%	73,4%	72,7%
	H	10,8%	11,7%	11,4%
	N	1,1%	0,4%	0,3%
	S	<0,1%	<0,1%	<0,1%
	O	18,0%	14,5%	15,6%

Tabulka 1: Chemicko – fyzikální vlastnosti pyrolýzního oleje z tuhého směsného komunálního odpadu [11]

Druh analýzy	Vlastnost	Hodnoty
Fyzikální analýza	Výhřevnost [MJ/Kg]	15,8
	Prchavé hořlaviny	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 2: Chemicko – fyzikální vlastnosti pevného zbytku z pyrolýzy tuhého směsného komunálního odpadu [11]

V tabulce (3) jsou uvedené vybrané chemicko – fyzikální vlastnosti plynné pyrolyzní frakce z tuhého směsného komunálního odpadu, který byl rozkládan ve vsázkovém reaktoru při teplotách 500 °C, 550 °C a 600 °C. Reakční prostor byl inertizován dusíkem za atmosférického tlaku. Z tabulky je patrné, že se zvyšující teplotou zároveň narůstá i hodnota výhřevnosti plynu a to vlivem rostoucí koncentrace vodíku a uhlovodíků. [11]

Druh analýzy	Vlastnost	Teplota procesu		
		500 °C	550 °C	600 °C
Fyzikální analýza	Výhřevnost [MJ/Kg]	18,41	19,37	22,18
Prvková analýza	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	26,8%	27,67%	30,73%

Tabulka 3: Chemicko – fyzikální vlastnosti pyrolytického plynu z tuhého směsného komunálního odpadu [11]

3 Pyrolýzní jednotky

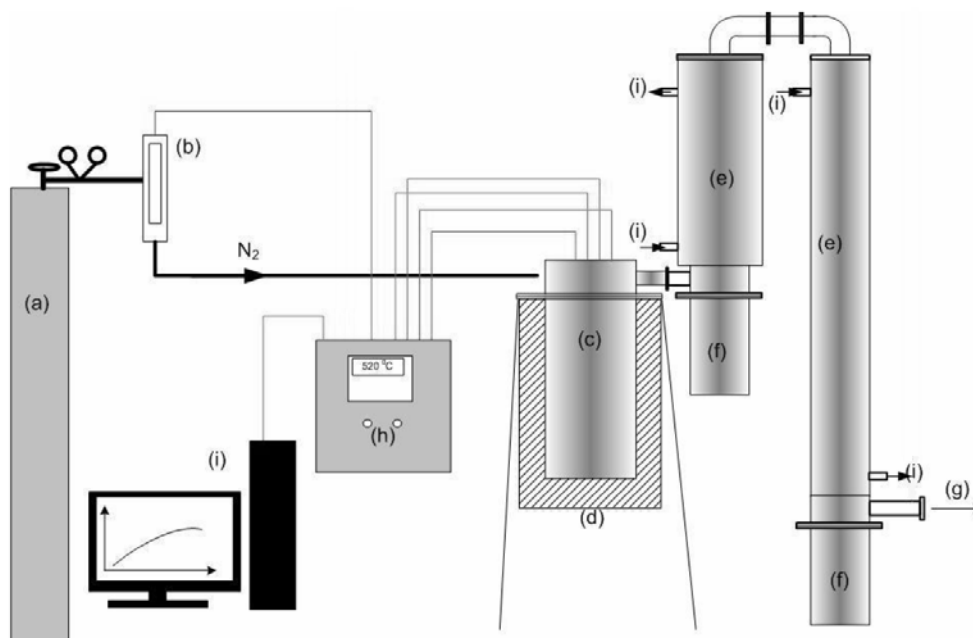
3.1 Rozdělení jednotek podle typu pyrolýzního reaktoru

Pyrolýzní jednotky vhodné pro zpracování směsného komunálního odpadu mohou mít různá konstrukční uspořádání v závislosti na vlastnostech vstupního materiálu a požadovaných vlastnostech surovin výstupních. Ve výčtu nejvyužívanějších reaktorů v dostupné literatuře narazíme většinou na kombinace základních konstrukčních uspořádání jednotek, jako jsou například reaktory s pevným ložem, fluidním ložem, trubkové nebo s rotační pecí. [3]

Následuje výčet a stručná charakteristika několika typů konstrukčních uspořádání nejvíce využívaných reaktorů. Většina z níže uvedených je využívána při rychlé pyrolýze.

3.1.1 Reaktory s pevným ložem

Jsou charakteristické svou nízkou intenzitou ohřevu vzhledem k nízkému součiniteli přestupu tepla uvnitř reaktoru. To způsobí, že při zpracovávání vsádky o větším objemu působí různá teplota napříč materiálem a suroviny jsou degradovány současně za rozdílných podmínek. Kvůli své neefektivitě jsou tedy zřídka používané ve větších a produktivnějších zařízeních. Poslouží spíše jako testovací zařízení v kontrolovaných laboratorních podmínkách při experimentech na nových materiálech. [3]

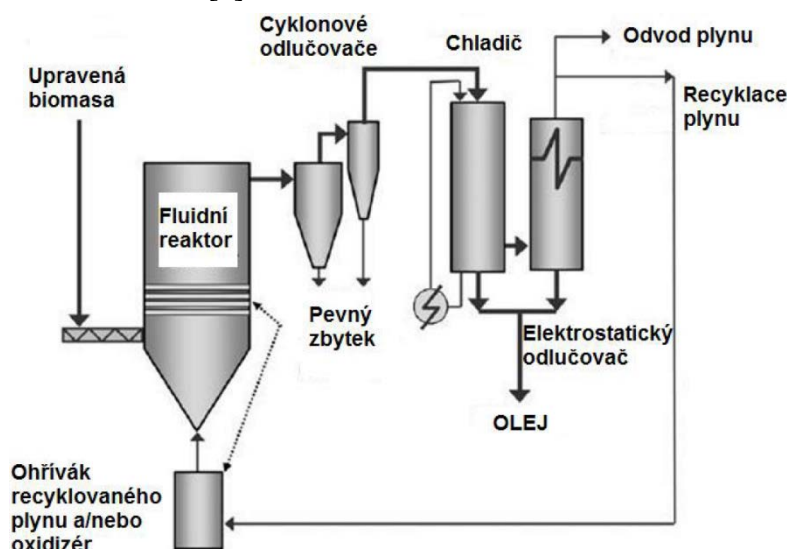


a) láhev s dusíkem; b) plynoměr; c) reaktor; d) tepelná izolace; e) kondenzátor;
f) separátor; g) výpušť nezkondenzovatelných plynů; h) rozvodná skříň pro řízení

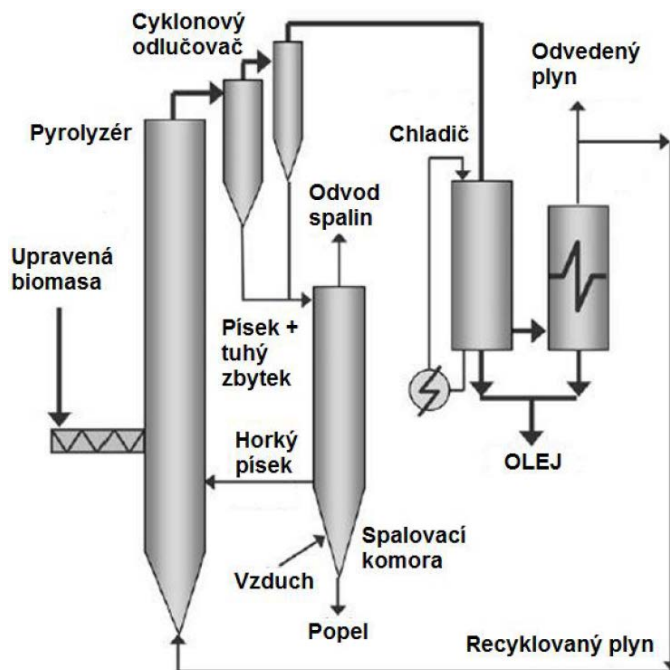
Obrázek 1: Schéma reaktoru s pevným ložem [21]

3.1.2 Reaktory s fluidním ložem

Fluidní lože v konstrukčním uspořádání reaktoru zajistí intenzivnější prohřívání a míchání materiálu. Je však ale zapotřebí věnovat velkou péči předúpravě vstupního materiálu neboť pro využití potenciálu fluidního lože je třeba aby velikost částic odpadu byla přibližně stejná a v rozmezí 2 – 3 mm. Přenos tepla mezi fluidním ložem a materiálem je pak nejefektivnější a dobře regulovatelný, znamená to ale vyšší provozní náklady na předúpravu vsázky. Tyto reaktory se využívají jak v průmyslu, tak i v laboratorních podmínkách, kdy na nich lze experimentovat s vlivem teploty a času zdržení vsázky v reakčním prostoru na chování materiálu. Konkrétně se využívají při rychlé pyrolýze. Lze je rozdělit na dva základní typy, a to reaktory se stacionárním fluidním ložem a reaktory s cirkulačním fluidním ložem. [3]



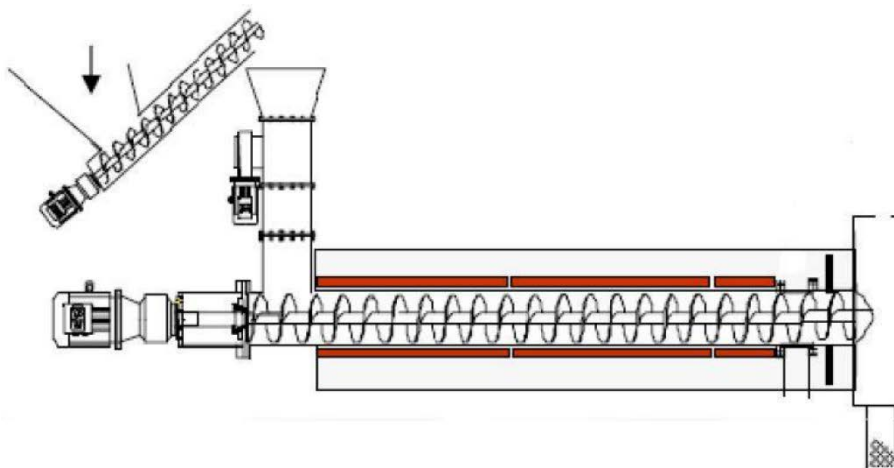
Obrázek 2: Schéma reaktoru se stacionárním fluidním ložem [11]



Obrázek 3: Schéma reaktoru s cirkulačním fluidním ložem [11]

3.1.3 Reaktory trubkové

Do kategorie trubkových reaktorů patří z vnějšku ohříváné pece s fixními stěnami ve tvaru trubky, uvnitř kterých se materiál vlivem pohonu posouvá. Příkladem pohonu materiálu uvnitř trubky by mohl šnek, míchadlo, nebo mechanismus, který uvede materiál do pohybu vlivem vibrací, případně realizace fluidního lože. Výhodou takového konstrukčního uspořádání reaktoru s možností pohonu vsázky v trubce je rovnoměrný odvod produktů z reakčního prostředí bez hromadění a vzniku dalších nežádoucích reakcí. Pozitivní vliv na průběh reakce má i fakt, že materiál uvnitř trubky pokrývá velkou část její vnitřní teplosměnné plochy a dochází tak k lepšímu přenosu tepla do vsázky. Vhodným pohonem materiálu uvnitř trubky je například šnek. Ten umožní snadnou regulaci doby zdržení a rovnoměrný pohyb materiálu v reakčním prostoru. Konstrukce takového reaktoru je vhodná na pyrolytické zpracování plastů i jiných předupravených odpadů jako je například tuhý směsný komunální odpad. [3]

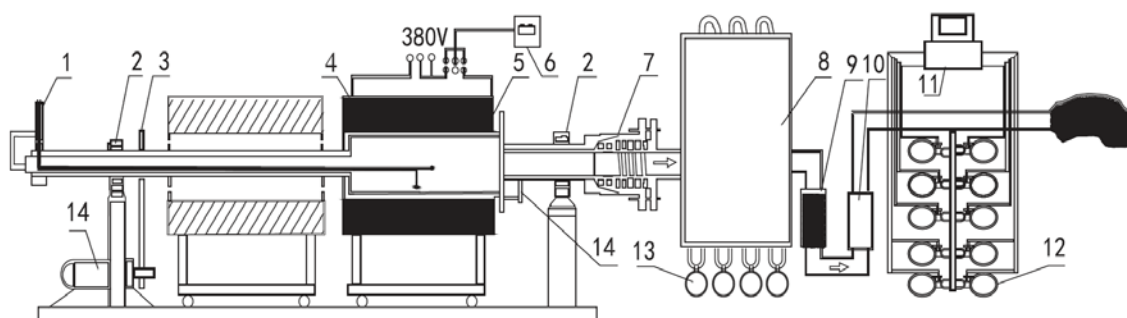


Obrázek 4: Schéma šnekového reaktoru [11]

3.1.4 Reaktory s rotující pecí

Díky pomalé rotaci pece, která zajišťuje míchání vsázky, jsou efektivnější v prohřívání materiálu než reaktory s pevným ložem. Jde o rozšířený a hojně využívaný typ pyrolyzních reaktorů při konvenční pyrolýze, především při pomalých reakcích, kdy vlivem nižší intenzity ohřevu dochází k vyšší produkci biouhlí, kapalných i plyných frakcí. Vhodné intenzity ohřevu jsou například 100 °C/min a časy zdržení vsázky v reakčním prostoru se pohybují kolem jedné hodiny. Nízká intenzita ohřevu je způsobena hlavně tím, že pouze stěna rotačního tělesa reaktoru slouží k přenosu tepla od zdroje do materiálu. Malá plocha styku tělesa a vsázky dodá jednotce materiálu nižší energii. Velkou roli hraje i zrnitost materiálu. Jednou z důležitých předností reaktoru s rotační pecí je mimo dobré schopnosti míchání materiálu také možnost použít jako vsázku různorodé směsi odpadů bez nutnosti

jejich důkladné předpřípravy. Další výhodou je snadná obsluha a údržba zařízení. Jako zdroj energie pro vytápění rotační pece se využívá spalování vlastní reakcí vyprodukovaného pyrolýzního plynu. [3]



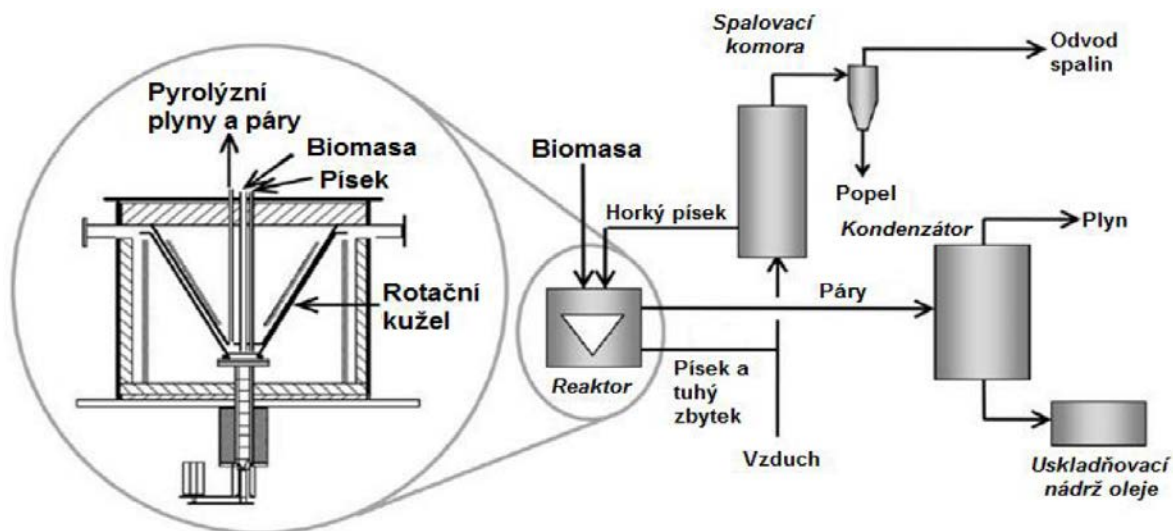
Obrázek 5: Schéma reaktoru s rotační pecí [3]

1 – termočlánek; 2 – ložiska; 3 – převod; 4 – topné těleso; 5 – pec; 6 – řízení teploty;
7 – těsnění; 8 – dvoustupňový kondenzátor; 9 – filtr; 10 – akumulací průtokoměr;
11 – řídicí jednotka; 12 – odběr vzorů plynu; 13 – chladící médium; 14 – regulace

3.1.5 Rotační kuželový reaktor

Technologie vynalezena na univerzitě Twente v Holandsku a vyvinuta v rámci projektu Biomass Technology Group před nedávnou dobou. Funkčním principem se reaktor blíží fluidnímu s cirkulující vrstvou. V tomto případě ale pohyb materiálu v reakčním prostoru zajišťuje odstředivá síla. [11]

Zatím nedošlo k většímu rozvoji technologie. V provozu je pouze pár jednotek s kapacitou zpracování několika set kilogramů za hodinu. Reaktor rotuje deseti otáčkami za sekundu a je poháněn pohybem směsi horkého písku a vsazeného materiálu. Páry z reaktoru odchází separované od pevné složky, která klesá do odděleného fluidního lože v okolí kuželu. Poté je směs s pískem unášena vzduchem do komory, kde dochází ke spalování. Horký písek se poté vrací zpět do reaktoru kde probíhá pyrolýza. Nevýhodou je komplikovaná konstrukce. Výtěžek kapalné složky je v tomto reaktoru 60 – 70 % objemu produktu. [11]

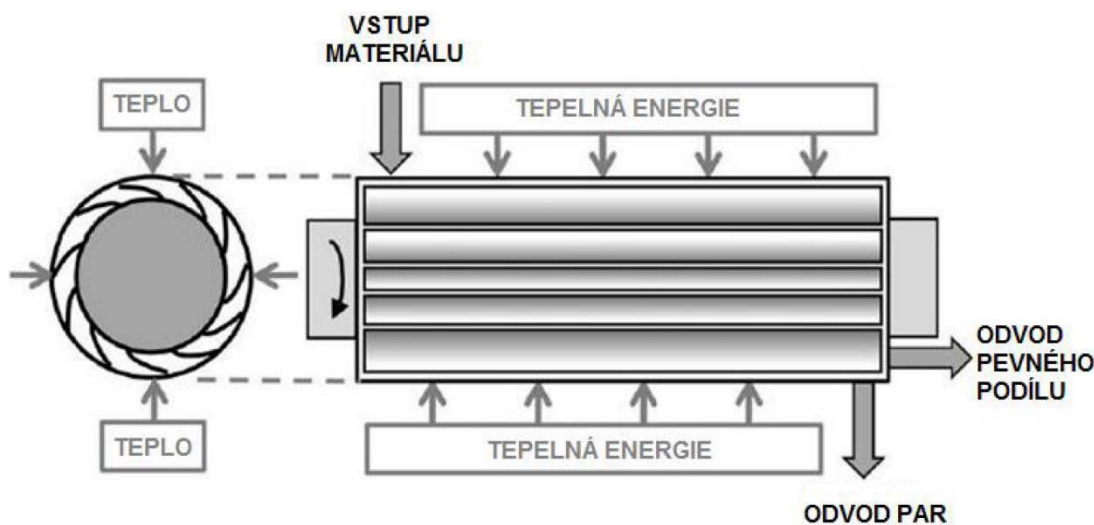


Obrázek 6: Technologie rotačního kuželového reaktoru [11]

3.1.6 Ablací reaktor

Tato technologie má od ostatních výše uvedených několik zásadních odlišností. U všech předchozích postupů a konstrukčních uspořádání reaktorů je rychlost reakce omezena rychlostí přenosu tepla mezi jednotlivými částicemi, proto je u nich důležité, aby byl vsazený materiál dobře předupraven na malé částice. [11]

Tepelná energie je přenášena kontaktem stěny pyrolyzéro s na ní natlačeným materiálem, kde dochází k jeho tavení, Vzniklý pyrolýzní olej ulpívá na stěnách, lubrikuje reaktor a částečně se odpařuje do plynné fáze. Rychlost reakce je závislá na velikosti tlaku materiálu na stěnu, a tedy velikostí teplosměnné plochy i povrchové teploty vsázky. Tlak vzniká vlivem mechanické, nebo odstředivé síly. Provozní teploty takových reaktorů se drží pod 600 °C. Nevýhodou procesu je jeho konstrukční složitost. [11]



Obrázek 7: Technologie ablační pyrolýzy[11]

3.2 Speciální pyrolýzní procesy

3.2.1 Vakuová pyrolýza

Proces vyvinutý v Kanadě na University of Laval and Pyrovac. Jde o rozsáhlé zařízení, které využívá horizontálně pohybující se vyhřívané lože. Provozní teplota je 450 °C a reakce probíhá za podtlaku téměř 100 kPa. Výtěžek tekuté frakce se pohybuje v rozmezí 35 až 50 % objemu produktu. Proces bohužel vyžaduje speciálně upravený reaktor a příslušenství, aby bylo dosaženo tak velkého podtlaku v reakčním prostoru, s tím jdou ruku v ruce vysoké výrobní náklady a to zapříčinilo nevyužití této technologie. [11]

3.2.2 Mikrovlnná pyrolýza

V této oblasti stále probíhá výzkum, neboť jde o odlišný způsob ohřevu materiálu v reakčním prostoru. Mikrovlnný ohřev totiž vyžaduje materiál s vysokou dielektrickou konstantou nebo ztrátovým činitelem, což splňuje například voda. Nejdříve se tedy v materiálu začne zahřívat složka vody a ta poté předává teplo zbytku materiálu. Bohužel při tomto procesu vznikají v reakčním prostoru vířivé proudy, které způsobují velmi rychlý ohřev a průběh procesu se tím komplikuje. Dále je velmi složitá konstrukce takového zařízení, která je doslova výzvou pro konstruktéry. [11]

3.2.3 Hydropyrolýza

Tato technologie je koncept integrace hydrokrakování do procesu pyrolýzy, kdy jsou do reaktoru přidávány atomy vodíku za účelem snížení obsahu kyslíku v tekuté složce produktů. Jedním procesním krokem tedy zajistíme méně kyslíkatý a tím kvalitnější pyrolýzní olej. [11]

Původně měla být tato metoda aplikována ve výrobě kapalných uhlovodíků, bohužel má ale několik protichůdných nároků, například při zvýšení tlaku během pyrolýzního procesu dochází k zvýšení produkce pevného zbytku a připravujeme se tak o výtěžek kapaliny. Bez vysokého tlaku ale neproběhne účinná hydrogenace. [11]

3.3 Přehled výhod a nevýhod základních konstrukčních typů reaktorů

Fluidní reaktor se stacionárním ložem	Typ ohřevu	Prostřednictvím horkého inertního plynu
	Výhody	Dobry přenos tepla a regulace teploty, jednoduchá technologie
	Nevýhody	Nutnost předúpravy materiálu na částice menší než 2 mm
Fluidní reaktor s cirkulační vrstvou	Typ ohřevu	Prostřednictvím horkého inertního plynu
	Výhody	Dobry přenos tepla do částic větších než 6 mm, velká kapacita reaktoru
	Nevýhody	Komplikovaná hydrodynamika zařízení, fluidní lože zanáší částice popela do pyrolýzního oleje
Rotační kuželový reaktor (odstředivý)	Typ ohřevu	Horkým pískem
	Výhody	Obsahem reaktoru pohybuje odstředivá síla
	Nevýhody	Nutnost předúpravy materiálu na menší částice
Vakuový reaktor	Typ ohřevu	Skrz stěnu a pískem
	Výhody	Reakce částic o větší velikosti za nižší teploty bez nutnosti použití nosného plynu
	Nevýhody	Pomalá pyrolýza, nízký výtěžek kapalných produktů
Šnekový reaktor	Typ ohřevu	Přenos tepla stěnou
	Výhody	Kompaktnost reaktoru, nižší provozní teploty, není nutné přivádět žádný plyn
	Nevýhody	Pohyblivé části v horké zóně a problémy s přenosem tepla ve větším měřítku, nižší výtěžek kapalných produktů
Ablační reaktor (pánvový)	Typ ohřevu	Přenos tepla stěnou
	Výhody	Možnost zpracování materiálu s většími částicemi za nižších teplot bez nutnosti použít nosný plyn
	Nevýhody	Drahá technologie, proces je nutné řídit v reakční zóně, rychlost reakce je omezená přenosem tepla do reaktoru

Tabulka 4: Výhody a nevýhody základních konstrukčních uspořádání reaktorů [11]

4 Přehled významných jednotek provozovaných v laboratořích

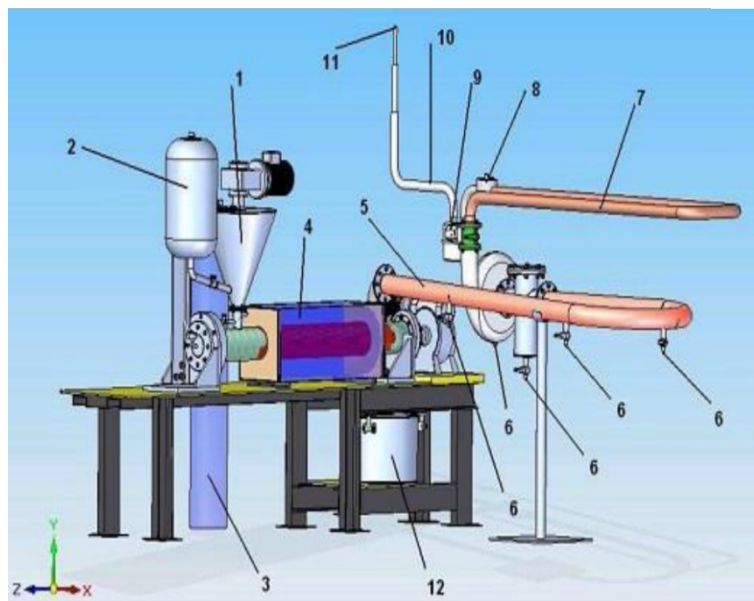
4.1 Na území České Republiky

Následuje výčet a stručná charakteristika významných funkčních pyrolýzních jednotek v laboratorních podmínkách na území České republiky.

4.1.1 Pyrolýzní jednotka Pyrotronic

Společnost Arrow line a.s. za spolupráce Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava a Klastru Envicrack vyvinula a roku 2005 uvedla do poloproduzu první generaci jednotky na zpracování odpadů na bázi pyrolýzní technologie. (22)

Tato experimentální jednotka dokázala zpracovat 5 kilogramů odpadu za hodinu. Ohřev rotujícího bubnu, kde samotná reakce probíhala, zajišťovala topná tělesa na elektřinu o celkovém výkonu 6 kW. Zařízení sloužilo především pro laboratorní ověření základních poznatků ze studie výstupních produktů. (22)



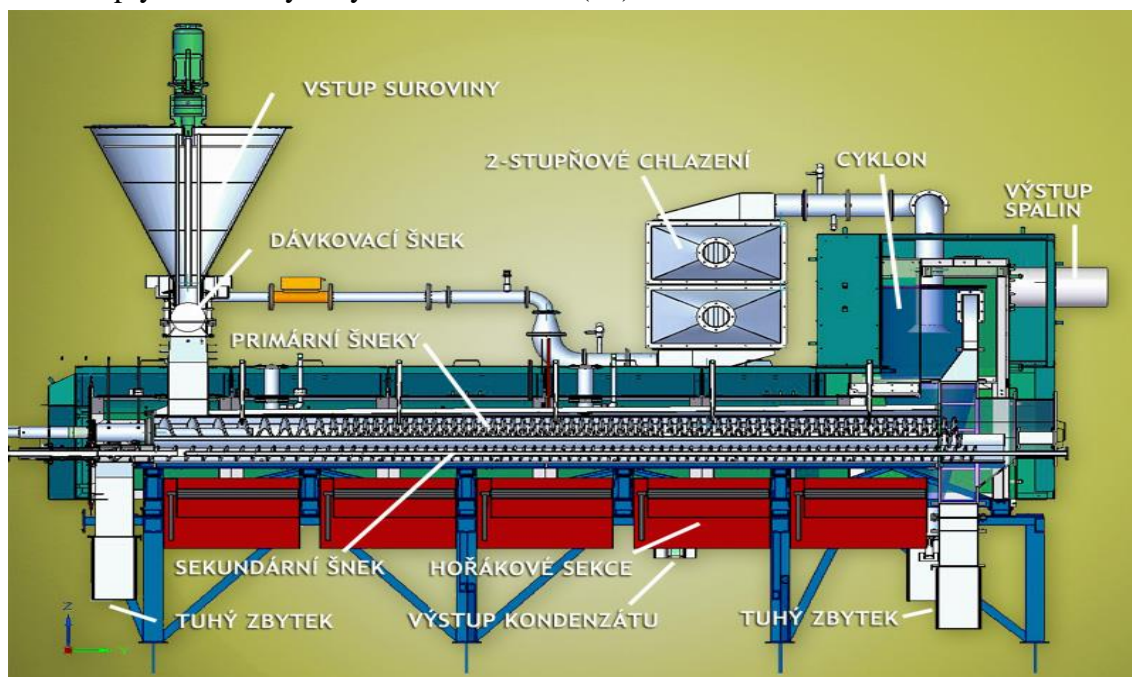
- 1) Zásobník tuhého materiálu
- 2) Zásobník kapalného materiálu
- 3) láhev inertního plynu
- 4) retorta
- 5) trubkový chladič
- 6) odběr pyrolýzní kapaliny
- 7) odvod plynu
- 8) plynový filtr
- 9) plynoměr
- 10) odběr plynné frakce
- 11) hořák pyrolýzního plynu
- 12) nádoba na pevnou frakci

Obrázek 8: Schéma pyrolýzní jednotky Pyrotronic (22)

4.1.2 Pyrolýzní jednotka Pyromatic 50

Jednotka, která je nástupcem Pyrotronicu z roku 2005. Vznikla v letech 2008 až 2009 opět ve spolupráci Klastru Envicrack, společnosti Arrow line a.s. a Ostravské VŠB. Na vývoji se podílel i Dr. Tomasz S. Wiltowski ze Southern Illinois University Carbondale. (22)

Druhá experimentální jednotka má výrazně vyšší kapacitu pro zpracování materiálu a zvládne tedy pojmout až 50 kilogramů odpadu za hodinu. Proces probíhá při teplotách od 500 °C do 800 °C a dodání tepelné energie pyrolýzní reakci zajišťuje pět sekcí hořáků na zemní plyn s celkovým výkonem 200 kW. (22)



Obrázek 9: Schéma pyrolýzní jednotky Pyromatic 50 (22)

- Technologický popis jednotky Pyromatic 50

Materiál je po mechanické předúpravě navážen na požadovanou hmotnost a pásovým dopravníkem je dávkován do těsněného zásobníku, odkud je pomocí stěrky a šneku tlačěn do pyrolýzního reaktoru vyhřátého na teplotu 500 – 800 °C. Zásobník je proplachován inertním plynem, aby se zamezilo přístupu oksylichovacích médií do reakčního prostoru. Šnekový dopravník je poháněn třífázovým asynchronním motorem s kotvou na krátko s možností regulace otáček frekvenčním měničem. Retortu s aktivní délkou 4 000 mm tvoří tři bezjádřové šneky, dva z nich mají průměr 210 mm a jeden 110 mm. Konstrukce reaktoru se šneky zvládá díky regulaci otáček nastavit dobu zdržení vsázky v aktivní zóně v rozsahu od 20 do 80 minut. Pohon šneků zajišťují opět třífázové motory s kotvou na krátko jejichž otáčky jsou redukovány planetovou převodovkou. Teplo reaktoru dodává pět sekcí propanových hořáků s výkonem až 200 kW. Pevný uhlíkový zbytek po rozkladu materiálu je šnekem shromažďován do boxu na popel. Plynná fáze je z reakčního prostředí odváděna do cyklonu, kde dojde k její expanzi a vlivem gravitace se z ní odloučí tuhé nečistoty. Čistý plyn je následně chlazen vzduchem v primárním stupni dvoustupňového chlazení. V sekundárním stupni se plyn podchlazuje ve výměníku s vodou, aby při dalším vedení potrubím nekondenzoval. Vzniklý kondenzát se shromažďuje v nádrži na kapalnou fázi

pyrolýzního produktu, která je vybavena míchadlem, aby nedocházelo k usazování těžkých uhlovodíků. Ochlazený plyn je dále veden do zásobníku, odkud je poté odebírán, případně ředěn vzduchem a spotřebováván. Celá jednotka je řízená počítačem z velína. [14]

- **Experiment se zpracováním použitých pneumatik**

Výhoda použitých pneumatik jakožto odpadu je jejich podobné chemické složení. Obsahují gumu, textilní vlákna a ocelové výztuže. Pneumatiky jsou tedy přibližně z jedné čtvrtiny složeny ze syntetických elastomerů, jako je například polybutadien, styrenbutadien, polyizopren. Druhou čtvrtinu tvoří saze, jako zpevňovací plnidlo. Přírodní elastomery tvoří 14 % složení. Dále v pneumatikách najdeme stopy síry, oxid zinku, uhlovodíkové oleje a další chemické sloučeniny plnicí funkci stabilizátorů nebo antioxidantů. Termickým rozkladem odpadních pneumatik vznikají saze obsahující anorganické sloučeniny. [14]

Předmětem experimentu bylo ověřit změnu hmotnostních bilancí u odpadních pneumatik za různých teplot, přičemž ostatní podmínky zůstaly zachovány. Před každým pokusem byla retorta předehřátá na požadovanou teplotu a reakce probíhala vždy za konstantní teploty. Sypná hustota předupravených pneumatik byla 500 kg/m^3 . Velikost zrna vstupního materiálu byla do 30 mm a jeho vlhkost do 20 %. Vsazeno bylo celkem 20 kg materiálu a doba zdržení v reakčním prostoru byla 40 minut. Rychlost dávkovacího šneku byla nastavena na 600 otáček za minutu. V reakčním prostředí byl nízký podtlak v řádu desítek Pascalů. Pozorován byl vznik reakčních produktů, jejich množství a následovalo vyhodnocení hmotnostních bilancí. Produktem byla pevná, kapalná a plynná fáze. [14]

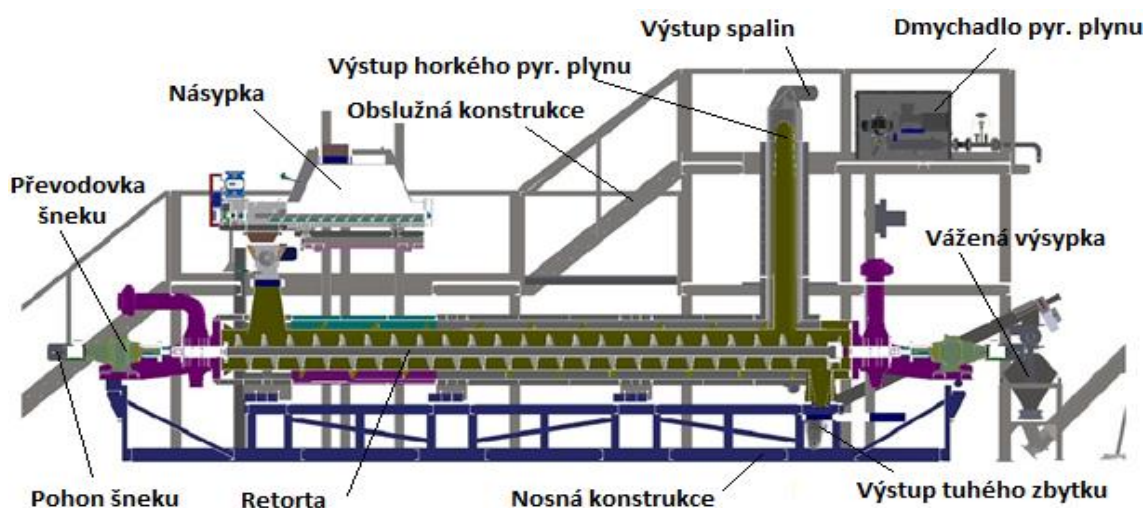
Výsledky hmotnostních bilancí experimentu potvrdili předpoklad, že se vzrůstající teplotou dochází k vyššímu vývinu plynu. Vzájemný poměr výstupních produktů nezávisí pouze na vstupních podmínkách jako je poměr organická a anorganická složka, ale závisí převážně na teplotě, době zdržení vsádky v reakčním prostoru a rychlosti dávkování materiálu. Vzhledem k různorodosti odpadního materiálu musí být pro pyrolýzní proces zvoleny optimální podmínky, tak aby směřovaly v konečném stádiu k nejlepšímu využití produktů. [14]

Cílem do dalších experimentů s jednotkou je soustředit se na optimalizaci provozních podmínek, testování různorodých odpadních materiálů, jako jsou plasty, uhlí, biomasa a čistírenské kaly. Z aktuálních experimentů a analýz vyplývá, že pyrolýzní technologie je vhodná metoda k využití energetického potenciálu, který je obsažen v odpadu a to ekologickou cestou vedoucí k výrobě tepla či elektrické energie. [14]

4.1.3 Pyrolýzní jednotka Pyromatic 250

Třetí generace experimentální jednotky Pyrotronic realizovaná v letech 2011 až 2012. Klastř Envicrack a společnost Arrow line už ve vývoji jednotky nepokračují. Podíl na vzniku jednotky nese opět Ostravská VŠB a nově společnost LTS a.s. Jednotka prozatím slouží jako testovací zařízení pro odladění reakčních parametrů pro možné budoucí komerční využití. [22]

Oproti druhé generaci je opět výrazně vyšší kapacita pro zpracování odpadu, a to až pětinasobně. Jednotka tedy zvládne zpracovat materiál do 250 kg za hodinu. Proces probíhá opět při teplotách od 500 °C do 800 °C. Dodání tepelné energie pyrolýzní reakci tentokrát zajišťují pouze dvě sekce hořáků na zemní plyn a to s celkovým výkonem 640 kW. [22]



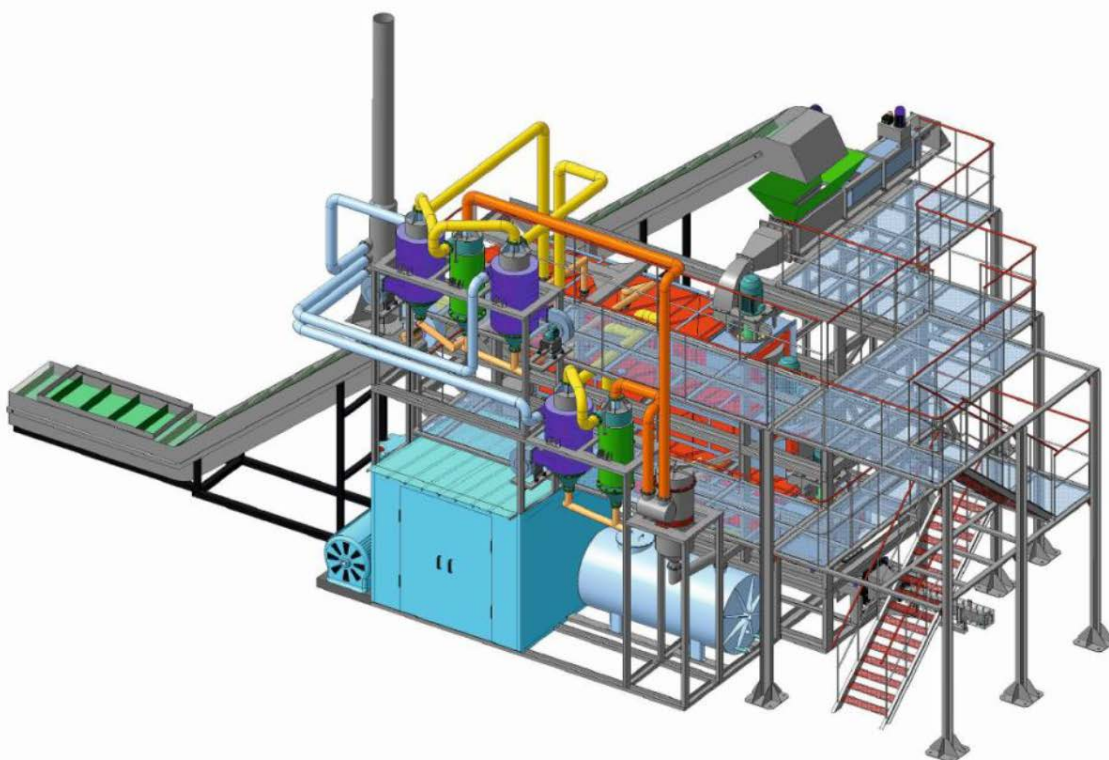
Obrázek 10: Schéma pyrolýzní jednotky Pyromatic 250 (22)

4.1.4 Technologie mnohakonturové cirkulační pyrolýzy Pyrolun

Tato technologie je konstrukčně uzpůsobena pro termický rozklad polymerních odpadů jinak nerozložitelných v přírodních podmínkách. Reakcí zajišťuje energeticky hodnotný kapalný produkt, tuhý zbytek polykarbon a plynnou složku. Z jedné tuny vstupního materiálu z polymerních odpadů lze získat 650 – 850 kg pyrolýzní kapaliny, která se poté dá přimísit do standartního dieselového paliva pro motory s vnitřním spalováním, například u nákladních aut, a to do 20 % objemu. Pyrolýzní kapalinu je možné využít i jako samostatné palivo pro vytápění. [23]

Technologie Pyrolun je již vypracovaná na průmyslové úrovni. Reaktory jsou konstruované pro kontinuální provoz po celý rok s denní kapacitou 1 – 24 tun materiálu.

Ve výrobním procesu se pracuje pouze s nízkým přetlakem a podtlakem, konstrukce je tedy bezpečná. Pyrolýzní jednotka využívá jako zdroj tepla spalování výstupních produktů, zařízení je tedy energeticky soběstačné. Výhodou inertního reakčního prostředí této technologie je omezena tvorba furanů a dioxinů. [23]



Obrázek 11: Pyrolýzní jednotka Pyrolun [23]

Provoz zařízení je plně automatizovaný a jeho konstrukce odolává vysokým teplotám, mechanickému zatížení i fyzikálně – chemickým reakcím. Celá technologie je již patentována a vlastníka patentu na území Evropské unie zastupuje firma Nazar s.r.o. Společnost v současné době spolupracuje s technickou univerzitou Vysokou školou báňskou v Ostravě, kde je pilotní jednotka v provozu. [23]

Na prvním místě při zpracování odpadů je ekologická bezpečnost. Při mnohokonturové cirkulační pyrolýze se tento požadavek plní ve smyslu prohloubení destrukce odpadů, kdy se toxické vysokomolekulární látky štěpí na nízkomolekulární a z tohoto důvodu se právě snižuje jejich toxicita. Těkavé toxické látky nacházející se v pyrolýzním plynu se při teplotě 1 100 – 1 200 °C rozštěpí a dochází tak k úplnému rozložení furanů a dioxinů. Tímto je vyřešen problém s přeměnou či zneškodněním nebezpečných nebo infekčních látek, zároveň se získávají plynné, kapalně a pevně energetické produkty. Cílem technologie do budoucna je snížit potřebu využívání přírodních neobnovitelných zdrojů energie. [23]

Jednotka zajišťuje efektivní rozklad různých druhů odpadů dle chemického složení, díky čemuž není vyžadováno důkladné třídění. Proces probíhá v hermeticky uzavřeném reaktoru v rozmezí teplot 500 – 600 °C, kdy neprobíhá výpar těžkých kovů. Vlivem uzavřeného cyklu není možný únik škodlivin do okolního prostředí. Odorometrická měření neprokázala v okruhu tří metrů kolem pyrolýzní jednotky žádný zápach. Ekologická čistota pevného produktu prokarbonu byla prověřena analýzou vodního výtoku z materiálu. Pevný vzorek byl z reaktoru odebrán po zchlazením na pokojovou teplotu. Odebrány byly vzorky kouřového plynu z hoření pyrolýzního plynného produktu za nedostatku a nadbytku kyslíčovačla. Odběr byl proveden 15 cm nad ohněm hořáku při teplotě 1 200 °C a závěrem je, že pokud bude spalování probíhat za nejhorších podmínek, obsah toxických látek v produktech hoření je pod limitními hodnotami, vyjma oxidu uhličitého, který v neoptimálních podmínkách převyšuje přípustné hodnoty. [23]

Při provádění hygienické analýzy se zkoumal obsah formaldehydových ředidel v ovzduší při provozu, hladina hluku a vibrací. Odběr vzduchu pro analýzu probíhal s rychlostí 1 l/min po dobu 10 minut na dva páry pohlcovačů. Jedna dvojice obsahovala kyselinu octovou na jímání uhlovodanů a druhá s obsahem vody sloužila k pohlcení fenolů a formaldehydů. Hodnota hluku na pracovišti při odběru vzduchu ze zařízení je v místnosti na pozadí 52 dB, což je hodnota, která nepřevyšuje hygienickou hladinu hluku pro výrobní provozy. Vyšší hladina vibrací při pyrolýze nebyla na pracovišti zjištěna. Z výsledků hygienické analýzy je patrné, že v tomto ohledu nemá pyrolýza negativní vliv na životní prostředí. [24]

4.1.5 Kontejnerové linky PolyComp

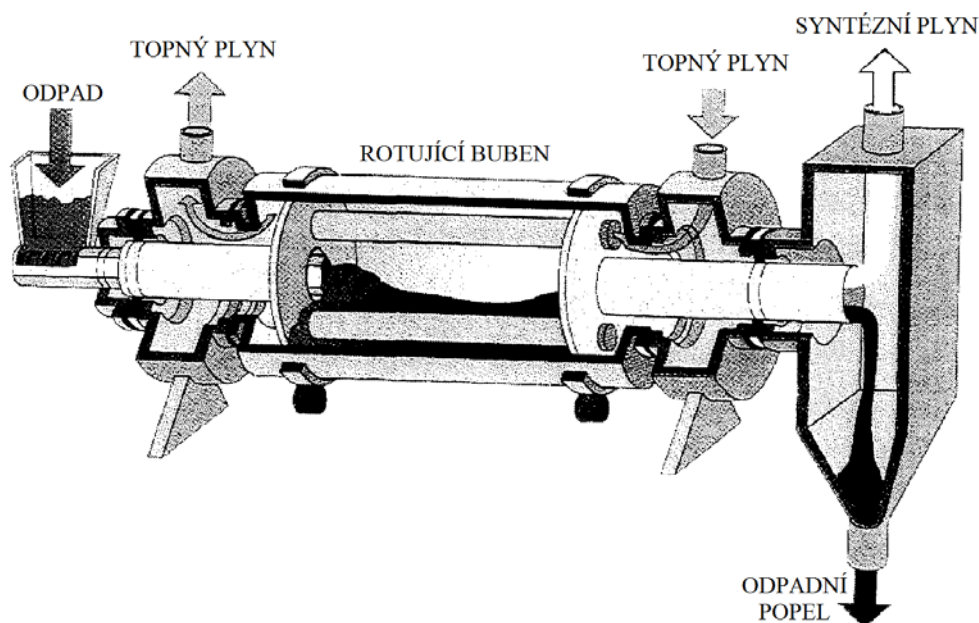
V rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu v programu TIP „*Výzkum technologie umožňující materiálové a energetické využití nerecyklovatelných plastových, celulóznych a jiných obdobných odpadů.*“ vznikly v letech 2010 – 2011 dvě kontejnerové linky na zpracování odpadů. Vývojářem byla společnost PolyComp, a.s. Poděbrady spolu s Výzkumným ústavem zemědělské techniky Praha. Linky byly konstruovány pro vstupní surovinu tuhého alternativního paliva a biopaliva zrnitosti do 40 mm a za hodinu dokázaly zpracovat 2 kg a 20 kg materiálu. Jako zdroj tepla slouží elektrický ohřev. Proces je složen ze dvou základních stupňů, pyrolýze při 500 – 650 °C a zplyňování při 800 – 1 000 °C. Pyrolýzním produktem je plyn a tuhý zbytek. Plynný produkt je dále zpracováván propíráním v lehkých uhlovodících, například v xylenu. Následuje ochlazování plynu, ze kterého tím vznikne kondenzát určený ke zplynění. Vzniklý syntézní plyn má výhřevnost srovnatelnou se zemním plynem. Získané výsledky z experimentů slouží vývojářům

při navrhování provozní jednotky s hodinovým výkonem 250 kg vstupní hmoty. Předpokládá se, že by v budoucnu v ČR mohlo být postaveno 16 – 20 takových jednotek. [25]

4.2 Významné pyrolýzní jednotky v laboratořích ve světě

4.2.1 Proces KWU

V Německém Ulm-Wieblingenu vyvinula společnost Siemens pilotní zařízení s označením Schwel-Brenn-Verfahren, které zpracuje 200 kg komunálního odpadu za hodinu, a to při teplotách až 700 °C. Cílem bylo využít pyrolýzní technologii k těžbě syntézního plynu, který měl následně sloužit k výrobě elektrické energie či tepla spalováním v kotli. [14]



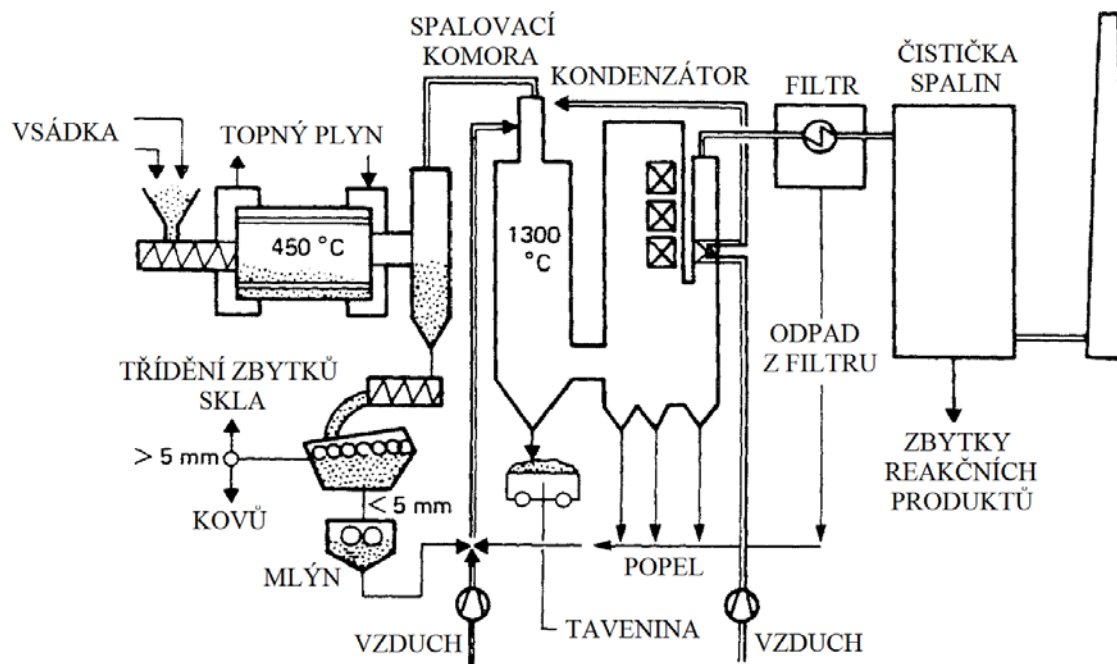
Obrázek 12: Schéma pyrolýzního reaktoru KWU [14]

Předupravený směsný komunální odpad je dopravován těsněným šnekovým dopravníkem do nepřímo ohřívaného rotačního bubnu. Ohřev pece zajišťuje topný plyn vedený trubkou po celé délce pece proti proudu vsázky. [14]

Z pevného produktu pyrolýzy se vytřídí sklo, kovy, kameny a pyrolýzní koks se rozele na částice menší 5 mm. Pyrolýzní plyn se následně spaluje spolu s namletým pyrolýzním koksem při teplotě 1300 °C, kdy dochází k roztavení minerální složky směsi. Tavenina odchází ze spalovací komory do vodní lázně. Spaliny jsou filtraci a očištění vypuštěny do ovzduší. [14]

Na základě pilotního zařízení byla vybudována první komerční jednotka uvedená do provozu v roce 1994. Ročně měla dokázat zpracovat 100 000 tun materiálu, ale během

zkušebního provozu se projeví problémy. V roce 1998 došlo k rekonstrukci zařízení, bohužel nedostatky přetrvávaly a zadávající firma byla nucena odstoupit od smlouvy. [14]



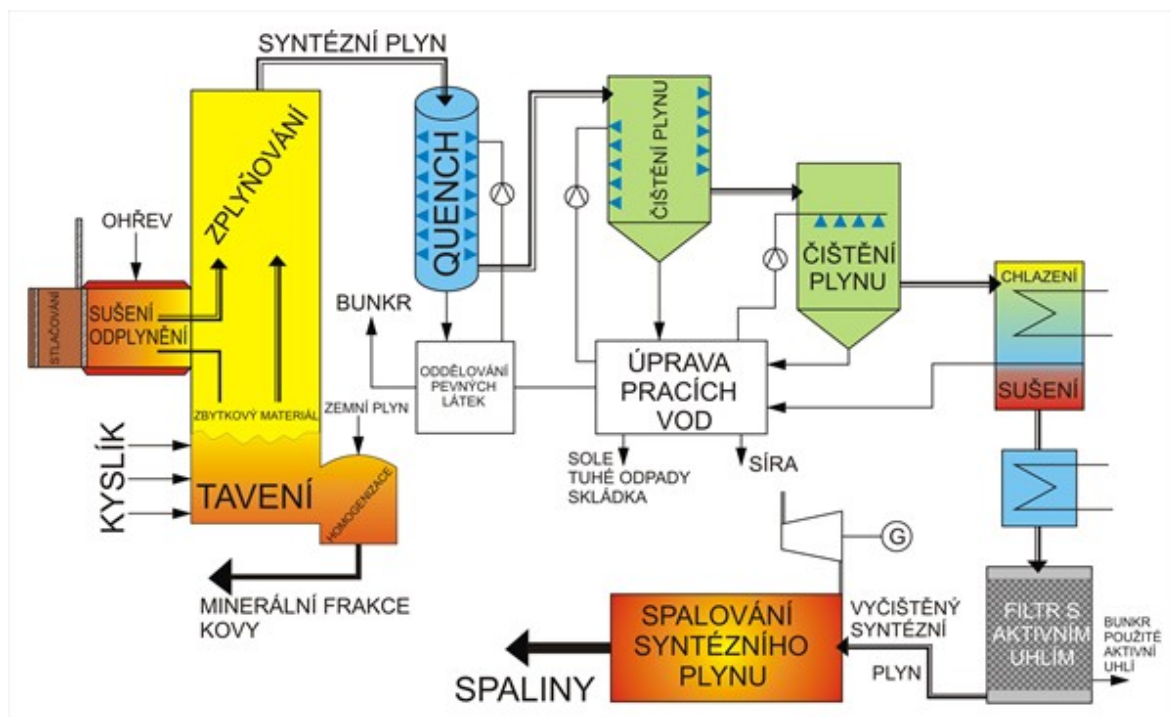
Obrázek 13: Schéma procesu KWU [22]

4.2.2 Proces Thermoselect

Pokusné zařízení společnosti Thermoselect o provozní kapacitě 4,2 tun komunálního odpadu za hodinu bylo realizováno v roce 1991 v italské Verbanii poblíž švýcarských hranic. Dále společnost realizovala na základě zakázky v německém Karlsruhe zařízení s roční kapacitou 225 000 tun směsného komunálního odpadu, které se ale po třinácti letech snažení nepodařilo přivést do trvalého a spolehlivého provozu. [26]

Při tomto procesu probíhá pyrolýza a následně zplyňování slisovaného směsného komunálního odpadu. Materiál je po stlačení nejdříve vysušen a poté prochází rotačním odplyňujícím tunelem, kde je termicky rozložen. Následuje zplyňování ve vysokoteplotním reaktoru za přítomnosti kyslíku, kdy vzniká syntézní plyn. [27]

Je snaha o komerční využití tohoto procesu v blízké budoucnosti, ale vzhledem k vysoké teplotě kolem 2 000 °C potřebné k vitifikaci popela a použití čistého kyslíku ve zplyňovacím reaktoru má tato technologie vysoké provozní náklady, návratnost investice je tedy nejistá. [27]



Obrázek 14: Schéma procesu Thermoselect [28]

4.2.3 Proces Destrugas von Kroyer

Firmou Pollution Control Ltd. byla v Kalundborgu v roce 1971 instalována pilotní jednotka se schopností zpracovat 6 tun směšného komunálního odpadu denně. Doba zdržení vsázky v reakčním prostoru byla 24 hodin a materiál byl vystaven teplotě 900 °C. Vyprodukovaný plyn byl z vnějšku spalován za účelem ohřevu reaktoru. [14]

Směšný komunální odpad je na vstupu rozdrcen a výtahem podáván do reaktoru. Šachtová pec je pravoúhle, keramicky vyložená roura eliptického průřezu. Vrchní konec pece je otevřený a materiál násypem nedovolí přístup okolní atmosféry do reakčního prostředí. Vyprodukovaný pyrolýzní plyn je v protiproudé pračce očištěn a použit k ohřevu reaktoru. [14]

4.2.4 Proces PKA

Zařízení umístěno v německém Aalenu, realizováno v roce 1982. Jde o speciální případ technologie s aplikací rotační pece s vnitřním ohřevem. Cílem bylo vytvořit použitelný reaktor z feritických ocelí vhodný pro aplikaci nízkoteplotní pyrolýzy za účelem snížení výrobních nákladů. Zařízení uzpůsobeno pro demonstraci zpracování směšného komunálního odpadu s kapacitou 3 tuny za hodinu. [14]

Rotační buben je zevnitř nepřímě zahříván v rozsahu teplot 500 – 700 °C. Produktem reakce je pyrolýzní plyn, který je po výstupu z reaktoru veden do konvertoru,

kde dochází k rozštěpení organických látek na uhlovodíky s krátkými řetězci. Získaný plyn je možné spalovat v motoru spojeným s generátorem elektrické energie. Spaliny z motoru se zpětně využívají k ohřevu reaktoru. [14]

4.2.5 Proces DAL

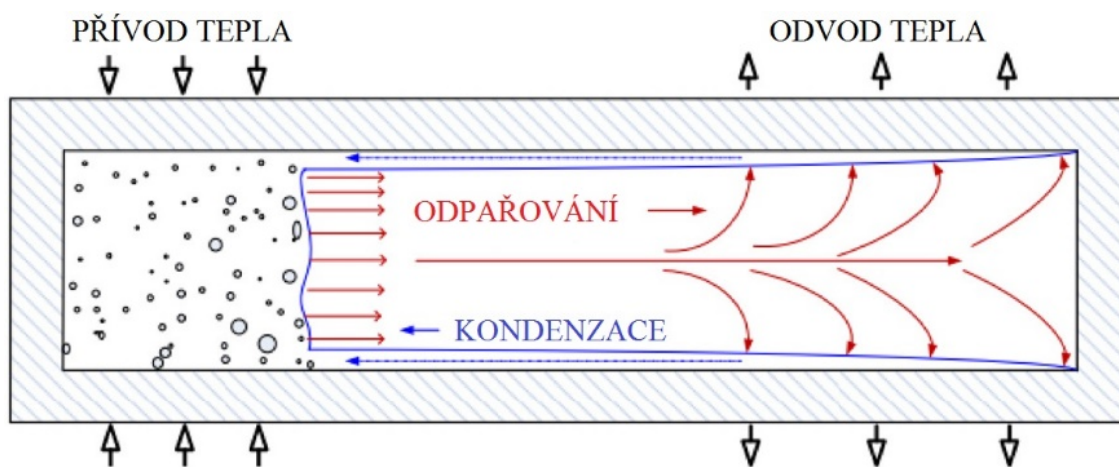
V obci Plaidt poblíž německého města Koblenz je společností Deutsche Anlagen Leasing realizováno výzkumné zařízení na pyrolýzní zpracování směsného komunálního odpadu, pneumatik a drcených kabelů. Kapacita na zpracování materiálu je 2 t / h. Cílem bylo vytvořit pyrolýzní jednotku na experimenty s různými materiály. [14]

Hlavním konstrukčním prvkem je zde rotační z vnějšku vyhřívaný buben s průměrem 1 m a délkou 10 m. Za rotační pecí je zařazena spalovací komora a aparatura na čištění spalin. Produktem je pyrolýzní plyn, ze kterého byla následně vyráběna energie ve formě tepla spalováním. [14]

4.2.6 Prototyp domácí pyrolýzní jednotky

V Národním centru pro udržitelné využití energie v potravinářských řetězcích na univerzitě Brunel v Londýně vznikl prototyp domácí pyrolýzní jednotky určené pro zpracování směsného odpadu z domácnosti. [29]

Rovnoměrný ohřev materiálu v reakčním prostoru jednotky zajišťuje systém tepelných trubic, tedy hermeticky uzavřených trubic naplněných pracovní kapalinou. Tepelná trubice funguje tak, že pokud jednomu jejímu konci dodáváme teplo, dochází uvnitř k vypařování pracovní kapaliny. Na druhém konci, který opatříme chladičem pak dochází ke kondenzaci par a uvolnění tepla spotřebovaného tepla k odpaření kapaliny. [29]

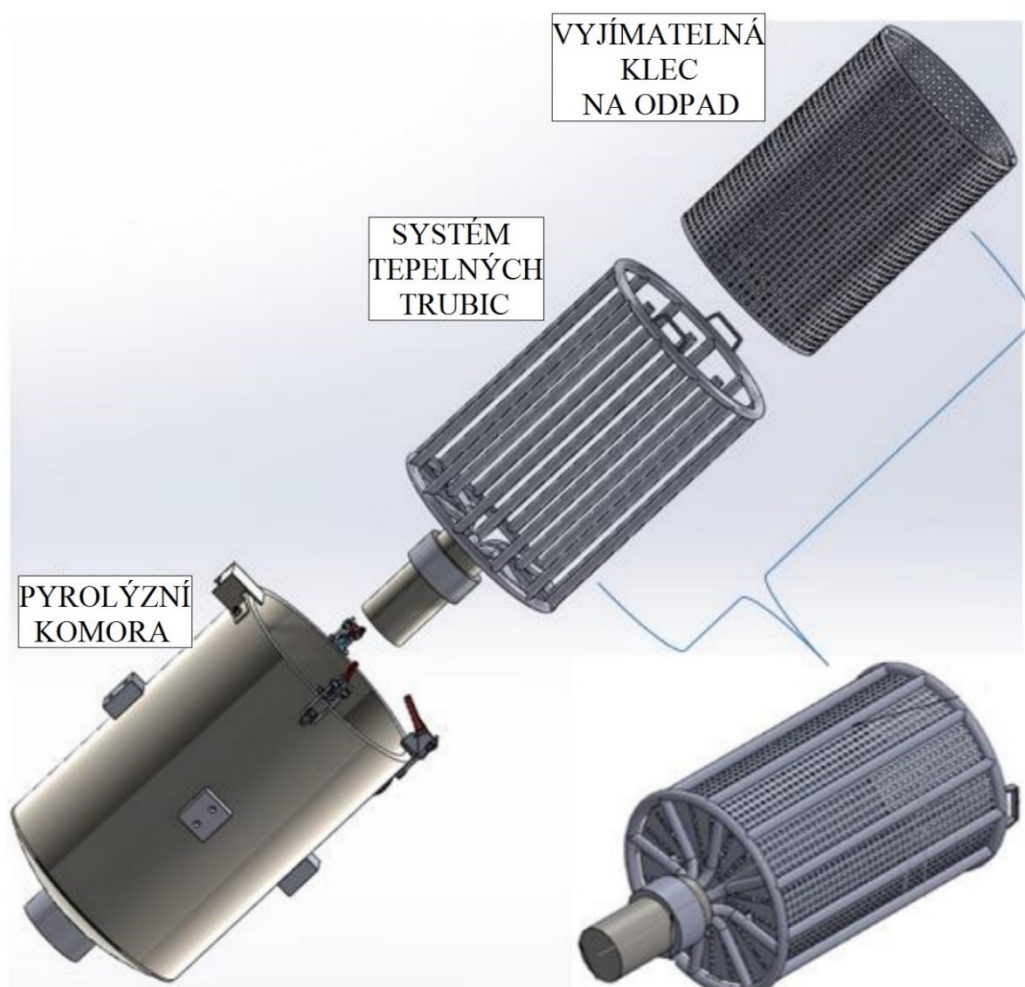


Obrázek 15: Schéma principu funkce tepelné trubice [29]

Tepelná trubice bývá většinou vyrobená z mědi, hliníku, nebo z oceli a na konci je zavařená, nebo zapájená. V případě prototypu domácí pyrolýzní jednotky je pracovní kapalinou uvnitř trubice voda, v praxi ale narazíme i na použití alkoholů či freonů. [29]

Systém tepelných trubic známe z vytápění pekařských pecí, nebo při chlazení výkonové elektroniky, třeba procesoru počítače hliníkovým chladičem doplněným tepelnou trubicí. Pomocí této technologie dokážeme rozvést teplo z malého intenzivního zdroje do velké plochy. [29]

Reaktor tvoří pevná vyjímatelná klec na odpad, ve které se vsázka vkládá mezi systém 17 kusů hliníkových tepelných trubic uložených v reakčním prostoru. Vnější obal jednotky tvoří izolace o tloušťce 90 mm, která snese teploty až 1 200 °C. Ohřev reakčního prostoru je navržen tak, aby udržoval vně konstantní teplotu 300 °C. Konstrukční výhodou prototypu je schopnost po dokončení samotné pyrolytické reakce vstříknout do reakčního prostoru vzduch, který způsobí, že dojde k zapálení pevného zbytku uvnitř reaktoru. Teplo vzniklé vyhořením tuhé frakce je možné využívat třeba pro ohřev užitkové vody [29].



Obrázek 16: Schéma reakční komory prototypu domácí pyrolýzní jednotky [29]

Při experimentu bylo do reaktoru vsazeno 7 kg neupraveného smíšeného odpadu z domácnosti obsahující zbytky potravin jako kousky chleba, ovoce, zeleniny, kuřecího masa. Dále byly ve vsázce kusy nápojových kartonů a plastů, plechovky, gumové rukavice a plastové sáčky. Experiment trval celkem 7 hodin, z čehož prvních 5 h docházelo k ohřevu a vysušování materiálu. Vlastní pyrolytický rozklad proběhl až v posledních dvou hodinách za působení konstantní teploty 300 °C. Většina vsazeného materiálu, přesně 75 % objemu se přeměnila na pevný zbytek. Zbýlých 20 % objemu odešlo z reakčního prostoru ve formě pyrolýzní plynu a z 5 % objemu materiálu vznikl kondenzací olej. U vyprodukovaného oleje byla sledována postupná změna barvy a hustoty. Kapalná frakce s rostoucí dobou zdržení materiálu v reakčním prostoru houstla a její barva tmavla. Na celý experiment bylo spotřebováno 5,5 kWh elektrické energie. [29]

5 Pyrolýzní jednotky aplikované v průmyslovém měřítku

5.1 Na území České Republiky

5.1.1 Vakuová pyrolýza společnosti Agmeco LT

Společnost Agmeco LT, s.r.o. sídlící v městské části Prahy 4 – Chodov nabízí dovoz pyrolýzních jednotek a jejich navržení na zakázku. Technologii vakuové pyrolýzy je možné aplikovat na složitě biologicky odbouratelné materiály, likvidaci odpadních pneumatik, zpracování kalů z čističek odpadních vod, kejdy a plastů. Mobilní verze reaktoru dokáže pomoci i při likvidaci havárií. [30]

Materiál je vsazen do hermeticky uzavřeného prostoru vybaveného šnekovými dopravníky, které ho v průběhu procesu rovnoměrně posunují. V reakční komoře je dmychadlo udržováno konstantní podtlak v pásmu hrubého vakua, v rozsahu od 50 mm do 200 mm vodního sloupce. O dodávku tepelné energie reakci se stará nepřímý ohřev regulovanými plynovými hořáky s nízkou emisivitou oxidů dusíku a CO₂. Při reakci materiál dosahuje teploty až 510 °C, poté dochází ke škrcení hořáků. Když je materiál zbaven vody a odplyněn, odstraní šnekové dopravníky pevné zbytky materiálu pryč z těsněného prostoru reaktoru do chlazených kontejnerů. [30]



Obrázek 17: Blok schéma vakuové pyrolýzy společnosti Agmeco [31]

Vzniklý pyrolýzní plyn projde separátorem, který jej zbaví mechanických nečistot. Poté ve Venturiho věžové výplňové pračce zkondenzují těžké oleje v plynu obsažené. Zbylá

plynná fáze je v kondenzační věži a dalších tepelných výměnících zkapalňována a separována. [30]

Vyprodukovaný plyn má výhřevnost 45 MJ/m^3 , to umožňuje využití plynu přímo jako palivo pro dodávání tepelné energie samotné pyrolytické reakci prostřednictvím plynových hořáků. Tato možnost snižuje provozní náklady jednotky. Kapalná fáze, pyrolýzní olej se svými vlastnostmi blíží motorové naftě a lehkým topným olejům. [30]

Z nashromážděné pevné frakce se magnetickou separací oddělí kovový materiál a ostatní zbytky. Samotný uhlík lze dále využít v gumárenském průmyslu, nebo na výrobu kvalitního černého uhlí. Další možností využití je aktivace vodní parou, kdy vzniklé aktivní uhlí s mnohanásobně větším objemem využíváme při čištění a filtraci vod či vzduchu. [30]

Společnost Agmeco LT, s.r.o. spolupracuje s firmou Eliav a.s., která se specializuje na ekologickou likvidaci autovraků. Vakuovou pyrolýzu aplikují na likvidaci odpadních pneumatik, plastů a molitanů. Produktem reakce je plyn, kapalina, uhlík a ocel z výztuží pneumatik. Ocel z drátů kordů pneumatik takto získaná je vhodná k dalšímu využití a obsahuje vysoký podíl uhlíku v obsahu. [6]

Jednotky, které jsou nyní k dispozici mají provozní kapacitu na zpracování od 250 kilogramů materiálu za hodinu do dvou tun za hodinu. První jednotka byla umístěna a připravena na zkušební provoz u obce Velká Dobrá v okrese Kladno, kde měla zvládat zpracovávat 250 kg odpadu za hodinu a sloužit především jako demonstrace pyrolýzní technologie pro veřejnost. K provozu jednotky nakonec nedošlo vzhledem k zamítnutí žádosti o další stavební povolení vedením obce a jednotka byla přemístěna. Obyvatelé obce měli obavy o negativní vliv jednotky na okolní životní prostředí a podepsali petici proti budování jednotky na zpracování pneumatik. [30]

5.1.2 Tarpo spol. s.r.o.

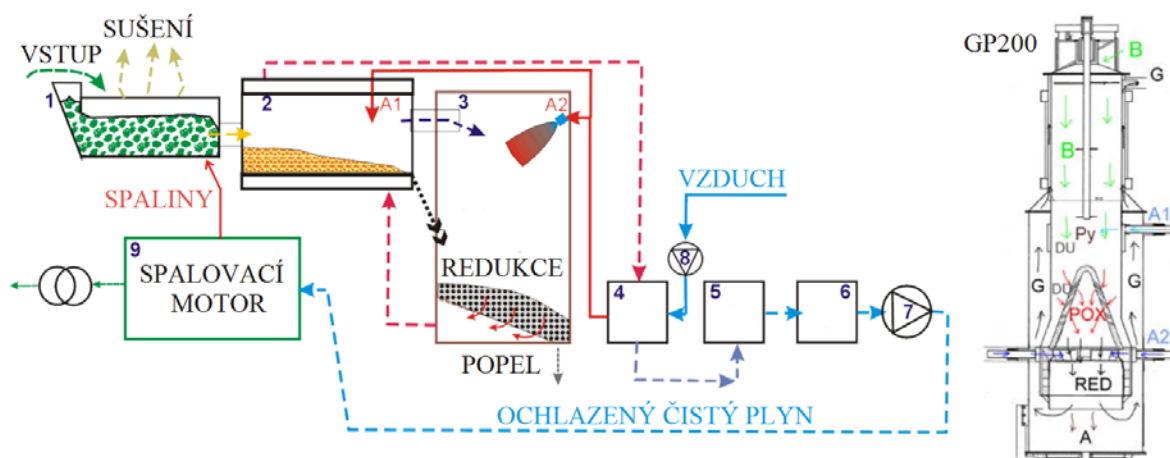
Společnost Tarpo spol. s.r.o. z Kněževsi se od roku 2006 specializuje na vývoj technologie zplyňování dřevní biomasy. Jejich generátory produkují plyn s nízkým obsahem dehtu vhodný pro pohon k tomu přizpůsobených spalovacích motorů kogeneračních jednotkách. Generátory plynu zpracovávají dřevní materiály předem nadrcené a vysušené ve fluidní pásové hrabicové sušárně. [32]

V roce 2010 zahájila společnost rozvoj konceptu vícestupňového zplyňování biomasy, který spočívá na rozdělení výrobního procesu plynu na pyrolýzu, oxidaci a následnou redukci uhlíkatého zbytku. Každá část procesu probíhá v odděleném prostoru

generátoru, což přináší výhodu například v tom, že při pyrolýze vzniklé prchavé hořlaviny je možné konvertovat na směs plynu a tím lze omezit tvorbu dehtu při následném zplyňování. [32]

V pyrolýzní části generátoru, konkrétně v pilotním souproutém s označením GP200, je vysušené dřevo zahříváno v rozsahu teplot 450 – 500 °C a dochází k uvolnění prchavé hořlaviny. Jako zdroj tepelné energie pro pyrolýzní reakci slouží zahřátý vzduch z oxidace i redukce, který proudí kolem vnější stěny pyrolýzéro. Zároveň do reakce přivádí teplo vedením speciální keramický kužel, který dělí oblast pyrolýzy od oblasti oxidace. [33]

Prchavá hořlavina je odváděna do parciálně oxidační komory uvnitř kužele, kde nastane dokonalé smísení s přivedeným zplyňovacím vzduchem a proběhne oxidace při teplotách nad 1200 °C. Horké spaliny s vysokým obsahem vodíku, vody, oxidu uhličitého a uhelnatého vstupují po oxidaci k redukčnímu uhlíkovému loži, kde se ochlazují endotermní zplyňovací reakcí pod teplotu 700 °C. Poté prostupují roštem do pláště generátoru, dodávají teplo pyrolýze a pokračují k dalšímu dochlazení. [33]



1 – vstup a sušení materiálu, 2 – pyrolýzní část generátoru, 3 – parciálně oxidační část,
4 – chlazení plynu zplyňovacím vzduchem, 5 – čištění plynu horkými rukávovými filtry,
6 – chlazení plynu, 7 – plynové dmychadlo, 8 – vzduchové dmychadlo, 9 – spalovací motor

Py – oblast pyrolýzy, *POX* – oblast parciální oxidace, *RED* – redukční oblast

Obrázek 18: Schéma vícestupňového plynového generátoru Tarpo GP200 [33]

Nejvýkonnějším a zároveň nejrozšířenějším generátorem vyvinutým touto společností je jednotka s označením GP750 schopná produkovat plyn až v 1200 m³/h. Takto produktivní reaktor postačí pro provoz spalovacích motorů s elektrickým výkonem do 750 kW. [32]

Umístění	Typ generátoru zahájen provoz	Způsob čištění plynu - filtry	Typ spalovacího motoru	Elektrický výkon/účinnost
Kněžves	GP200 / 2012	Keramické	ČKD 6S160 27 1	200 kW / 27 %
Odry	2xGP500 / 2012	Keramické	Jenbacher J316 48 1	2x500 kW / 32 %
Olešnice	GP200XL / 2014	Rukávové	ČKD 6S160 27 1	200 kW / 27 %
Handlová (SK)	2xGP750 / 2014	Keramické	Guascor	570 + 430 kW / 32 %
Dobříš	GP750 / 2015	Rukávové	Guascor FBLD560	650 kW / 32 %
Kozomín	5xGP750 / 2014	Keramické	Jenbacher J320 60 1	3x710 kW / 32 %

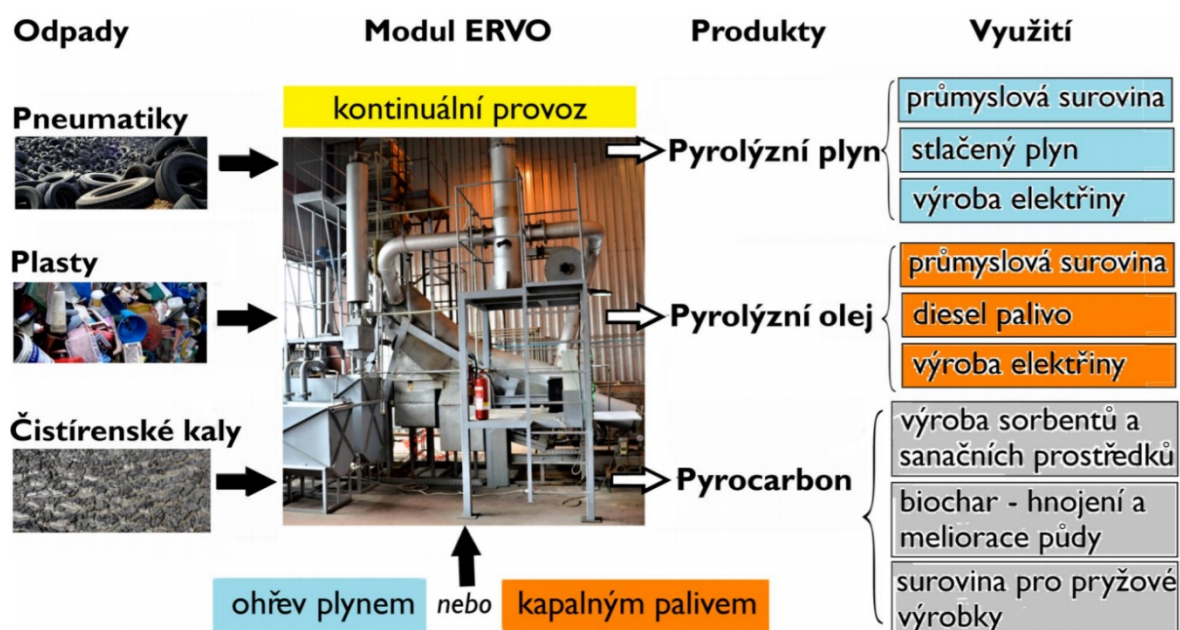
Tabulka 5: Přehled generátorů pracujících na základě procesu Tarpo [33]

5.1.3 Technologie Ervo EnviTech

Jednou z patentovaných technologií na termické zpracování odpadů v České Republice, konkrétně CZ 31 153 U1 jako Užité vzor, je Ervo EnviTech, řízená kontinuální multicyklická pyrolýza realizovaná v Mostě. Technologie se dle slov vývojářů jeví jako zisková, a to z výnosů z distribuce plynného, kapalného a pevného produktu. Přepokládá se návratnost investice o jednotky do 36 měsíců, ale záleží samozřejmě i na průběhu jejího provozování. [34]

Jednotka je konstruovaná na zpracování použitých pneumatik, odpadních plastů a kalů z čističek odpadních vod. Reaktor dokáže depolymerizovat polyetylen, polypropylen a polystyren, což jsou látky, které představují až 70 % objemu plastového komunálního odpadu. Přínosem jednotky je i možnost depolymerizovat PET – lahve, pro ty je ale stále ekonomicky výhodnější vytrídění z odpadu a následná recyklace. [34]

Jednotka je po jejím prvním rozběhu energeticky soběstačná, neboť jako zdroj tepla nutného pro její provoz jsou její samotné pyrolýzní produkty, především pyrolýzní plyn. Na první rozběh jednotky jsou využity lehké topné oleje. Reaktor dokáže denně zpracovat 5 – 7 t vsazeného materiálu, kdy na takové množství připadá spotřeba elektrické energie v základní konfiguraci 15,7 kW. Větší množství elektrické energie spotřebují přídatná zařízení jako je drtič materiálu, filtr a bloky na čištění surovin, a to konkrétně 43,2 kW. Pro jednotku navíc není nutné být v neustálém spojení se zdrojem vody, neboť oběhová voda v objemu 5 m³ v zařízení slouží pouze jako chlazení a je doplňována jednou měsíčně maximálně o objem 1 m³. Roční spotřeba vody je tedy přibližně 12 m³. Odpadní voda v jednotce nevzniká a volná plocha nutná pro montáž zařízení je 8 x 45 m. [34]



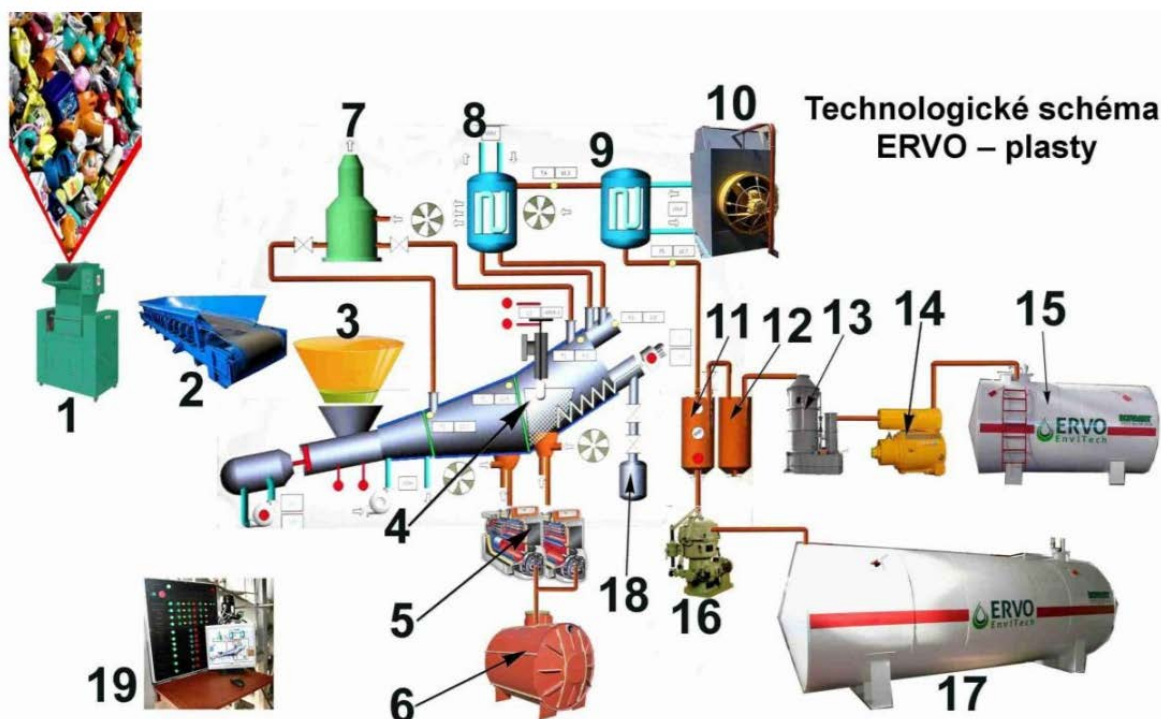
Obrázek 19: Schéma vstupů a výstupů technologie Ervo [34]

Výstupem z jednotky po vsazení a reakci s plastovými odpady je tekutá, plynná a pevná frakce. Z jedné tuny plastů lze získat až 850 kg tekutého alternativního paliva s obsahem 70 % aromatických uhlovodíků v objemu. Plyn je částečně využíván jako zdroj tepla pro samotnou pyrolytickou reakci a k tomu nevyužitý zbytek může být stlačován, skladován a případně dál zpracováván v petrochemickém průmyslu. Kvalita pevné frakce závisí na čistotě vstupní suroviny, většinou ale obsahuje směs minerálních odpadů a popela. [34]

Výstupní surovina	plasty	pneumatiky
Tekutá frakce	75 – 80%	35 – 40 %
Plyn	12 – 18 %	12 – 15 %
Popel	do 2%	0
Uhlík	0	35 – 40 %
Ocelový kord	0	5 – 18 %

Tabulka 6: Produkty z jednotky při ekologické recyklaci druhotných surovin (v %) [34]

Samotná pyrolýza v reaktoru probíhá za doby zdržení materiálu 4 – 6 s při teplotě 500 – 800 °C. Teplu reaktoru dodávají z jeho vnější strany plynové hořáky, které vyvíjí teplotu až do 1500 °C. Provozní tlak v reaktoru se pohybuje do hodnoty 1 kg / cm². [34]



- 1 – drtič plastů, 2 – nakládka drčených plastů do zásobníku, 3 – zásobník, 4 – reaktor, 5 – hořáky, 6 – nádrž s topným olejem pro hořáky, 7 – komín, 8 – depolymerizační paroplynový blok, 9 – chlazení paroplynové směsi, 10 – chladič věž, 11 – prvotní akumulaci rozdělovací nádrž pro depolymerizační plyn a kapalnou frakci, 12 – přechodná nádrž pro depolymerizační plyn, 13 – plynová pračka a sušička, 14 – kompresor, 15 – nádrž pro stlačený plyn, 16 – filtr pro čištění a sušení kapalnou frakci, 17 – cisterna pro skladování kapalného alternativního paliva, 18 – kontejner pro pevný zbytek depolymerizačního procesu, 19 – řídicí systém

Obrázek 20: Schéma zpracování odpadních plastů technologií Ervo [34]

5.1.4 Eviko s.r.o.

Elektrárna vyvinutá společností Eviko s.r.o. využívá technologii pyrolýzy a následného zplyňování biomasy k výrobě plynu do spalovacích motorů pohánějících generátory elektrické energie. Vývojáři v dostupných zdrojích uvádí, že celková účinnost soustavy je nejméně 65 %. Zařízení je schopné do 22 kV sítě dodávat elektrický výkon až 600 kW. Vstupním materiálem do reakce je v tomto případě dřevní štěpka s frakcí 20 – 50 mm a vlhkostí 15 – 50 %. [35]

Materiál je šnekovým dopravníkem ukládán do rotačního podavače, který zajišťuje plnění reaktoru a zároveň vytváří neprodyšné těsnění zabráňující nasávání vzduchu do reakčního prostoru. Samotný pyrolyzátor je soustavou trubkových reaktorů ve dvou

stěnách, z nichž každá obsahuje tři trubkové reaktory z žáruvzdorných ocelí. Teplo je reakci dodáváno prostřednictvím dvou elektrických topných těles s příkonem 180 kW uložených pod každým reaktorem. Takto zajištěný ohřev je velmi přesný a dobře regulovatelný. Skříň sestavy reaktoru je chráněná proti energetickým ztrátám tepelně izolačním kompozitním materiálem. Součástí skříňe jsou i motory s převodovkami pro pohon šneků v trubicích reaktorů. [35]

Materiál je ve šnekových trubkách rozkládán na procesní plyn a tuhý zbytek za působení teploty 950 °C. Materiál je dávkován rychlostí 750 – 1000 kg / h a pyrolýzní plyn vzniká s produktivitou 650 m³ / h. Odpadní pevnou frakci odvádí šnekový podavač přes dvojitou klapku do zásobníku popela s kapacitou 300 kg umístěného ve spodní části reaktoru. Vyprodukovaný popel tvoří 0,5 až 5 % z celkového objemu spotřebované biomasy. [35]

Plyn po výstupu z reaktoru prochází cyklonovým odlučovačem prachových částic a ve výměníku je následně ochlazen za vzniku střednětlaké páry, která zpětně napomáhá reakci při rozkladu materiálu v reaktoru. Následně je plyn odsířen a za pomoci metanizačního reaktoru je snížen obsah vodíku a zvýšen obsah metanu v něm, s čímž roste i výhřevnost plynu. Po zchlazení plynu ve vodní sprše je odsáván dmychadly do kogeneračních jednotek. [35]

5.1.5 Hoks Industry a.s.

Společnost Hoks Industry a.s. se snaží o vybudování pyrolýzní jednotky do areálu společnosti Datafish Ostrava s.r.o. ve Vratimově. Zařízení by mělo sloužit ke zpracování odpadních pneumatik. Jednání ale čelí velkému odporu ze strany obyvatel, kteří mají obavy o zhoršení stavu okolního životního prostředí. [36]

Celková kapacita výrobní jednotky Hoks TS 500					
(celkem 5 výrobních jednotek)					
Vstupní produkt			Výstupní produkt		
	Pneumatiky (ks)	Pneumatiky (kg)	Pyrolýzní olej (litr)	Uhlíkatá drť (kg)	Ocelový kord (kg)
1 cyklus	250	2 500	555	1 750	250
12 cyklů / den	3 000	30 000	6 690	21 000	3 000
335 dní / rok	1 005 000	10 050 000	2 240 805	7 035 000	1 005 000

Tabulka 7: Hlavní technologické parametry zařízení [36]

Vstupem do zařízení mají být primárně pneumatiky. Dále je třeba k chodu jednotky připojení ke zdroji užitkové vody, hlavně pro zprovoznění chladicího systému na zkapalnění

plynů a doplnění výparů v chladiči. Je třeba zajistit i připojení ke zdroji elektrické energie, potřebné pro pohon zařízení technologické link. Dále je třeba napájet zabezpečovací techniku. Celková spotřeba elektrické energie na den je stanovena na 1 476 kWh. [36]

5.2 Významné pyrolýzní jednotky aplikované v průmyslu ve světě

5.2.1 Proces Ebara

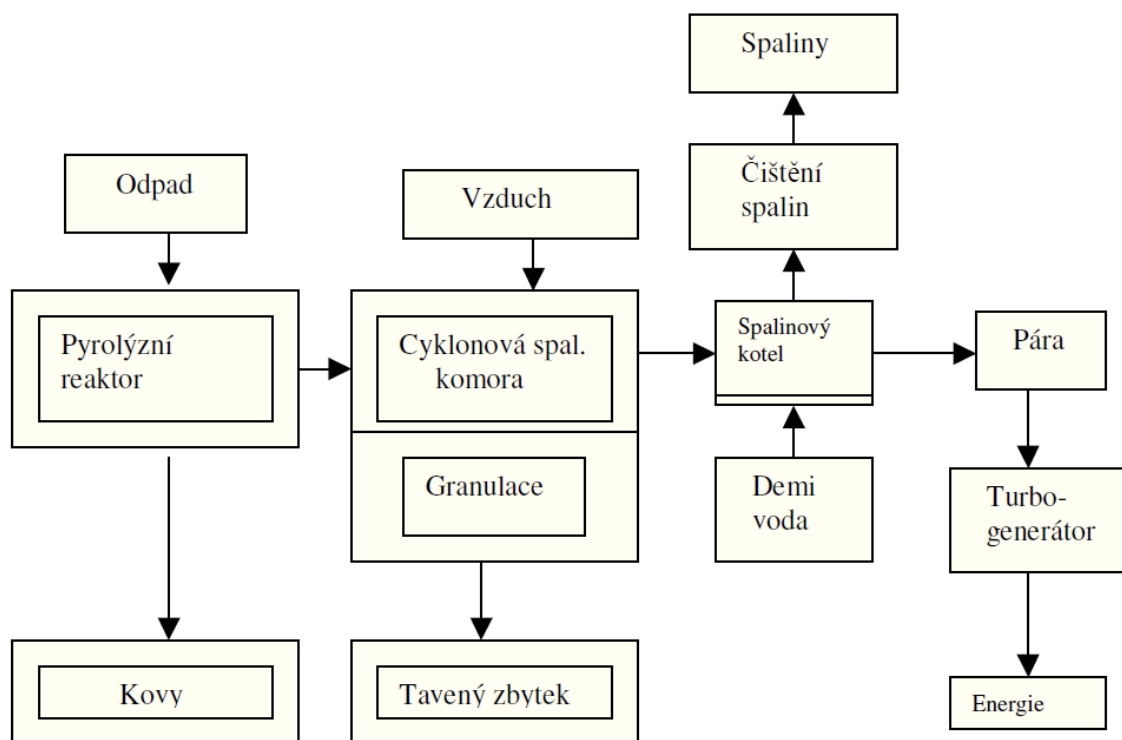
Japonská technologie Ebara se stala modelem pro spoustu průmyslových aplikací ve zpracování odpadů a dá se říct, že jde o nejčastěji využívaný proces, proto je nutné ho zmínit. Postup Ebara, označovaný i jako Twin – Rec je koncipován jako kombinace dvou sice starších, ale funkčních technologií, a to stupněm s fluidní vrstvou s vnitřní cirkulací a stupněm s tavením popílku. [14]

V pískovém fluidním loži v rozsahu teplot 500 – 600 °C probíhá pyrolýza hrubě nadrceného odpadu. Těžší nespalitelné pevné zbytky propadají ve fluidním loži níže a písek zajistí, že materiál odchází mimo reakční prostor. Fluidní lože se po separaci od unešeného materiálu opět vrací do reakčního prostoru. [14]

Nízká provozní teplota má v této technologii výhodu v tom, že poměrně šetrnou cestou získáme ze vsazeného materiálu ve velkém množství kovy, jako je například hliník, který se s v tomto teplotním rozsahu neroztaví.

Získaný plyn spolu s popílkem a částicemi koksu odchází z reakčního prostoru do cyklonové spalovací komory, kde je za vysoké teploty spalován. Odstředivá síla cyklonu zajistí, že dochází k oddělování roztaveného popílku a ten ulpívá na stěnách reaktoru. Popílek později odchází jako tekutá struska do spodní části reaktoru, kde je ochlazen a vitrifikován. Horké spaliny vstupují do spalínového kotle, kde vznikne pára využitelná například k výrobě elektrické energie. Ochlazené spaliny se dále čistí a uvolňují do ovzduší. [14]

Proces je uzpůsobený pro zpracování směsného komunálního odpadu, plastů a odpadních kovů. Pilotně vznikly dvě fluidní jednotky, jedna oxidační. Konečným produktem je energie. Kapacita pro zpracování 4 tun materiálu za hodinu připadá na první fluidní jednotku v umístění Yokohama, Japonsko. Druhá fluidní jednotka je koncipována na zpracování 135 kilotun materiálu za rok v umístění Aomori, Japonsko. [14]

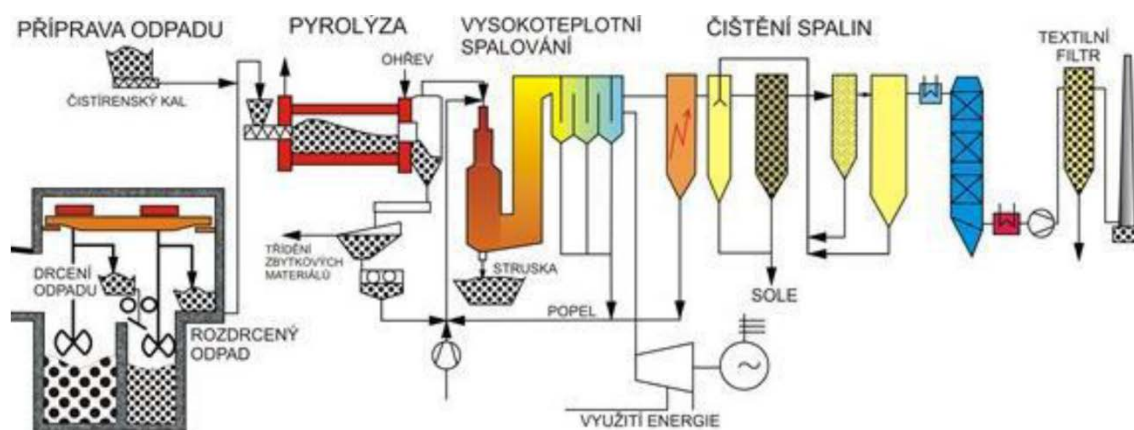


Obrázek 21: Schéma procesu Ebara [14]

Jde o zajímavý proces, který splňuje všechny emisní limity. V roce 2008 bylo v provozu šest zařízení s celkem 16 linkami na zpracování směšného komunálního odpadu. Další tři zařízení byly specializovány na různé druhy odpadů a jedno bylo konstruováno na získávání tavené mědi ze vsazeného materiálu. První zařízení je v provozu už od roku 2000 a zvládá zpracovat téměř každý druh odpadu. [14]

5.2.2 Proces Schwel – Brenn - Verfahren

V německém Furthu byla kolem roku 2000 realizována pyrolýzní jednotka na zpracování směšného komunálního odpadu. Kapacita pro její roční zpracování je 100 kt. Technologie je založená na patentu společnosti Siemens z roku 1988, pracuje tedy podobně jako pilotní laboratorní jednotka procesu KWU zmíněná výše. [5], [14]



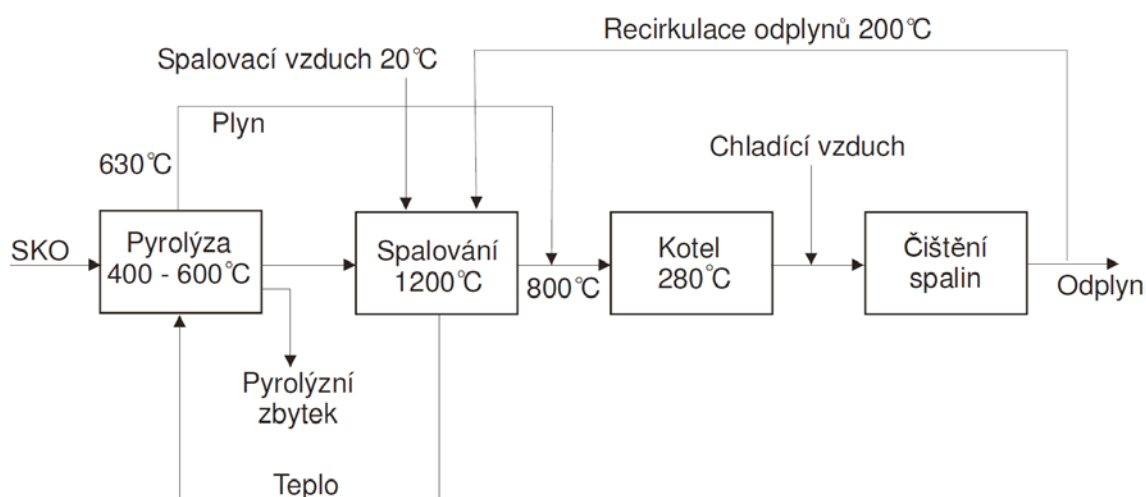
Obrázek 22: Schéma technologie Schwel – Brenn - Verfahren [5]

Srdce procesu tvoří rotační pec, do které vstupuje předupravený materiál, konkrétně rozdrčený směsný komunální odpad spolu s kalem z čističek odpadních vod. Směs je nepřímo zahřívána na 450 °C. Po výstupu z reaktoru se z pevného zbytku vytrídí sklo, kamení a kovy. Pyrolýzní plyn je v rozmezí teplot 1200 – 1300 °C spalován s přísadou tuhého zbytku a popelovin. Energie ze spalování je dále využívána k přeměně na elektrickou energii a teplo. Vzniklá struska při spalování je po granulaci vhodná třeba jako příměs do portlandských cementů. Spaliny vysokoteplotního spalování jsou po odsíření, denitrifikaci a adsorpčním čištění uvolněny do ovzduší. [5]

5.2.3 Technologie Babcock

Technologie navržena pro zpracování tuhého komunálního odpadu a kalů z čističek odpadních vod. Do provozu byla v roce 1984 v Burgau, Gunzburg, SRN, uvedena jedna pilotní jednotka a následně tři komerční. Pilotní jednotku tvořily dvě linky s kapacitou 3 tuny materiálu za hodinu. Rozšířená komerční jednotka pracující na základě procesu Babcock má kapacitu na zpracování 35 000 tun směsného komunálního odpadu za rok. [5], [14]

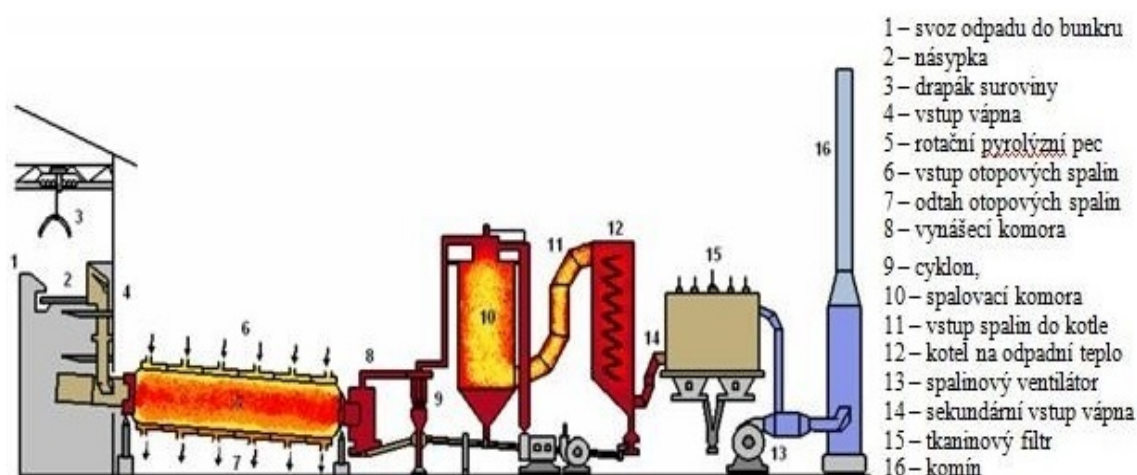
Samotný pyrolytický rozklad materiálu probíhá ve válcové nepřímo vyhřívané peci na teplotu v rozsahu 400 – 600 °C. Reaktoru dodávají teplo spaliny z řízeného hoření samotného výstupního pyrolýzního plynu ve spalovací komoře, kam se dostává po odchodu z reaktoru a vyčištění na cyklonových odlučovačích. [5]



Obrázek 23: Schéma provozních podmínek v procesu Babcock [14]

Teploty, při kterých je plyn v komoře spalován se pohybují kolem 1200 °C. Přebytečné teplo ze spalin z komory a reaktoru je soustředěno v kotli na odpadní tepelnou energii. Spaliny jsou čištěny suchou vápencovou metodou, kdy je vápno vsazeno ještě před samotnou reakcí ke vstupnímu materiálu do reakčního prostoru pyrolýzní jednotky. Vápno

v reakčním prostoru způsobí zvýšení hustoty koksu a naváže na sebe kyselou reagující složku, například HCl. Vápno se pro efektivnější čištění přimísí i do spalin před filtrací na tkaninovém filtru. Po filtraci jsou spaliny komínem odtaženy do ovzduší. [5]



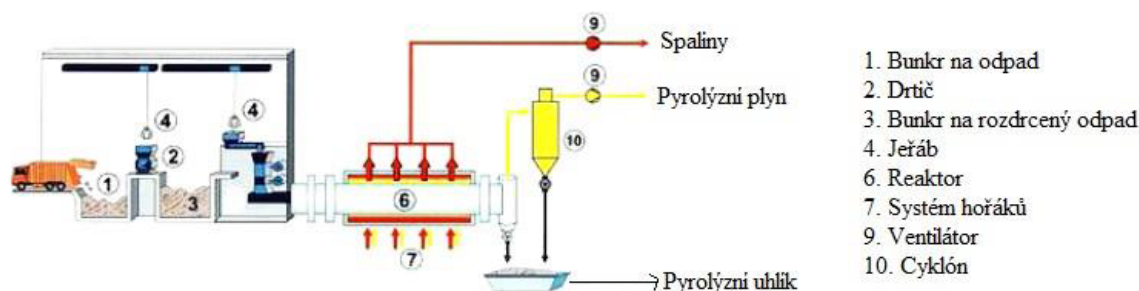
Obrázek 24: Schéma technologie Babcock [22]

5.2.4 Technologie Hamm

Pyrolyzní jednotka instalována v Německém Dortmundu jako doplněk třetího uhelného kotle elektrárny Westfalen. Jako vsázka se zde využívá nadrcená odpadní biomasa. Soustava dvou jednotek v elektrárně dokáže zpracovat 100 000 t materiálu ročně. V přepočtu na jednu hodinu zvládne jedna jednotka zpracovat 6,5 t odpadu. [37]

Reaktor tvoří rotační buben o průměru 2,8 m a délce 20 m. Pec je z vnějšku vyhřívána plynovými hořáky na teplotu 750 °C. Materiál se uvnitř rozkládá při teplotě kolem 500 °C. Doba zdržení materiálu v reakčním prostoru je 90 min. Na konci reaktoru končí dochází k separaci pyrolyzního plynu a tuhého zbytku. Pevná frakce je dále za pomoci síta rozdělena na jemnou a hrubou složku. Pyrolyzní plyn se dále čistí v cyklonovém odlučovači. Jemný uhlík se přimísí do uhlí a je následně rozemletý na uhelných mlýnech. Namletá směs spolu s čistým pyrolyzním plynem je vstřikována do uhelného kotle ke spalování a výrobě elektrické energie. [37]

Reaktor při zpracování 13 t materiálu za hodinu spotřebuje pro jeho ohřev plynovými hořáky směs 700 kg zemního plynu a 16 t vzduchu. Výstupem takové reakce je 9 t pyrolyzního plynu za hodinu. Produkce tuhého pyrolyzního uhlíku je 3,5 t / h. Kovových materiálů vhodných k recyklaci vzniká 1 t / h. Odsávací zařízení mechanismu ohřevu reaktoru za hodinu odsaje 17 t spalin. [37]

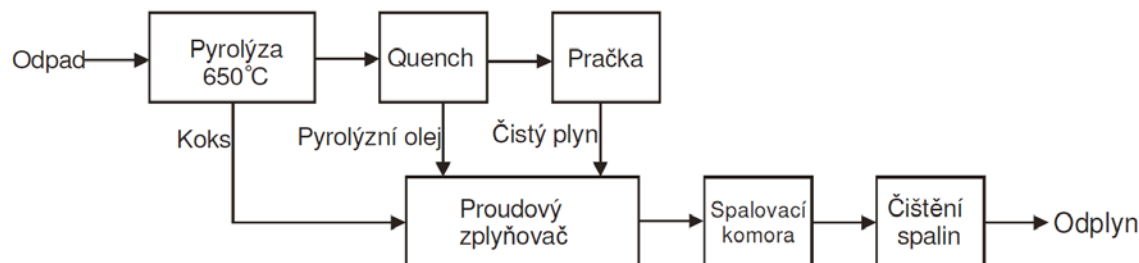


Obrázek 25: Schéma technologie Hamm [22]

5.2.5 Proces NOELL

Technologie zabývající se zpracováním rozdrčeného a vysušeného směsného komunálního odpadu. Pyrolýza vstupního materiálu probíhá v rotačním bubnu nepřímě zahříváném na teplotu 500 – 700 °C. Jednotka má kapacitu na zpracování 6 tun materiálu za hodinu. Umístění Salzgitter, SRN. [14]

Vznikající plyn je ochlazen ve quenchi a v alkalické pračce zbaven kyselých složek jako jsou HCl, H₂S a HCN. Všechny produkty pyrolýzy se poté přivedou do proudového zplyňovače, kde dochází za přístupu kyslíku při tlaku 35 bar a působení vysoké teploty v rozsahu 1300 – 1500 °C dochází k reakce na syntézní plyn, tedy směs CO + H₂. Syntézní plyn najde využití v chemickém průmyslu, nebo při výrobě energie. [14]



Obrázek 26: Blokové schéma procesu Noell [14]

5.2.6 Kobe - Steel

Firma Kobe - Steel v japonském městě Akroh realizovala na základě předchozích experimentů pyrolýzní jednotku na zpracování pneumatik. [14]

Reaktor tvořil rotační buben s nepřímým ohřevem na rozsah teplot 500 – 700 °C. Staré pneumatiky se před vstupem do reaktoru předupravují drcením na velikost 30 mm, poté je šnekový dopravník podává do reaktoru, který je profukován dusíkem. Materiál se v reakčním prostoru zdrží 20 minut. [14]

Pevný reakční produkt odvádí chlazený šnekový dopravník do chlazeného zásobníku, kde dojde k dochlazení na 50 °C. Z pyrolýzního plynu se separují výše vroucí

uhlovodíky, částice sazí a dojde k jeho ochlazení v quenchi pomocí vyprodukovaného zkondenzovaného oleje na 80 °C. Níže vroucí uhlovodíky uvolněné z plynu kondenzací lze spalováním využít jako zdroj tepla pro reaktor. Obsažený sirovodík v plynu byl separován v louhové pračce. [14]

Technologie byla několik let úspěšně provozována. Cílem bylo vyrobit kvalitní koks, který by uspěl na trhu. To se ale s časem neosvědčilo a vyrobený koks nakonec neuspěl ani po jeho aktivaci jako aktivní koks. Po několika letech firma Kobe – Steel výrobu koksu zastavuje z ekonomických důvodů. [14]

5.2.7 Technologie Char Oil Energy Development

Technologie COED je koncipována ke zpracování vysušeného a jemně namletého uhlí. Proces probíhá ve čtyřstupňovém fluidním systému. V prvním stupni se využívá rozsah teplot 300 – 350 °C, poté 450 °C, následně 540 °C a ve čtvrtém stupni 870 °C. Čtvrtý reaktor slouží jako spalovna polokoksu za účelem získání tepla pro druhý a třetí stupeň. Doba zdržení materiálů v jednotlivých stupních reaktoru závisí na vlastnostech vsázky a podmínkách procesu. Plynná frakce je po výstupu z jednotky ochlazená. Ze vzniklého dehtu jsou odfiltrovány zbytky pevné složky a následně je pomocí katalyzátoru hydrogenován na syntetickou ropu. V pračkách na je zbylá plynná fáze zbavena NH₃ a H₂S. Dále je část plynu využívána k topení a zbytek slouží při výrobě vodíku k hydrogenaci dehtu. [5]

5.2.8 Technologie RCP

Pyrolýzní jednotka fungující na principu rychlého průběhu reakce rozkladu komunálního odpadu. Doba zdržení materiálu v reakčním prostoru je regulována roštem v závislosti na aktuálním složení vsázky a požadovaných produktech. Anorganické složky se vlivem vysokých teplot okolo 1400 °C přeměňují na strusku, která se dále upravuje a ve výsledku přimísí do cementu. Plynná frakce je po výstupu z reaktoru chlazená na 1000 °C a zbavena částic prachu v odlučovači. Suchou vápencovou metodou dojde k odsíření zchlazeného plynu a k denitrifikaci vlivem selektivní nekatalytické redukce. Plyn je ještě následně zbaven těžkých kovů v kyselých pračkách. [5]

6 Vlastní postřehy a vize autora

V dřívějších dobách, kdy byla pyrolýza aplikována při zpracování uhlí, bylo cílem získat maximální možné množství tuhého polokoksu a poté až kapalných produktů, které se dále zpracovávaly do stavu použitelných pohonných hmot. Z uvedených informací o vybraných pyrolýzních jednotkách vyplývá, že při většině dnes fungujících procesů je snaha nastavit provozní podmínky průběhu reakce tak, aby byla nejzastoupenějším produktem ve výstupu kapalná frakce. Nejpreferovanějším a nejvyužívanějším postupem je tedy dle dostupných zdrojů rychlá pyrolýza, kdy je omezen vznik sekundárních reakcí, výtěžky kapalných produktů jsou tak maximální a produkce tuhého zbytku je omezena. Předností několika uvedených pyrolýzních jednotek je, že jejich vyprodukovaný pyrolýzní plyn zajišťuje energetickou soběstačnost procesu tím, že je spalován plynovými hořáky za účelem dodání tepla samotné pyrolytické reakci.

Velkou výhodou produktů pyrolýzy je jejich trvanlivost a možnost je skladovat. Pyrolýzní plyn se obvykle stlačuje do tlakových lahví a pyrolýzní olej stáčí do barelů, kde vyčká na své další zpracování a využití. Oproti tomu konvenční spalovna odpadů vyrábí pouze tepelnou energii, kterou je třeba ihned po jejím vzniku spotřebovat. Výhodné řešení je i přímá přeměna reakčních produktů ve spalovacích motorech kogeneračních jednotek za vzniku elektrické a tepelné energie.

Komplikací v rozvoji této technologie a především v uvádění pyrolýzních jednotek do praxe je, že se tomuto charakteristickému procesu stále nedostalo úpravy v Evropské legislativě. Úřady stále nahlíží na pyrolýzní technologii jako na konvenční spalování a pro vybudování pyrolýzní stanice je nutné splnit náročné požadavky, téměř stejné jako pro schválení výstavby spalovny. To znesnadňuje práci potenciálním investorům i vývojářům těchto technologií, což má za následek omezení rozvoje.

Moje vize, jak by mohla být pyrolýzní technologie při zpracování odpadů v budoucnosti využívána je taková, že by i v malé obci mohla fungovat pyrolýzní jednotka, která by dokázala pokrýt lokální produkci odpadů. Bylo by tak splněno, že bude odpad zlikvidován bez drahé a zdlouhavé přepravy na odlehlé skládky a spalovny. Zároveň by byl rozkladem odpadu zajištěn vznik látek energeticky bohatých, které by bylo možné na místě využívat k výrobě elektrické a tepelné energie v kogeneračních jednotkách, nebo je vyvážet k dalšímu zpracování, případně prodeji do petrochemického průmyslu. To celé by snížilo závislost dané obce na dodávkách elektřiny a tepla z jiných zdrojů a přispělo by to k její energetické soběstačnosti.

Umístění pyrolýzní jednotky by díky zabezpečenému provozu nemuselo být daleko od centra obce. Šíření zápachu v okolí pyrolýzní jednotky je technologicky zabráněno a většina dnes funkčních zařízení splňuje s velkou rezervou emisní i hlukové limity.

Doporučený rozsah této práce bohužel neumožňuje detailní popis a porovnání většího množství nyní provozovaných funkčních zařízení. Ze shromážděných informací v této rešeršní práci je ale stále zřejmé, že pyrolýzní technologie se v posledních letech více zkoumá a vyvíjí. Například její aplikace ve zpracování odpadů je do budoucna významným tématem, neboť je jen otázkou času, kdy dojde k zákazu skládkování směsného komunálního odpadu a bude nutné začít technologie termických rozkladů naplno využívat i v tomto směru.

Na následujících stranách se nachází rozšířený tabulkový přehled dohledatelných základních parametrů pyrolýzních jednotek využívaných v praxi. Ze shromážděných dat je dobře vidět, že k největšímu rozvoji pyrolýzních jednotek a celkově termického zpracování odpadů a biomasy dochází v Německu, Rakousku, Japonsku, Kanadě a USA. K významnému vývoji těchto technologií dochází v posledních letech ale i u nás v České Republice.

Označení jednotky	Rok zprovoznění	Umístění	Typ reaktoru	Typ ohřevu	Zpracovávaný materiál	Využití produktů
Dynamotive Energy Systems		Ontario / Kanada	fluidní lože	fluidním ložem	dřevěný odpad	výroba elektriny / tepla
Dynamotive Energy Systems	2007	Toronto / Kanada	fluidní lože	fluidním ložem	dřevěný odpad	výroba elektriny / tepla
Ensyn Corporation		Ottava / Kanada	fluidní lože	fluidním ložem	biomasa	výroba energie
Waterloo University		Waterloo / Kanada			odpadní plasty	výroba topných olejů a plynů
Rapid Thermal Process		Kanada			odpadní dřevě	produkce paliv
West Virginia University		West Virginia / USA	fluidní lože		výbráné druhy odpadů	výroba energie
Metso - Minerals Pyro Systems		USA	rotační pec	neřípný / plynové hořáky	pneumatiky	
Bal - Pal		USA			organický odpad	horký plyn, zbytkový uhlík
Tsukishama Kikai		Fumabashi / Japonsko	dvě fluidní jednotky		odpadní plasty	
Kobe Steel		Japonsko	rotační pec		pneumatiky	
Mitsui Petrochemical Industries	1971	Tokio / Japonsko	pevné lože		odpadní plasty	výroba topných olejů
Fuji		Aoi / Japonsko			odpadní plasty	produkce paliv
Tianjin		Tianjin / Čína	šnekový		kommální odpad	
Jingcheng		Indie	pevné lože		pneumatiky	
Nexus			pevné lože		kommální odpad	
Thide Environment			pevné lože		kommální odpad	
Proces Ebara			rotační pec		kommální odpad	
Union Carbide			fluidní lože	neřípný	kommální odpad	
Bergau	1992		rotační pec		tuhé alternativní palivo	výroba vosků
Rowitec			skloněná fluidní vrstva		tuhé alternativní palivo	
Compact Power			trubkový reaktor		tuhé alternativní palivo	výroba elektrické energie
SWERF					tuhé alternativní palivo	
Waste Gen			rotační pec	neřípný	tuhé alternativní palivo	spalování
Energos			dvoustupňový		tuhé alternativní palivo	
LUGRI/FZK					tuhé alternativní palivo	
COED					fluidním ložem / plynové hořáky	zplyňování / pohonné hmoty
Klean Industries TPP			rotační pec + fluidní lože	neřípný / plynové hořáky	uhlí	výroba vodíku, syntetická ropa
Jiangyin Xinda MachineryCo.,Ltd			depolymerizace		pneumatiky	3 MW elektrické energie
Xinxiang Huayin			rotační pec		pneumatiky	
Hanocorp - Pyrogen			pevné lože		pneumatiky	

Tabulka 8a: Přehled základních parametrů pyrolyzních technologií z praxe

Označení jednotky	Velikost částic	Zpracované množství	Provozní teplota	Provozní tlak	Čas zdržení	pyrolyzní olej	pyrolyzní plyn	tuhý zbytek
Dynamotive Energy Systems		100 t / den						
Dynamotive Energy Systems		200 t / den						
Ensyn Corporation		200 t / den						
Waterloo University			500 - 700 °C					
Rapid Thermal Process		4 000 kg / h						
West Virginia University								
Metso - Minerals Pyro Systems	50 mm	100 kg / h	450 °C			25%	33%	31 % + 11 % ocel
Bal - Pal								
Tsukishama Kikai		3 x 6,25 t / h						
Kobe Steel		200 kg/h	500 - 800 °C		20 min	70%		30%
Mitsui Petrochemical Industries		36 t / den	400 - 500 °C			85%	5%	10%
Fuji		500 kg / h						
Tianjin		5 t / den						
Jingcheng	celé		větší než 400 °C			35 - 45 %	12 - 15 %	30 - 40 % + ocel
Nexus			500 °C				65%	35%
Thide Environment								
Proces Ebara		4 t / h	500 - 600 °C					
Union Carbide								
Bergau								
Rowitec	400 mm	300 000 t / rok						
Compact Power		500 kg / h						
SWERF								
Waste Gen								
Energos								
LUGRI/FZK								
COED								
Klean Industries TPP	celé	100 t / den	430 °C					
Jiangyin Xinda Machinery Co., Ltd	větší než 50 x 50 mm	20 000 tun / rok				45 - 50 %	5 - 7 %	35 - 38 % + ocel
Xinxiang Huayin	0,75 x 1,2 m	10 t / den	350 - 450 °C			45 - 50 °C	5%	25 - 30 % + ocel
Hanocorp - Pyrogen		15 t / den	větší než 400 °C			5 % + 30 % palivo	5%	40 % + ocel

Tabulka 8b: Přehled základních parametrů pyrolyzních technologií z praxe

Označení jednotky	Rok zprovoznění	Umístění	Typ reaktoru	Typ ohřevu	Zpracovávaný materiál	Využití produktů
Destrugas von Kroyer	1971	Dánsko	šachtová pec		kommální odpad	
Welman International		Velká Británie			odpadní biomasa	produkce paliv
Voest Alpine		Linec / Rakousko	šachtová pec	neřímý	výbrané druhy odpadů	spalování, výroba páry
Termoselect		Verbánie / Itálie	rotační pec		tuhé alternativní palivo	
BTG Genting Group		Enschede / Holandsko	kuželový osifredivý	fluidním ložem	slupky plodů palmy	
KPA	1982	Aal / Německo	rotační pec	ohřev zevnitř		elektrická energie
VEW		Hamm / Německo	rotační pec			výroba výhřevných látek
Noell		Salzgitter / Německo	rotační pec	neřímý	kommální odpad	výhřevné látky, energie
Carbo V		Freiberg / Německo			odpadní biomasa	výroba bionafy
Master-12, Maxi-09, Mini-05		Meinerzhagen / Německo	rotační pec		pneumatiky, kabely, plasty	elektrická energie, teplo
KWU - SBV Siemens		Ulm Wieblingen / Německo	rotační pec		kommální odpad	
BASF		Ludwigshafen / Německo	míchavý reaktor		výbrané druhy odpadů	výroba oleje a plynu
Hamburg		Německo	fluidní lože	neřímý		výroba oleje a plynu
DAL		Plaidt u Koblenz / Německo	rotační pec	neřímý	pneumatiky, kommální odpad	
MVU		Německo	rotační pec		pneumatiky, odpadní plasty	
Deutsche Reifen Pyrolyse	1984	Německo	fluidní lože		pneumatiky, odpadní plasty	
Babcock BKMI	1984	Gumzburg / Německo	rotační pec	neřímý	kommální odpad	výroba biopaliv glycerol
Karbotech		Česká Republika			odpadní biomasa	výzkum
Pyrotronic	2005	Ostrava / Česká Republika	šnekový reaktor	neřímý, elektrické topné těleso	kommální odpad	výzkum
Promatic 50	2008	Ostrava / Česká Republika	šnekový reaktor	neřímý / plynovými hořáky	kommální odpad	výzkum
Pyromatic 250	2011	Ostrava / Česká Republika	šnekový reaktor	neřímý / plynovými hořáky	kommální odpad	výzkum
Pyrolun		Ostrava / Česká Republika	vícestupňový reaktor	neřímý	kommální odpad	výroba paliv
PolyComp	2010	Česká Republika	extruder	neřímý	tuhé alternativní palivo	
Agmeco LT		Praha / Česká Republika	šnekový reaktor	neřímý / plynovými hořáky	pneumatiky	výroba paliv
Tarpo	2006	Kněžves / Česká Republika	vícestupňový reaktor	neřímý	odpadní dřevo	kogenerační jednotky
Ervo EnviTech		Most / Česká Republika			odpadní plasty	výroba paliv
		Most / Česká Republika			pneumatik	výroba paliv
Eviko		Česká Republika		trubkové reaktory		kogenerační jednotky
Hoks Industry		Ostrava / Česká Republika				

Tabulka 8c: Přehled základních parametrů pyrolyzních technologií z praxe

Označení jednotky	Velikost částic	Zpracované množství	Provozní teplota	Provozní tlak	Čas zdržení	pyrolyzní olej	pyrolyzní plyn	tuhý zbytek
Destrugas von Kroyer		250 kg / h	900 °C		24 h			
Welman International		250 kg / h						
Voest Alpine		0,65 t / h	500 - 700 °C					
Termoselect								
BTG Genting Group		50 t / den						
KPA		3 t / h						
VEW		100 000 t / rok					70%	30%
Noell		6 t / h	650 - 700 °C	35 bar				
Carbo V		1500 kg / h						
Master-12, Maxi-09, Mini-05		2 000 kg / h						
KWU - SBV Siemens			700 °C					
BASF		1,7 t / h	400 °C					
Hamburg		20 - 60 kg / h + 0,5 t / h	600 - 900 °C			40 - 60 %		
DAL		2 t / h						
MVU		200 kg / h	650 °C					
Deutsche Reifen Pyrolyse		1 t / h	700 - 800 °C					
Babcock BKMI		2 x 3 t / h	400 - 600 °C					
Karbotech								
Pyrotronic		5 kg / h						
Promatic 50		50 kg / h	500 - 800 °C		20 - 80 min			
Promatic 250		250 kg / h	500 - 800 °C					
Pyrolun		1 - 24 tun / den	500 - 600 °C			65 - 85 %		
PolyComp		20 kg / h	500 - 650 °C					
Agmeco LT	40 mm		510 °C					
Tarpo			700 °C				1 200 m ³ / h	
Ervo EnviTech		5 - 7 t / den				75 - 80 %	12 - 18 %	do 2 %
		5 - 7 t / den				35 - 40 %	12 - 15 %	0% + ocel
Eviko	20 - 50 mm	750 - 1000 kg / h					650 m ³ / h	
Hoks Industry						20%		75%

Tabulka 8d: Přehled základních parametrů pyrolyzních technologií z praxe

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s možnostmi aplikace pyrolýzní technologie při zpracování odpadů a stručně a přehledně uspořádat shromážděné informace o vybraných funkčních pyrolýzních jednotkách provozovaných v laboratorních podmínkách a průmyslovém měřítku.

První kapitola přehledně informuje o výsledcích statistiky produkce a nakládání s odpady v České Republice z minulých let. Na základě toho motivuje k většímu využívání materiálově – energetického zpracování odpadů, které se v posledních letech rozvíjí. Do této kategorie spadá právě i pyrolýza, kterou se tato práce v následujících kapitolách zabývá.

Druhá kapitola vysvětluje základní funkční princip pyrolýzy, jaké fyzikální a chemické jevy se při jejím průběhu odehrávají a jakou úlohu měl tento proces v průmyslové historii. Dále druhá část textu naznačuje, jak lze pyrolýzní reakci rozdělit dle jejích provozních parametrů jako je teplota a tlak v reakčním prostředí, nebo doba zdržení materiálu v reaktoru. V kapitole je naznačeno, jaký vliv a proč, mají tyto parametry na výslednou kvalitu, složení a množství produktů reakce, na základě čehož lze navrhnout průběh procesu takový, abychom získali produkty odpovídající našim požadavkům. Kapitola uvádí i jaké materiály jsou pro pyrolytické zpracování vhodné.

Třetí část textu je přehledem technologických a konstrukčních uspořádání základních typů pyrolýzních reaktorů doplněným schématy. V dnešní době využívané funkční pyrolýzní jednotky využívají většinou kombinace a zdokonalené verze uvedených základních typů reaktorů. Třetí kapitola obsahuje i přehlednou tabulku se stručným shrnutím parametrů, výhod a nevýhod typových reaktorů.

Čtvrtá kapitola obsahuje výčet a stručný popis technologického a konstrukčního uspořádání vybraných významných pyrolýzních jednotek využívaných v laboratorních podmínkách na území České Republiky a ve světě. Text obsahuje schémata, provozní parametry, údaje o produktivitě zařízení a informace o výstupních produktech.

Pátá kapitola je podobně jako čtvrtá výčtem charakteristik vybraných pyrolýzních jednotek z praxe, jen s tím rozdílem, že jde o jednotky využívané v průmyslovém měřítku, tedy ve většině případů rozsáhlejší, dokonalejší, produktivnější a mnohdy přizpůsobené následnému zpracování reakčních produktů, například výrobě energie spalováním plynu v kogeneračních jednotkách.

V poslední části práce jsem shrnul své postřehy ze shromážděných pro práci využitých i nevyužitých informací a formuloval jsem svoji vizi, kam pyrolýzní technologie využívaná v praxi, konkrétně při zpracování odpadů, směřuje. Myslím si, že je reálná šance, že paliva a energeticky bohaté látky získané pyrolýzou odpadů či biomasy v budoucnosti alespoň částečně vyřeší problém získávání paliv do spalovacích motorů z neobnovitelných zdrojů.

Seznam použité literatury

- [1] Produkce, využití a odstranění odpadů – 2016 [online]. 2017 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu>
- [2] Roční bilance materiálu a energie. Zevo Malešice. [online]. 2013, [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.psas.cz/index.cfm/sluzby-firmam/zarizeni-pro-energeticke-vyuzivani-odpadu/rocni-bilance>
- [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. 2018-08-08]. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.08.004. ISSN 0956053x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X14003596>
- [4] Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.opzp2007-2013.cz/ke-stazeni/252/10821/detail/studie-zarizeni-na-pyrolyticky-rozklad-odpadu-i>
- [5] JÍLKOVÁ, Lenka, Karel Ciahotný, Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů. [online]. 2012, 74-80 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: paliva.vscht.cz/download.php?=76
- [6] ŠEJVL, Radovan: Energie z odpadů II [online]. 2013, [cit. 2018-08-08]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energie-z-odpadu-ii>>. ISSN: 1801-2655
- [7] Anonym. Pyrolýza odpadů - moderní způsob jejich zneškodnění [online]. 2013, [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/94618/pyrolyza-odpadu-moderni-zpusob-jejich-zneskodneni>
- [8] GERHARTZ W.: Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry 5th ed. Weinheim: VCH, 1986. Volume A7. ISBN 3-527-20107-6
- [9] JÍLKOVÁ L. et al.: Koprolýza hnědého uhlí a řepkových pokrutin, Paliva, 2011, 3 (4). 119-125
- [10] HONUS, Stanislav. Metoda zvýšení efektivity termických procesů v reaktorech pro energy conversion. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012, 79 s. ISBN 978-80-248-2746-9
- [11] TRÁVNÍČEK, P.: Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 9788075092069.

- [12] RIEDL R, Veselý V.: Technologie paliv. Praha: SNTL, 1962
- [13] LANDA S.: Paliva a jejich použití. Praha: SNTL, 1956
- [14] VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA FAKULTA STROJNÍ a FITE A.S. Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů I. [online]. 2010, [cit. 2018-08-08] Dostupné z: http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf
- [15] CARRIER M., et al.: Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 90, 12-26
- [16] CHEN Y., He R.: Fragmentation and diffusion model for coal pyrolysis. *Journal of analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 90, 72-79
- [17] VENDERBOSCH R. H., Prins W.: Fast pyrolysis technology development. *Biofuels, Bioproduct & Biorefining*, 2010, 6, 178-208
- [18] MEI-KUEI Lee: Pyrolysis of napier grass in an induction-heating reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2010, 88, 110-116
- [19] AZEEZ A. M. et al.: Temperature dependence of fast pyrolysis volatile products from European and African biomasses. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 90, 81-92
- [20] KOPPE, Klaus a Dagmar JUCHELKOVÁ. *Bioenergie: Handbuch: Deutsch-Tschechisch: Formeln, Grafiken und Tabellen = Energie biomasy: příručka: německo-česká: rovnice, grafy a tabulky*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 180 s. ISBN 978-80-248-2457-4
- [21] 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. 2018-08-08]. DOI: 10.2298/TSCI141113154P. ISSN 03549836. Dostupné z: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361500154P>
- [22] PAVLÍK P.: Pyrolýzní technologie pro možnosti energetického a materiálového využití odpadů [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://zeleninj.cz/wp-content/uploads/sites/4/2015/11/Pyrol%C3%BDzn%C3%AD-technologie-Ing.-Petr-Pavl%C3%ADk.pdf>

- [23] Popis unikátní technologie. Pyrolun [online]. 2015 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.pyrolun.cz/popis-unikatni-technologie>
- [24] ANONYM, Hygienická analýza - hluk a škodliviny pyrolýzní jednotky. 2015. Dostupné z: http://www.pyrolun.cz/wp-content/uploads/2013/07/2_vysledky-hygince_analyzy_hluk_szkodliviny-.pdf
- [25] JEVIČ, Petr. Termolýzní zpracování zbytkové biomasy, separovaných plastových a celulóзовých podílů tuhého komunálního odpadu pro energetické a surovinové účely: certifikovaná metodika. Vyd. 1. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2012, 49 s. ISBN 978-80-86884-67-7
- [26] Historie procesu Thermostelect [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/mbu-a-jine/pyrolyza-a-plazma/thermostelect-historie>
- [27] Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2012/097.pdf>
- [28] Schéma procesu Thermostelect [online]. 2015 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/mbu-a-jine/pyrolyza-a-plazma/thermostelect-schema>
- [29] JOUHARA H., Nannou T. K., Anguilano L., Ghazal H., Spencer N., Heat pipe based municipal waste treatment unit for home energy recovery [online]. 2017, Vol: 139, 1210-1230 [cit. 2018-08-08]. ISSN: 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217302189>
- [30] Pyrolýzní jednotky Agmeco LT, s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: http://agmecolt.cz/?page_id=34
- [31] Velké dobré pneumatiky [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/velke-dobre-pneumatiky>
- [32] Technologie zplyňování dřevní biomasy [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.cpga.cz/aplikovane-technologie/tarpo>
- [33] Vícetupňové zplyňovací generátory v České Republice [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: http://www.cpga.cz/files/prednasky/1509_ENBIO_fulltext.pdf
- [34] Řízená kontinuální multicyklická pyrolýza [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: http://ekorecyklace.cz/sites/ERVO-prezentace-kveten_18.pdf

- [35] Technologický popis elektrárny Eviko [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7738572-Elektrarna-eviko-technicky-popis-nabizeneho-zarizeni-1-uvod-2-popis-a-nabidkou-garantovane-parametry-zarizeni.html>
- [36] Zpravodaj obce Vratimov [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: http://www.vratimov.cz/e_download.php?file=data/editor/75cs_185.pdf&originalVN_07_2010.pdf
- [37] Integrated Pyrolysis into Power Plant [online]. 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.dgengineering.de/download/open/Hamm-2009-EN.pdf>