

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



# DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Bc. Martin Klofáč

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**TECHNICKÁ FAKULTA**



**NÁVRH TECHNOLOGICKÉ LINKY  
NA TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

Vypracoval: Bc. Martin Klofáč

Praha 2014

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra technologických zařízení staveb

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Klofáč Martin

Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

**Návrh technologické linky na termické zpracování odpadů**

Anglický název

**Design of technological lines for thermal waste treatment**

### Cíle práce

Seznámit se s problematikou termického zpracování odpadů. Navrhnout inovaci technologické linky na termické zpracování odpadů s technicko-ekonomickým posouzením.

### Metodika

1. Charakteristika dosavadního poznání termického zpracování odpadů
2. Řešení inovačního stupně a změny dosavadního stavu
3. Výběr sledovaných parametrů navrhovaného zařízení
4. Ekonomické posouzení návrhu

### Osnova práce

1. Úvod
2. Přehled poznatků z literatury
3. Výchozí podmínky řešení
4. Návrh řešení a dosažené výsledky
5. Diskuse a závěry

## Rozsah textové části

60

## Klíčová slova

odpady, tuhá biopaliva, spalovací zařízení, emise

## Doporučené zdroje informací

Malaťák, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3

Malaťák, J.; Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 206 s., ISBN: 978-80-213-1810-6

Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s.

Pastorek Z., Kára J., Jevič P., 2004, Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha, 284 str., ISBN 80-86534-06-5

Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009 (OR. en)

## Vedoucí práce

Malaťák Jan, doc. Ing., Ph.D.

## Termín zadání

listopad 2012

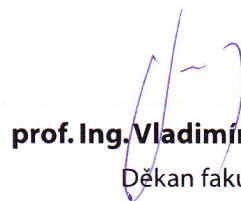
## Termín odevzdání

duben 2014



**doc. Ing. Miroslav Přikryl, CSc.**

Vedoucí katedry



**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan fakulty

V Praze dne 18.3.2013

**Prohlášení o autorství:**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr magisterského studia na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Praha dne:

.....

podpis studenta

**Prohlášení o udělení souhlasu s užitím:**

Podle § 60 zákona 121/2000 Sb., o právu autorském a právu souvisejícím s právem autorským, o studiu na vysokých školách a zákona o závěrečných zkouškách, je diplomová práce duševním spoluvlastnictvím autora, vedoucího diplomové práce a Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze. Citace povoluje fakulta. Podmínkou externího použití je smlouva s řešiteli.

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D. za odborné rady a cenné připomínky, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce, a dále Ing. Karlu Prokešovi ze společnosti AGMECO LT, s.r.o. za možnost použití interních materiálů a poskytnutí příležitosti seznámit se s prací na jejich pyrolyzní lince.

**Abstrakt:**

Předkládaná diplomová práce pojednává o termickém zpracování odpadů se zaměřením na pyrolýzní postupy. Úvodní část obecně seznamuje s legislativou k danému tématu, poskytuje souhrnné poznatky z literatury o technologiích termického zpracování odpadů a podrobněji mapuje pyrolýzní procesy u nás i ve světě. Následující část popisuje výchozí podmínky ve společnosti AGMECO LT, s.r.o., zabývá se návrhem inovace její technologické linky pro pyrolýzní zpracování odpadů a možného řešení, které by vedlo k optimalizaci provozu. V následující části jsou zaznamenány dosažené výsledky a vyhodnocení provedených měření. Závěrečná část obsahuje ekonomické zhodnocení, shrnuje dosažené výsledky a vyvozuje z nich závěry.

**Klíčová slova:**

odpady, termické zpracování odpadů, spalovací zařízení, energetické využití, spalování, pyrolýza



**Abstract:**

This thesis is focused on the thermal waste treatment especially the pyrolysis processes. The introduction defines the legislation in general, summarizes findings from the literature on technology for thermal waste treatment and describes in detail the pyrolysis process in our country and in the world. The following part reflects the initial conditions in AGMECO LT, Ltd., designs innovation of technological lines for the pyrolysis of waste treatment and shows the possible solutions that would lead to the system optimization. Results and evaluation of the measurements are recorded in the following part. The last part provides the economic evaluation, summarizes results and draws conclusions.

**Keywords:**

wastes, thermal waste treatment, combustion equipment, power generation, incineration, pyrolysis

# OBSAH

1	ÚVOD.....	- 1 -
2	PŘEHLED POZNATKŮ Z LITERATURY .....	- 2 -
2.1	LEGISLATIVA.....	- 2 -
2.1.1	Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů ....	- 2 -
2.1.2	Směrnice č. 98/2008/ES, o odpadech a o zrušení některých směrnic.....	- 5 -
2.2	ENERGETICKÉ VYUŽITÍ NEBO ODSTRANĚNÍ ODPADŮ .....	- 5 -
2.2.1	Spalování .....	- 7 -
2.2.2	Zplyňování .....	- 17 -
2.2.3	Pyrolýza .....	- 18 -
3	VÝCHOZÍ PODMÍNKY ŘEŠENÍ A NÁVRH INOVACE.....	- 34 -
3.1	VÝCHOZÍ STAV .....	- 34 -
3.2	POŽADAVKY NA INOVACI .....	- 46 -
3.3	TECHNOLOGICKÉ ŘEŠENÍ INOVACE .....	- 48 -
4	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY .....	- 51 -
4.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	- 56 -
5	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	- 66 -
6	ZÁVĚR .....	- 75 -
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ .....	- 77 -
	SEZNAM TABULEK.....	- 80 -
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	- 81 -

# 1 ÚVOD

V čase pokračující hospodářské a ekonomické recese, kdy neustále rostou ceny energií a materiálů a stále není uspokojivě vyřešena otázka odpadového hospodářství, jsou technologické procesy jako pyrolýzní zpracování odpadů stále více a více perspektivní. Naneštěstí nám legislativa v tomto směru stále moc nepřeje, jelikož proces pyrolýzního zpracování odpadů považuje za totožný s jeho spalováním, a tudíž jde pouze o odstranění odpadu, jeho snížení objemu, hmotnosti a redukce nebezpečných vlastností s vedlejším efektem získání energie.

Skutečnost je však taková, že procesem pyrolýzního zpracování odpadů nejen že dosáhneme výše zmíněného, ale dosáhneme toho ve vyšší míře a zároveň při nižších nákladech než ve spalovně, a to za vzniku druhotných surovin, jako je pyrolýzní plyn, olej, dehet a tuhý uhlíkový zbytek, které jsou obchodovatelnými komoditami, využitelnými jako alternativní paliva, anebo zdroje látek pro petrochemický průmysl. V neposlední řadě stojí za zmínku, že tyto druhotné suroviny, použité jako paliva, mají často i lepší parametry než primárně získané z těžby fosilních paliv.

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí - teoretické a praktické. V teoretické je uveden přehled poznatků z literatury o technologiích termického zpracování odpadů s podrobnějším přehledem pyrolýzních postupů. Na začátku praktické části je představena společnost AGMECO LT, s.r.o. a popsán současný stav její demonstrační jednotky pro pyrolýzní zpracování odpadů. Na základě poznatků získaných z provozu této jednotky jsou stanovena východiska pro optimalizaci provozu a zformulovány návrhy inovace ke zlepšení současného stavu.

Cílem této diplomové práce je optimalizovat proces získávání druhotných surovin z pyrolýzního procesu u společnosti AGMECO LT, s.r.o. Optimalizace bude spočívat v návrhu magnetického separátoru feromagnetických předmětů (ocel z kordů pneumatik) z tuhého uhlíkového zbytku z pyrolýzy.

## 2 PŘEHLED POZNATKŮ Z LITERATURY

### 2.1 LEGISLATIVA

Do roku 1991 nebyl v České republice žádný zákon zabývající se nakládáním s odpady. Prvním takovým zákonem, který se touto problematikou zabíral, byl zákon č. 238/1991 Sb., nicméně tento zákon nebyl kompatibilní s právními předpisy EU a byl novelizován zákonem č. 125/1997 Sb., o odpadech. [1] V tomto zákoně již bylo obsaženo hierarchické nakládání s odpady a také řešena otázka předcházení vzniku odpadů, využívání druhotných surovin a také nezávadné odstraňování odpadu. Nicméně tento zákon stále nebyl v plném souladu s právními předpisy EU a tak byl nahrazen novým zákonem č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů.

#### 2.1.1 Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů

Tento zákon vešel v platnost 1. ledna 2002, byl několikrát pozměněn, ale pro velké množství směrnic, které implementuje, se stává poněkud nepřehledným. Zákon je dělen do osmnácti částí. V první až čtvrté části zákona jsou stanovena pravidla předcházení vzniku odpadů a pro nakládání s nimi. Dále jsou zde definovány obecné pojmy a povinnosti osob a jejich kompetence, které s danou problematikou souvisí.

#### Pojem odpad

Opad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze č. 1 k tomuto zákonu. [2]

Tabulka 1: Skupiny odpadů [2]

Kód	Skupina odpadů
Q1	Zůstatky z výrob a spotřeby dále jinak nespecifikované
Q2	Výrobky, které neodpovídají požadované jakosti
Q3	Výrobky s prošlou lhůtou spotřeby
Q4	Použité, ztracené nebo jinou náhodnou událostí znehodnocené výrobky včetně všech materiálů, součástek zařízení apod., které byly v důsledku nehody kontaminovány

Q5	Materiály kontaminované nebo znečištěné běžnou činností (např. zůstatky z čištění, obalové materiály, nádoby atd.)
Q6	Nepoužitelné součásti (např. použité baterie, katalyzátory apod.)
Q7	Látky, které ztratily požadované vlastnosti (např. znečištěné kyseliny, rozpouštědla, kalicí soli apod.)
Q8	Zůstatky z průmyslových procesů (např. strusky, destilační zbytky apod.)
Q9	Zůstatky z procesů snižujících znečištění (např. kaly z praček plynů, prach z filtrů, vyřazené filtry apod.)
Q10	Zůstatky ze strojního obrábění a povrchové úpravy materiálu (např. třísky z obrábění a frézování, okuje apod.)
Q11	Zůstatky z dopravy a úpravy surovin (např. z dolování, dopravy nafty apod.)
Q12	Znečištěné materiály (např. oleje znečištěné PCB apod.)
Q13	Jakékoliv materiály, látky či výrobky, jejichž užívání bylo zakázáno zákonem
Q14	Výrobky, které vlastník nepoužívá nebo nebude více používat (např. v zemědělství, v domácnosti, úřadech, prodejnách, dílnách apod.)
Q15	Znečištěné materiály, látky nebo výrobky, které vznikly při sanaci půdy
Q16	Jiné materiály, látky nebo výrobky, které nepatří do výše uvedených skupin

### **Hierarchie způsobů nakládání s odpady [2]**

V rámci odpadového hospodářství musí být dodržována tato hierarchie způsobů nakládání s odpady:

- a) předcházení vzniku odpadů
- b) příprava k opětovnému použití
- c) recyklace odpadů
- d) jiné využití odpadů, například energetické využití
- e) odstranění odpadů

Nakládáním s odpady se rozumí shromažďování, sběr, výkup, přeprava, doprava, skladování, úprava, využití a odstranění odpadů. A od hierarchie způsobů nakládání

s odpady je možno se odchýlit, pokud se na základě posuzování životního cyklu celkových dopadů zahrnujícího vznik odpadu a nakládání s ním prokáže, že je to vhodné.

Využitím odpadů je činnost, jejímž výsledkem je, že odpad slouží užitečnému účelu tím, že nahradí materiály používané ke konkrétnímu účelu, a to i v zařízení neurčeném k využití odpadů podle § 14 odst. 2, nebo že je k tomuto konkrétnímu účelu upraven; v příloze č. 3 k tomuto zákonu je uveden příkladný výčet způsobů využití odpadů.

Tabulka 2: Způsoby využívání odpadů [2]

<b>Kód</b>	<b>Způsob využívání odpadů</b>
R1	Využití odpadu způsobem obdobným jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie
R2	Získání/regenerace rozpouštědel
R3	Získání/regenerace organických látek, které se nepoužívají jako rozpouštědla (včetně kompostování a dalších biologických procesů)
R4	Recyklace/ znovuzískání kovů a kovových sloučenin
R5	Recyklace/znovuzískání ostatních anorganických materiálů
R6	Regenerace kyselin nebo zásad
R7	Obnova látek používaných ke snižování znečištění
R8	Získání složek katalyzátorů
R9	Rafinace použitých olejů nebo jiný způsob opětného použití olejů
R10	Aplikace do půdy, která je přínosem pro zemědělství nebo zlepšuje ekologii
R11	Využití odpadů, které vznikly aplikací některého z postupů uvedených pod označením R1 až R10
R12	Úprava odpadů k aplikaci některého z postupů uvedených pod označením R1 až R11
R13	Skladování materiálů před aplikací některého z postupů uvedených pod označením R1 až R12, (s výjimkou dočasného skladování na místě vzniku před sběrem)

Ze způsobů využívání odpadů je pro tuto práci zásadní bod R1 - Využití odpadu způsobem obdobným jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie.

### **2.1.2 Směrnice č. 98/2008/ES, o odpadech a o zrušení některých směrnic**

Sektor zabývající se problematikou nakládání s odpady je upravován na komunitární úrovni především formou směrnic. Směrnice EU jsou závazné pro členské státy pouze, pokud jde o výsledek, kterého má být dosaženo. Forma a způsob dosažení tohoto výsledku je ponechána na vůli jednotlivých členských států. Směrnice jsou implementovány do právního řádu daného státu a jsou součástí sekundárních pramenů komunitárního práva, které je nadřazeno všem národním zákonům členských států EU. Tato směrnice je základem komunitární právní úpravy dotýkající se problematiky odpadu a to konkrétně předcházení odpadů, jejich správy a ukládání. Vešla v platnost koncem roku 2008 a zrušila směrnici 2006/12/ES o odpadech, která je doposud rámcovou směrnicí zaměřenou na předcházení odpadům, jejich správu a ukládání. [3]

#### **Hierarchie způsobů nakládání s odpady [4]**

Jako pořadí priorit pro právní předpisy a politiku v oblasti předcházení vzniku odpadů a nakládání s nimi se použije tato hierarchie způsobů nakládání s odpady:

- a) předcházení vzniku
- b) příprava k opětovnému použití
- c) recyklace
- d) jiné využití, například energetické využití
- e) odstranění

Tato hierarchie je ztotožněna v našem zákoně č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů.

## **2.2 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ NEBO ODSTRANĚNÍ ODPADŮ**

Využití odpadů je činnost, jejímž výsledkem je to, že odpad slouží užitečnému účelu tím, že nahradí materiály používané ke konkrétnímu účelu, a to i v zařízení neurčeném k využití odpadů podle § 14 odst. 2 zákona č. 185/2001 Sb., nebo že je k tomuto konkrétnímu účelu upraven; viz předchozí příloha k tomuto zákonu, ve které je uveden příkladný výčet způsobů využití odpadů. [2]

Energetické využívání odpadů je vysoce aktuální a potřebné z těchto důvodů: [5]

1. Odpad je ideální náhradou přírodních neobnovitelných zdrojů. Například směsný komunální odpad dosahuje výhřevnosti hnědého uhlí.
2. České republice hrozí od roku 2013 reálné sankce za to, že nesnižuje množství skládkovaných biologicky rozložitelných odpadů.
3. Česká republika významně zaostává za vyspělými evropskými státy ve využívání odpadů jako zdroje energie.
4. V době odbytové krize surovin je energetické využívání odpadů ideálním řešením pro odpady, které momentálně nelze jinak uplatnit na trhu. Odbyt energií není v podstatě omezován.
5. V době přírodních katastrof je energetické využití odpadů jedním z okamžitých řešení odstranění odpadů.

Odstraněním odpadů je činnost, která není využitím odpadů, a to i v případě, že tato činnost má jako druhotný důsledek znovuzískání látek nebo energie. [2]

Energetické využití odpadů: [5]

1. Je prokazatelně nejčistější zdroj energie získávané termicko-oxidačním procesem. Žádné spaliny ze sebelépe odsířených elektrárenských procesů se nemohou svojí kvalitou srovnávat s vyčištěnými spalinami z procesů energetického využívání odpadů.
2. Šetří fosilní paliva.
3. Desetinásobně sníží objem a o 60 až 70 % sníží hmotnost odpadu.
4. Inertní vlastnosti zbytkových materiálů z procesu energetického využívání odpadů umožňují jejich zpracování na použitelné produkty nebo bezpečné uložení do zemské kůry.
5. Energetické využívání odpadů je z hlediska životního prostředí neutrální ve vztahu k oxidu uhličitému, který vznikne oxidací organického uhlíku. Navíc se, v porovnání se skládkováním, zamezí emisím skleníkových plynů.
6. Energetické využívání spalitelných odpadů, které nelze látkově využívat, vyhovuje všestranným nárokům kladeným na ochranu životního prostředí.
7. Garantuje minimální emise do ovzduší a vody a umožňuje zpracování většiny zbytkových látek na použitelné produkty.

Výše zmíněné legislativní pojmy *využití* nebo *odstranění* odpadů za účelem znovuzískání látek nebo energie se provádí především termickými metodami. Těmito termickými metodami jsou v praxi míněny technologie, které působí na odpad teplotou, jež přesahuje



mez jeho chemické stability. Tato obecná definice zahrnuje velmi široké rozmezí teplot používaných v jednotlivých technologiích (300 až 2000 °C), přičemž není brána v úvahu chemická povaha probíhajících dějů. Z těchto důvodů mohou být termické metody dále děleny do dvou kategorií: [6]

1. oxidační - v reakčním prostoru je obsah kyslíku stechiometrický nebo vyšší vzhledem ke zpracovávanému materiálu (spalování)
2. redukční - v reakčním prostoru je obsah kyslíku nulový nebo podstechiometrický (pyrolýza a zplyňování)

K tomuto rozdělení je však třeba dodat, že některé, zejména zplyňovací, procesy nepoužívají jako oxidační médium molekulární kyslík, ale jiné oxidanty, především CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O.

### 2.2.1 Spalování

Odpad považujeme za méně hodnotné palivo, což pramení z jeho různorodosti složení a fyzikálních vlastností. O energetickém využití odpadu hovoříme, má-li minimální výhřevnost 5 MJ·kg<sup>-1</sup> bez podpurného paliva. Minimální výhřevnost je zaručena v případě, že je dodržena procentuální skladba tří základních složek odpadu. Těmito složkami jsou popel, vlhkost a hořlavina, které by měl obsahovat energeticky využitelný odpad v těchto mezích:

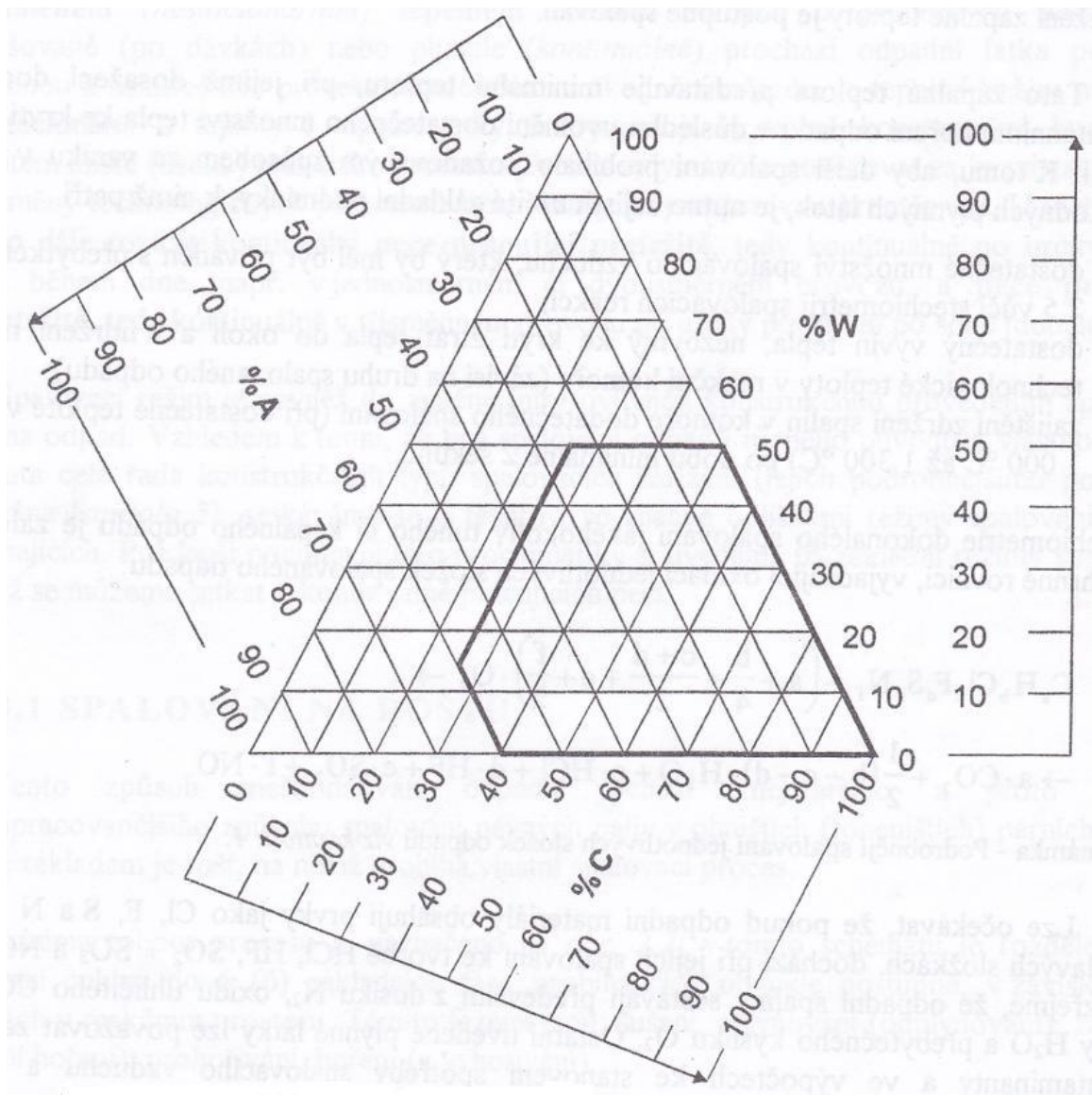
Obsah popela:  $A \leq 60 \%$

Obsah vlhkosti:  $W \leq 50 \%$

Obsah hořlaviny:  $C \geq 25 \%$

Platí že:  $C + W + A = 100 \%$  [6]

Pomocí těchto tří podmínek lze z Tannerova (trojného) diagramu vyčíst zda se jedná o energeticky využitelný odpad či nikoli.



Obrázek 1: Tannerův (trojný) diagram [6]

Cílem spalování odpadů je především snížení objemu odpadů na cca 10 až 15 % objemu původního (odpovídá snížení hmotnosti na 20 až 40 % hmotnosti původní), což ve srovnání s dalšími metodami zneškodňování, např. kompostováním nebo skládkováním, je snížení mnohem výraznější, dále snížení nebezpečnosti při současném zachycení nebo zneškodnění potenciálně škodlivých látek, které se mohou uvolňovat během spalování. Významnou předností metody spalování je rovněž skutečnost, že pro mnohé typy odpadů (např. chemické, zdravotní a další nebezpečné odpady), je to prakticky jediný vhodný způsob zneškodnění, přičemž zbytek po spalování je tuhý, sterilní a většinou nepodléhá dalšímu rozkladu. Prostřednictvím spalovacích procesů lze též umožnit využití energie, nerostných či chemických látek obsažených v odpadu.

V zásadě se jedná o oxidaci hořlavých materiálů obsažených v odpadu. Odpad je obecně vysoce heterogenní materiál složený v podstatě z organických látek, minerálů, kovů a vody. Během spalování vznikají spaliny, které obsahují převážnou část energie k tepelnému využití. [7]

### **Hlavní stupně procesu spalování: [7]**

**1. Sušení a odplynění** – zde je změněn těkavý obsah (např. uhlovodíky a voda) při teplotách obvykle mezi 100 a 300 °C. Proces sušení a odplynění nevyžaduje žádná oxidační činidla a je závislý pouze na dodávkách tepla.

**2. Pyrolýza a zplyňování** – pyrolýza je dalším rozkladem organických látek za nepřítomnosti oxidačního činidla při teplotě asi 250 až 700 °C. Zplyňování uhlíkatých zbytků je reakce zbytkových odpadů s vodní parou a CO<sub>2</sub> při teplotách obvykle mezi 500 až 1 000 °C, ale může probíhat při teplotách až do 1 600 °C. Takto jsou tuhé organické materiály převedeny do plynné fáze. Kromě teploty jsou činiteli reakce voda, pára a kyslík.

**3. Oxidace** – v předchozích stupních vzniklé hořlavé plyny oxidují v závislosti na vybrané metodě spalování při teplotách spalin obecně mezi 800 až 1 450 °C.

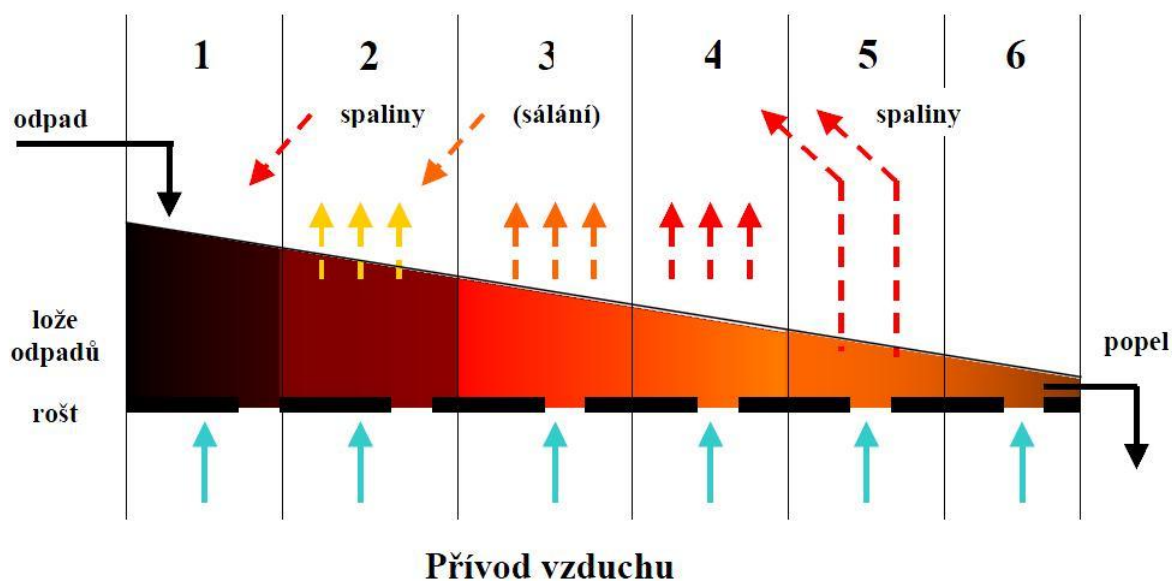
Tyto jednotlivé stupně se obecně překrývají, což znamená, že prostorové a časové oddělení těchto stupňů během spalování odpadů bude asi možné pouze v omezeném rozsahu. Samozřejmě procesy částečně probíhají paralelně a navzájem se ovlivňují. Nicméně je možné pomocí technických opatření uvnitř pecí tyto procesy ovlivnit tak, aby se snížily znečišťující emise. K takovým opatřením náleží návrhy pecí, distribuce vzduchu a průběžné kontroly.

### **Základní typy pecí**

#### ***a) Roštové pece***

Toto zneškodňování odpadu vychází z nejstaršího a tím pádem i nejpropracovanějšího postupu spalování tuhých paliv v ohništích parních kotlů, u nichž je základem rošt, na kterém probíhá vlastní spalovací proces. Tyto rošty mohou být pevné nebo pohyblivé (např. pásové, posuvné, válcové, natřásací, otočné).

## Fáze termického procesu



Obrázek 2: Fáze termického procesu u roštové pece [9]

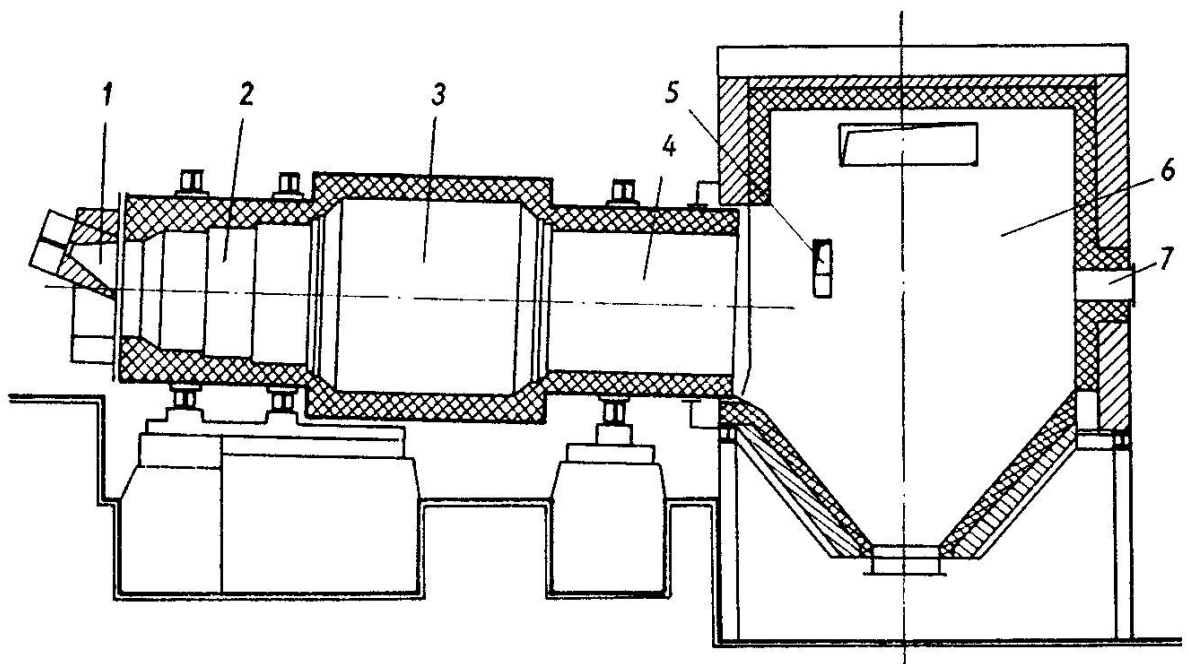
Fáze termického procesu: [6]

1. Vysoušení - zbavení se obsahu vlhkosti v podobě páry při teplotě nad 100 °C.
2. Zplyňování (odplyňování) - v důsledku sálání vyzdívky, působením plamene a cirkulujících spalin teplota dále narůstá na 250 až 600 °C a při této teplotě dochází k reakci materiálu s kyslíkem z přiváděného spalovacího vzduchu a ke zplyňování hořlavých látek, které se přemění na těkavé složky a vázaný uhlík.
3. Zapálení (lokální hoření) - je charakteristické vznícením těkavých složek (karbonizačního plynu) na povrchu lože odpadů za dostatečného přísunu spalovacího vzduchu.
4. Prohořívání (odhořívání) - postupné povrchové odhořívání způsobí další prohřev odpadového lože a při dostatečném kontinuálním přísunu spalovacího vzduchu vznikají nová ložiska hoření. Těkavý plyn je uvolňován ze stále nižších vrstev odpadu a nastává další nárůst teploty, která se pohybuje v rozmezí 500 až 800 °C. Rychlost prohořívání určuje zejména stabilita paliva, ale i konstrukce roštu a konstrukce vyzdívky pece, jejíž sálání ovlivňuje podíl horního zápalu.
5. Hoření - se postupně spojují v jeden celek a vznikají plochy s vyvinutým plamenem, odhořívá karbonizační plyn a vzniklý polokoks, teplota se zde zvýší až na 1 150 °C. Vzniklé teplo je odváděno spalinami, které jsou chlazeny, a vzniklou strusku s rozpálenou škvárou je třeba chladit vodou nebo přebytkem vstupujícího vzduchu.

6. Vyhořívání - uvolněných plynů a polokoksu uvolňuje velké množství tepla a hodnoty teploty dosahují i 1 200 °C.

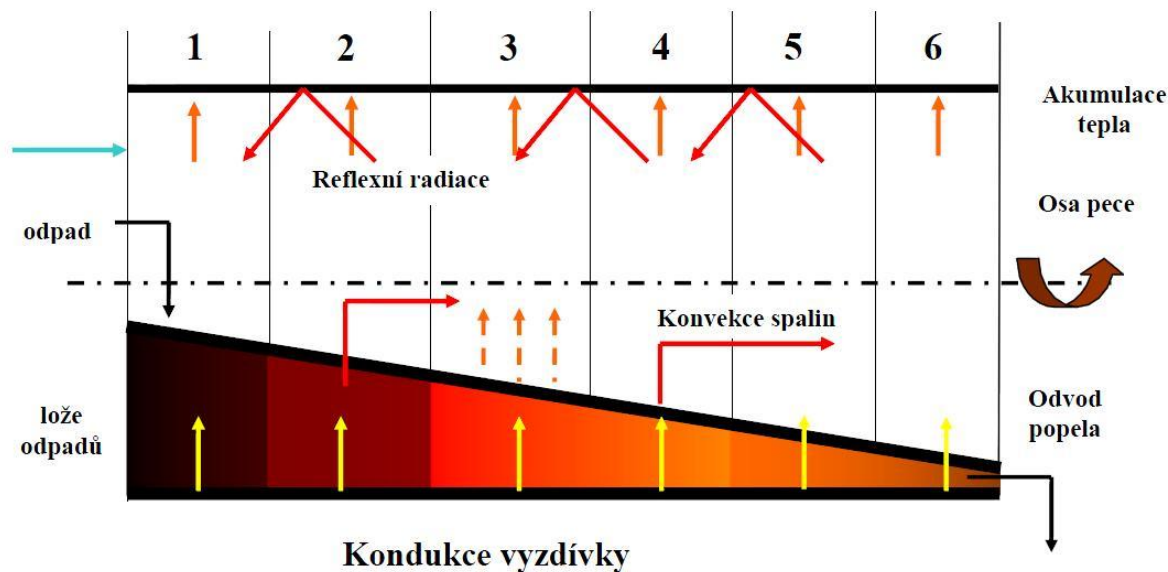
### ***b) Rotační pece***

Rotační pece jsou velmi masivní a lze v nich spalovat téměř všechny odpady bez ohledu na druh či složení. Rotační pece mají velmi široké uplatnění především při spalování nebezpečných odpadů. Technologie je také všeobecně používána pro spalování klinických odpadů. Provozní teploty dosahované v rotačních pecích při spalování odpadů se pohybují v rozmezí od 500 °C (např. zplyňování) do 1 450 °C (např. vysokoteplotní tavení popele). Někdy se vyskytují vyšší teploty, ale obvykle nikoliv v aplikacích odpadových. Při běžném oxidačním spalování jsou obvykle teploty vyšší než 850 °C. Teploty v rozpětí 900 až 1 200 °C jsou běžné pro spalování nebezpečných odpadů. Všeobecně platí v závislosti na vstupujícím odpadu, že čím vyšší je provozní teplota, tím větší je riziko poškození žáruvzdorného obložení pece vlivem usazenin a teploty. Některé pece mají tepelně izolační vrstvy (vzduchové nebo vodní), které pomáhají prodlužovat životnost vyzdívkou a tím dobu mezi odstávkami za účelem údržby.



Obrázek 3: Rotační spalovací zařízení s dohořivací komorou: [10]

1 - hořák v pevné vstupní hlavě, 2 - sušící pásmo, 3 - spalovací pásmo, 4 - vychlazovací pásmo, 5 - sekundární vzduch, 6 - dohořivací a usazovací komora, 7 - kontrolní okénko



Obrázek 4: Fáze termického procesu u rotační pece [9]

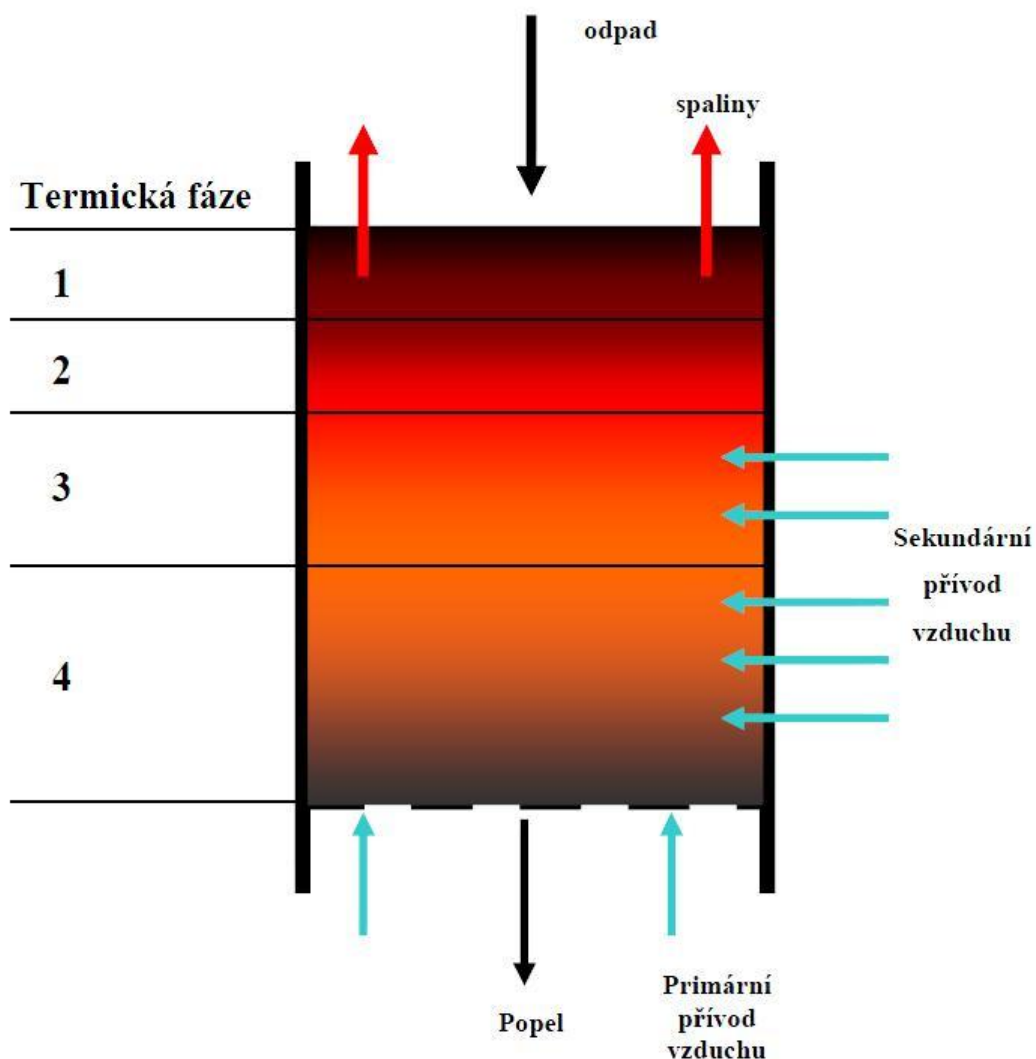
Fáze termického procesu: [6]

1. Vysoušení - odpad je zbavován vlhkosti působením tepla vyzářeného plamenem a spalinami i horní části vyzdívky, předávaného vedením ze spodní části vyzdívky a přenášeného spalovacím vzduchem při povrchu lože odpadů. Teplota se pohybuje v rozmezí 50 až 100 °C a při dosažení horní hranice dojde k odpaření vlhkosti obsažené v odpadu.
2. Zplyňování - zde se přidá ještě působení ohřívacího a spalovacího vzduchu a lože s odpady je za stálého promíchávání a otáčení pece zahříváno shora i zespoda, materiál se rozvolňuje a teploty dosahují 300 až 600 °C, tím nastává postupná přeměna hořlavých látek na těkavé složky a vázaný uhlík, které prostupují ložem odpadů do volného prostoru nad vsázkou.
3. Zapálení - na povrchu odpadu vznikají lokální ložiska hoření a v důsledku rotace pece se přemísťují a shlukují do větších ložisek.
4. Prohořívání - důsledkem zvyšující se teploty až na hodnotu cca 800 °C dochází k intenzivnějšímu uvolňování hořlavých plynů i ve vnitřních vrstvách odpadového lože, tudíž ohňová ložiska postupně prohořívají do větších hloubek a spojují se.
5. Hoření - postupem hoření se slučují ložiska ohně v jeden celek a teplota narůstá na 1 100 až 1 200 °C.
6. Vyhořívání - je dohoříváním zbytku nespálených hořlavých látek z odpadu, podporované dosud nespáleným spalovacím vzduchem.

Vzhledem ke konstrukčnímu řešení rotační pece je nutné přivádět vzduch s dostatečným přebytkem. Rotační pece mohou pracovat v souproudém (spalovací vzduch i vsázka jdou jedním směrem) nebo protiproudém (spalovací vzduch i vsázka jdou proti sobě) režimu. Většinou se používá souproudý režim.

### c) Šachtové pece

Šachtových pecí se využívá v mnoha průmyslových odvětvích. Mimo využití při odstraňování odpadů je jich používáno též při pražení železných rud a dalších metalurgických procesech, a mimo jiné také při pálení maltovin. Spalování odpadů v šachtě je založeno na principu postupného sázení odpadového materiálu shora na vyhřáté odpadové lože, přičemž vsázka klesá vlastní tíhou postupně dolů proti stoupajícím spalinám a spalovacímu vzduchu. Opačný směr spalin a spalovacího vzduchu způsobuje je postupné vysoušení a tepelný rozklad odpadového materiálu. [6]



Obrázek 5: Fáze termického procesu u šachtové pece [9]

Fáze termického procesu: [6]

1. Vysušování a zapálení - vsazením odpadu shora do pece proti směru stoupajících spalin dochází ke zbavování vlhkosti (sušen) a následným poklesem do nižších částí pece dochází k jejich odplynění a vzniku ložisek hoření.

2. Hoření - postupným poklesem se odpady v šachtě dostávají do oblasti vyšších teplot. Ohniska hoření a karbonizační plyny vytvoří spolu s proudícím vzduchem podmínky, za kterých dochází k intenzivnímu spalování.

3. Vyhořívání - dalším poklesem odpadního materiálu dojde k vyhořívání hořlavých zbytků, které vede k opětovnému zvýšení teploty. Zde je vhodné chlazení lože pomocí sekundárního vzduchu nebo přívodem části recirkulovaných spalin ke spalovacímu vzduchu, protože hrozí natavování popela.

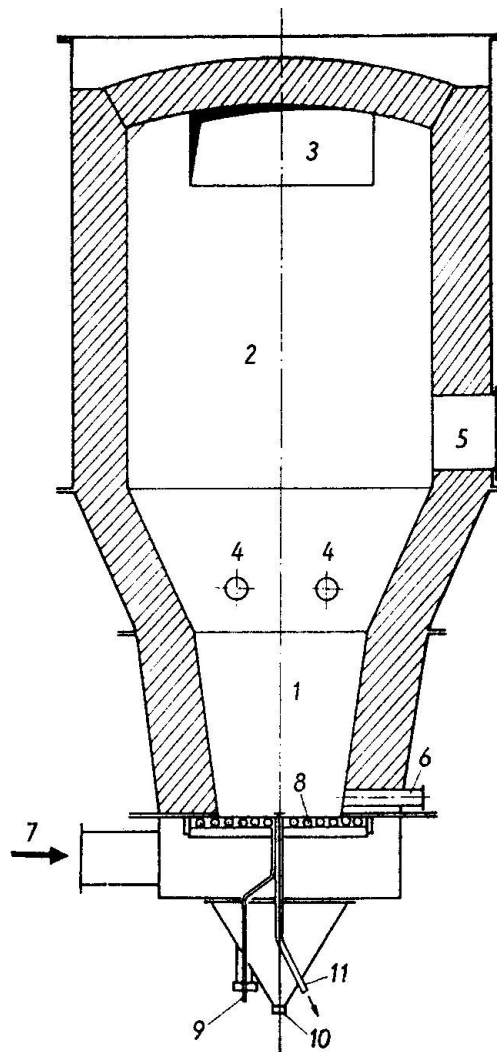
4. Chlazení - popel klesá na dno šachtové pece, zde nastává předávání tepla mezi žhavým popelem a přiváděným primárním vzduchem. Tím dojde k chladnutí žhavého popela a k předeřtí primárního vzduchu na teplotu, při které se celý proces zintenzivní.

Příkladem šachtové pece pro zneškodňování odpadů může být např. kuplovna nebo šikmá pec.

#### ***d) Fluidní pece***

Tento typ pece je používán k odstraňování kapalných i pevných odpadů. Pevné odpady je nutné předem rozdrtit či rozemlít na stejnou zrnitost. Způsob spalování v této peci je založen na rychlém přívodu fluidizačního média (většinou vzduch) ze spodní části pece, kde vzduch naráží na rozdrcený odpad, který je jím nadnášen a zviřen. Takto nadnášená vrstva se označuje jako fluidní. Ve fluidní vrstvě tak dojde ke zvětšení reakčního povrchu odpadu a dochází k intenzivnímu spalování v celé šíři za teplot 800 až 1 000 °C.



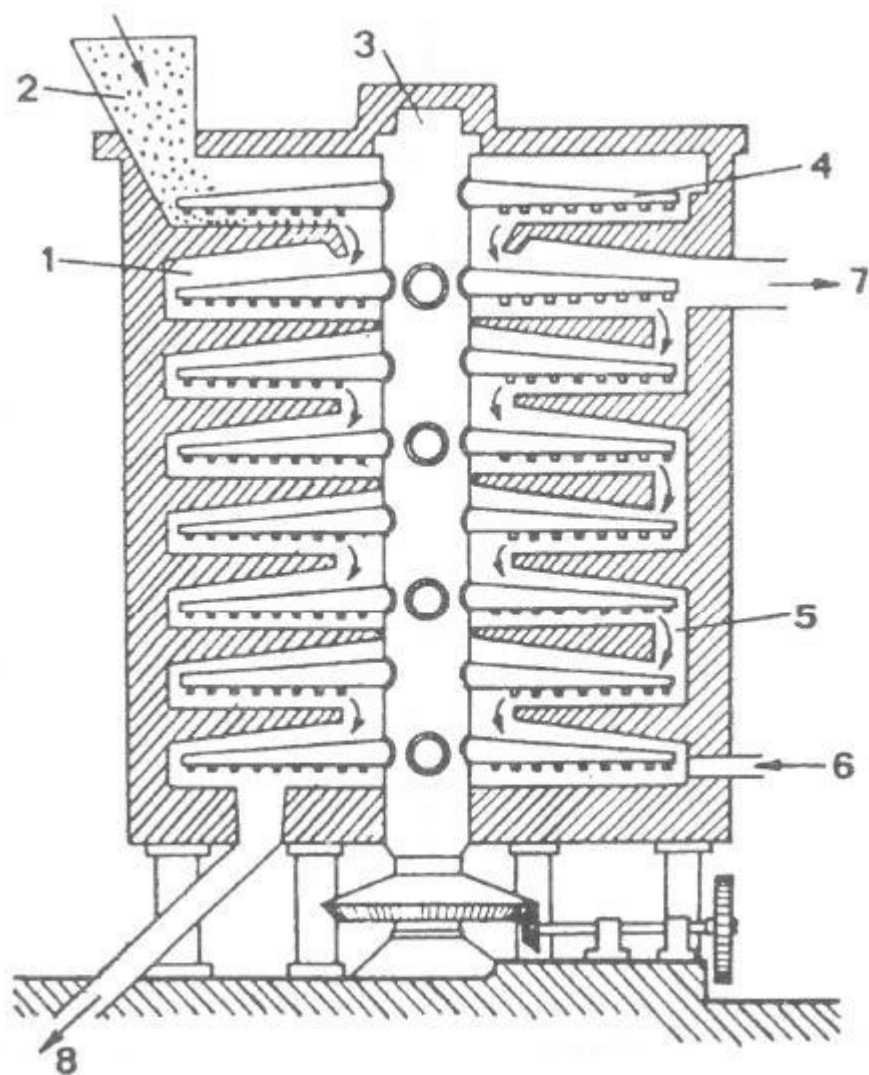


Obrázek 6: Fluidní pec [11]

1 - prostor fluidní vrstvy, 2 - uklidňovací prostor, 3 - výstup spalin, 4 - přívod paliva, 5 - průřezová dvířka, 6 - zapalovací otvor, 7 - fluidizační vzduch, 8 - fluidní rošt, 9 - chladící voda, 10 - výpusť propadu, 11 - výpusť popela z fluidní vrstvy.

### *e) Etážové pece*

Je určena především pro likvidaci odpadů s vysokým obsahem vody, jako jsou např. čistírenské kaly. Umožňují však i společné spalování čistírenských kalů a předem rozdrcených tuhých odpadků. Pec má tvar stojícího válce rozděleného do jednotlivých etáží. Osou pece prochází dutý otočný hřídel, jímž odchází ohřátý vzduch z pece. Na něm jsou v každé etáži připevněna ramena s lopatkami. V každé etáži jsou vytvořeny střídavě otvory od vnějšího obvodu až ke středu a při otáčení dochází k posouvání paliva od krajů ke středu, odpady jsou lopatkami dopraveny až k otvorům a propadnou do nižších etáží.



Obrázek 7: Etážová pec: [11]

1 - patro, 2 - násypka, 3 - hřídel, 4 - ramena, 5 - přepadové otvory, 6 - přívod vzduchu, 7 - odvod spalin, 8 - odpad nespálených zbytků

### ***f) Muflové pece***

Spalovny s muflovým ohništěm se používají především ke spalování zdravotnického odpadu, ropných produktů obsahujících kaly z čistíren, zbytky barev, laků a plastových odpadů. Provoz je periodický, takže do prázdné zchladlé pece se zavezou odpady, pak se topeniště uzavře a stabilizačním palivem zahřeje. Teprve pak se započne spalování odpadů a nakonec se vstříkují kapalné odpady. Spalování probíhá při teplotách 800 až 1200 °C. [11]

Tabulka 3: Srovnání charakteristických vlastností nejběžnějších spalovacích pecí: [9]

Typ pece	Skupenství odpadu	teploty	Přídavné operace	Výhody	Nevýhody	Typ spalování (periodické, kontinuální)
Fluidní	Pevné/kapalné	800-1000	Drcení pevného odpadu	Lze použít na kapalné i pevné odpady, lze spalovat odpady vyšším obsahem síry, konstrukční jednoduchost	Nutnost před spalováním odpad rozdrtit na stejnou zrnitost	Kontinuální
Muflové	Pevné/kapalné	800-1000	nemá	Využitelné na odstranění vrtacích emulzí, rozpouštědel, zbytků z výroby barev	Nutno po skončení spalování jedné vsázky odstranit škváru a popel	Periodický
Etážové	Pevné/kapalné	800-900	Drcení pevného odpadu	možnost spalovat odpad v kapalném i pevném skupenství	Nutnost před spalováním odpad rozdrtit na stejnou zrnitost	Kontinuální
Roštové	Pevné	1200	nemá	Snadná údržba	Nemožnost spalovat odpad v kapalném či prstovitém stavu	Kontinuální
Rotační	Pevné/kapalné	800-1200	nemá	Univerzální pec, v níž lze odstraňovat i nebezpečné odpady	Vyšší pořizovací náklady	Kontinuální
Šachtové	Pevné	800-1100	nemá	Snadná údržba	Nemožnost spalovat odpad v kapalném či pastovitém stavu, nebezpečí prohořívání do prostoru násypky	Kontinuální

### 2.2.2 Zplyňování

Je to proces tepelné přeměny organického materiálu při teplotách nad 800 °C za přívodu podstechiometrického množství vzduchu nebo jiného oxidovadla (v podstatě hoření za omezeného přívodu kyslíku), při kterém souběžně probíhají jak oxidační procesy uvolňující energii, tak redukční děje, které obvykle energii zpotřebovávají. Výsledkem je vznik hořlavého plynu složeného z CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a v menším množství CH<sub>4</sub>, uhlovodíků, O<sub>2</sub>. Tento plyn může být spalován v motorech při vhodném směšovací poměru se vzduchem. Vzhledem k malé výhřevnosti plynu (4 až 6 MJ·m<sup>-3</sup>) tento proces vyžaduje špičkovou technologii s vyšší účinností, jako je integrovaná výroba elektrické

energie a tepla (IGCC) s použitím parních, nebo plyných turbín. V takových cyklech může elektrická účinnost dosáhnout až 35 %. A proto je tato technologie výhodná. [1, 5, 6, 7, 8]

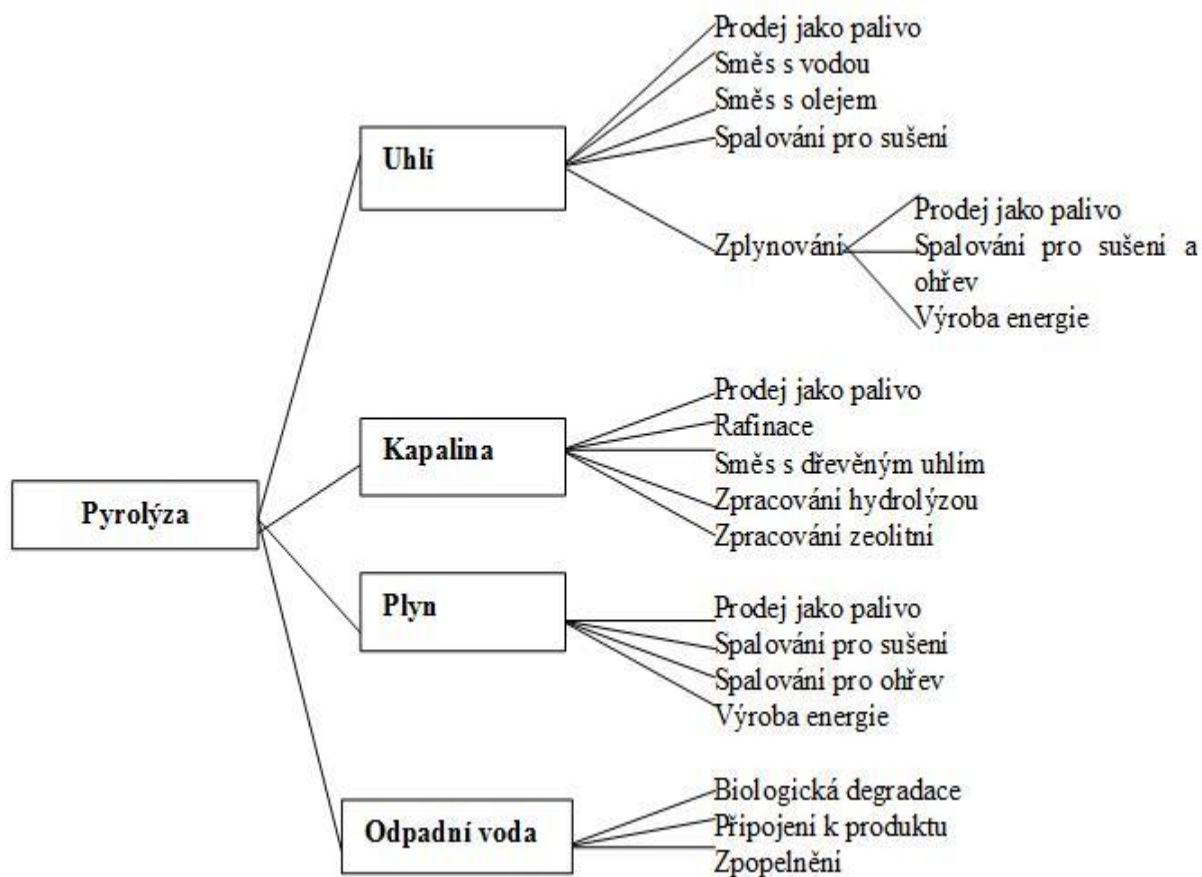
Další výhodou procesu vysokoteplotního zplyňování odpadů je, že při této technologii odpadá hlavní problém klasických spaloven - vznik vysoce toxických dioxinů, furanů, polycyklických aromatických uhlovodíků a vzhledem k redukčnímu prostředí je bráněno vzniku oxidů dusíku. [6, 8]

Procesem zplyňování byla historicky výroba dřevěného uhlí v milířích, kdy hlavním produktem byl tuhý zbytek – dřevěné uhlí a plyný produkt unikal bez užitku do vzduchu. V moderní době se naopak hlavním produktem stal výhřevný plyn (svítiplyn, generátorový plyn, vodní plyn, syntézní plyn, energoplyn, dřevní plyn aj.), jehož hlavními složkami je opět CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> a H<sub>2</sub>O. Zastoupení jednotlivých složek a tím výhřevnost a další využití závisí na druhu použitého paliva, zplyňovacího média (vzduch, kyslík, vodní pára) a režimu procesu. Dalšími produkty pak je ještě kapalná fáze a tuhý zbytek. V současnosti bývá plyný produkt zplyňování nejčastěji nazýván syntézním plynem, což je název historicky pocházející z doby, kdy v Německu za druhé světové války sloužil k syntéze benzínu. [5]

### **2.2.3 Pyrolýza**

Pyrolýza (pyros = oheň, lysis = štěpení, degradace ohněm) je definována jako souhrn termochemických degradačních reakcí probíhajících v nepřítomnosti kyslíku, nebo v přítomnosti kyslíku, ale nedochází k parciální oxidaci. [12] Je to fyzikálně-chemický děj, řadící se do relativně široké skupiny termických procesů. Jinými slovy jde o termický rozklad organických materiálů při komplexní absenci oxidačních činitelů.

Produkty pyrolýzy jsou především plyny, kapaliny a uhlí. [7]



Obrázek 8: Produkty pyrolýzy [7]

Složení těchto produktů závisí na pyrolýzní metodě zpracování a na reakčních parametrech. Rychlá nebo blesková pyrolýza je používána pro maximální produkci plynů a kapalných produktů, poskytující především tepelný užitek. Pomalé pyrolýzy jsou známy jako karbonizace a používají se především na produkci dřevěného uhlí. [7]

Podstatou pyrolýzy je ohřev materiálu nad mez termické stability přítomných organických sloučenin, což vede k jejich štěpení až na stále nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek. Z technologického hlediska lze pyrolýzní procesy dále rozdělit dle dosahované teploty:

1. nízkoteplotní (< 500 °C)
2. středněteplotní (500 až 800 °C)
3. vysokoteplotní (> 800 °C)

V závislosti na dosažené teplotě, lze při pyrolytickém procesu pozorovat řadu dějů, které je možné pro jednoduchost rozdělit do tří teplotních intervalů. V oblasti teplot do 200 °C dochází k sušení a tvorbě vodní páry fyzikálním odštěpením vody. Tyto procesy jsou silně endotermické. V rozmezí teplot 200 až 500 °C následuje oblast tzv. suché destilace. Zde nastává ve značné míře odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických

látek a přeměna makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík. Ve fázi tvorby plynu v oblasti teplot 500 až 1 200 °C jsou produkty vzniklé suchou destilací dále štěpeny a transformovány. Přitom jak z pevného uhlíku, tak i z kapalných organických látek vznikají stabilní plyny, jako je H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>. [13]

### Pyrolýzní technologie [7]

Pyrolýza je prakticky používána po století pro produkci dřevěného uhlí (historicky se nedá uvažovat o rozdílu mezi pyrolýzou a zplyňováním). Při výrobě dřevěného uhlí je použita relativně pomalá reakce při nízkých teplotách pro dosažení maximálního výnosu.

Nejnovější studie, na mechanismy z pyrolýz, navrhuje cesty podstatně měnících se změn ve složení plyných, kapalných, a pevných produktů. To je dosaženo především ve stupni rozehrátí a v reakční teplotě.

Tabulka 4: Pyrolýzní technologie [7]

		Karbonizace	Pomalá pyr.	Rychlá pyr.	
				Nízké tepl.	Vysoké tep.
<b>Parametry</b>					
<b>Teplota, (°C)</b>		300-500	400-600	450-600	700-900
<b>Tlak, (Mpa)</b>		0.1	0.01-0.1	0.1	0.1
<b>Max. výkon dosažený za čas, sušiny (t.h<sup>-1</sup>)</b>		5	1	0.05	0.1
<b>Produkty (v sušině)</b>					
<b>Plyn</b>	<b>Výnos, (%)</b>	do 150	do 60	do 30	do 80
	<b>HHV, (MJ.Nm<sup>-3</sup>)</b>	3-6	5-10	10-20	15-20
<b>Kapalina</b>	<b>Výnos, (%)</b>	do 25	do 30	do 70	do 20
	<b>HHV, (MJ.kg<sup>-1</sup>)</b>	20	20	24	22
<b>Pevná látka</b>	<b>Výnos, (%)</b>	do 40	do 30	do 15	do 15
	<b>HHV, (MJ.kg<sup>-1</sup>)</b>	30	30	30	30

### Pomalá pyrolýza (Slow pyrolysis) [7]

Je charakterizována nízkou rychlostí výhřevu ( $< 10 \text{ } ^\circ \text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ) nízkou teplotou reakce ( $< 400 \text{ } ^\circ \text{C}$ ) a dlouhou dobou setrvání těkavých látek a tuhých uhelných zbytků v reaktoru (hodina až několik dní). Primární prchavé látky uvolněné pyrolýzou biomasy jsou zadrženy v reaktoru a štěpí se dále na sekundární produkty za vzniku plynů a dehtů. Tuhé zbytky se přemění ve výsledném produktu v dřevěné uhlí.

Tabulka 5: Pomalá pyrolýza [7]

	Čas zpracování	Výhřevný stupeň	Max. teplota (°C)	Hlavní produkt
<b>Karbonizace</b>	Hodin.-dny	Velmi nízký	400	Dřevěné uhlí
<b>Přeměna</b>	5-30 min	Nízký	600	Bioolej, dřevěné uhlí a plyn
<b>Pevný</b>	0.5-5 s	Vysoký	650	Bioolej
<b>Rychlá pyrolýza</b>				
<b>Kapalina</b>	<1 s	Vysoký	<650	Bioolej
<b>Plyn</b>	<1 s	Vysoký	<650	Chemikálie a plynné paliva
<b>Ultra</b>	<0.5 s	Velmi vysoký	1000	Chemikálie a plynné paliva
<b>Vakuum</b>	2-30 s	Střední	400	Bioolej
<b>Vodík-pyrolýza</b>	<10 s	Vysoký	<500	Bioolej a chemikálie
<b>Metan-pyrolýza</b>	<10 s	Vysoký	>700	Chemikálie

### Rychá pyrolýza (Flash Pyrolysis) [7]

Předmětem rychlé pyrolýzy je dosažení vysokého obsahu kapalného podílu (až 75 % hmot.) při relativně nízkých teplotách (okolo 500 °C), nebo vysokého obsahu plynného podílu (70 až 80 % hmot.) při vyšších teplotách (800 až 900 °C). Proces probíhá za velmi příznivých podmínek: doba setrvání par prchavých látek v reaktoru nepřesahuje 1 s a rychlost výhřevu je minimálně 104 °C·s<sup>-1</sup>.

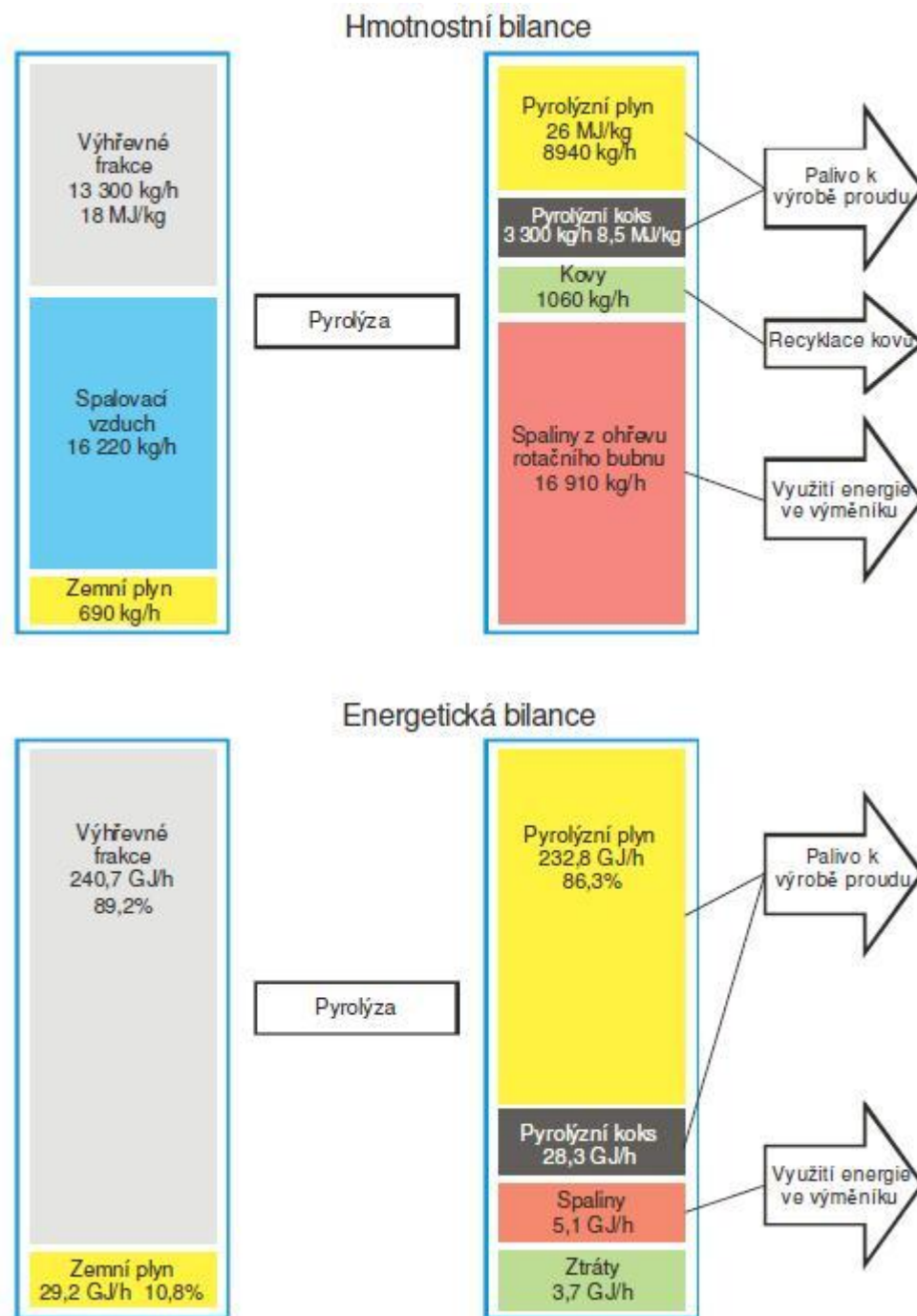
Tabulka 6: Rychá pyrolýza [7]

	Čas zpracování	Výhřevný stupeň	Max. teplota (°C)	Hlavní produkt
<b>Karbonizace</b>	Hodin.-dny	Velmi nízký	400	Dřevěné uhlí
<b>Přeměna</b>	5-30 min	Nízký	600	Bioolej, dřevěné uhlí a plyn
<b>Pevný</b>	0.5-5 s	Vysoký	650	Bioolej
<b>Rychlá pyrolýza</b>				
<b>Kapalina</b>	<1 s	Vysoký	<650	Bioolej
<b>Plyn</b>	<1 s	Vysoký	<650	Chemikálie a plynné paliva
<b>Ultra</b>	<0.5 s	Velmi vysoký	1000	Chemikálie a plynné paliva
<b>Vakuum</b>	2-30 s	Střední	400	Bioolej
<b>Vodík-pyrolýza</b>	<10 s	Vysoký	<500	Bioolej a chemikálie
<b>Metan-pyrolýza</b>	<10 s	Vysoký	>700	Chemikálie

### Energetická bilance

Pyrolýza je celkově endotermní proces, ale část potřebné energie je možné pokrýt vyrobeným pyrolýzním plynem. Při cíleném odstranění plynných a kondenzovatelných škodlivin je pyrolýza postup vyhovující požadavkům životního prostředí. Následující blokové schéma představuje jednoduchou materiálovou a energetickou bilanci pouze pro proces pyrolýzy. Jak vyplývá z celé řady citací a blokových technologických schémat

vybraných procesů uvedených ve studii, je proces pyrolýzy vždy předřazen spalování produktů pyrolýzy, nebo je předřazen zplyňování s následným spalováním syntézního plynu jako produktu zplyňování. Energie zemního plynu slouží pro dodání tepla potřebného pro průběh pyrolýzy. Je samozřejmě možné dodávat teplo částí produkovaného plynu. Bilance je pro zjednodušení na pyrolýzní plyn, protože se předpokládá, že následné spalování probíhá bez předchozí kondenzace složek, které jsou za atmosférických podmínek kapalné. [14]



Obrázek 9: Hmotnostní a energetická bilance pyrolýzy [14]



Většina v současné době provozovaných pyrolýzních systémů je založena na termickém rozkladu odpadu v rotační peci vytápěné zevně spaliny, které vznikají z následného spalování pyrolýzních plynů v tzv. termoreaktoru. Pyrolýzní jednotky bývají vhodné pro šaržovitý provoz pro odpad, který nemá příliš vysoký obsah škodlivin a nemá tendenci ke spékání. Zbytek energie ze spálení plynů, která se nespotřebuje na ohřev vsázky, se využívá v kotlích na odpadní teplo k výrobě páry nebo teplé užitkové vody. Jiný modernější přístup, který je uvažován mimo jiné v rámci této práce, předpokládá využití pyrolýzního plynu jako chemické suroviny nebo jako topného plynu např. pro motory kogeneračních jednotek. [13]

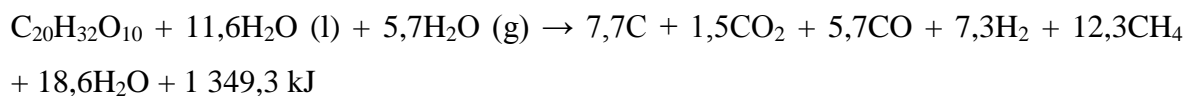
Dříve relativně skeptický pohled na možnosti materiálového a energetického využití pyrolýzních produktů se v posledních letech dosti podstatně mění. Příkladem může být velký rozvoj technologií zpracovávajících převážně odpadní biomasu v USA. Rozvíjí se mimo jiné zpracování odpadního dřeva a dalších substrátů dříve skládkovaných, čímž se rozšiřuje rozsah užitých zdrojů. Stoupá též zájem o energetické využívání chlěvské mrvy a kejdy, protože se zpřísnují předpisy zajišťující ochranu zemského povrchu a spodních vod před znečištěním. Technologie, které na základě rychlé pyrolýzy vyrábějí vysoce kvalitní pyrolýzní olej (většinou z dřevních pilin), se už dostaly v posledních letech na komerční úroveň. Ačkoli hlavní upotřebení kvalitního dřevního oleje je v oblasti biochemie, probíhá výzkum jeho užití i jako náhradního paliva, např. po úpravě pro pohon pomaloběžných lodních a podobných velkoobsahových dieselových motorů nebo spalovacích turbin. Některé společnosti dodávají na trh malé agregáty na využívání zplynované práškové biomasy s výkonem 12 až 400 kW určené především pro rozvojové země. Několik výrobců dodává malé spalovací turbíny s výkony o rozsahu 30 až 75 kW. [13]

Následující odstavce jsou věnovány stručnému popisu některých významných stávajících pyrolýzních nebo kombinovaných jednotek, které byly do současnosti realizovány jako provozní či alespoň pilotní. Je třeba uvést, že zastoupení pyrolýzních technologií je ve srovnání se spalováním dosud stále ještě okrajovým fenoménem, což se projevuje i na relativně malém počtu ve světě provozovaných zařízení. [13]

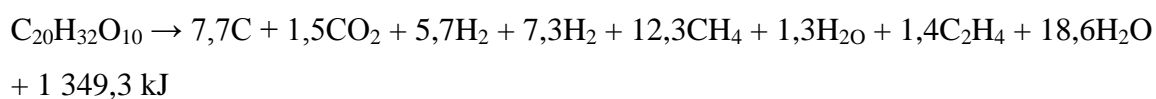
### **Technologické procesy pyrolýzy**

Běžnými produkty procesu pyrolýzy jsou zuhelnatělý zbytek, olej, pyrolýzní plyn a pára. Podíváme-li se např. na proces SilvaGas zpracovávající tříděný komunální a průmyslový

odpad (tzv. TAP), je chemická rovnice procesu odvozena v souladu s McKay Group LLC, 2009: [15]



Více molekul vody se nalézá na pravé straně rovnice než na levé. Z tohoto důvodu nebyl vznik páry významný pro hmotnostní a energetickou bilanci a může být odečtena od obou stran. Výsledkem je následně upravená reakce pyrolýzy: [15]



Tabulka 7: Seznam pyrolýzních postupů použitých pro zpracování odpadů - pilotní zařízení [14]

Označení postupu	Postup	Druh odpadu	Produkty	Kapacita
KWU proces Schwel-Brenn-Verfahren (SBV)	Rotační buben, nepřímý ohřev až 700 °C	SKO	Energie	200 kg·h <sup>-1</sup> Ulm, Wieblingen, SRN
Thermoselect	Rotační buben	SKO	Energie	Verbanie, Itálie
Mitsubishi	tavící kotel nepřímý ohřev 500 °C	Odpadní plasty	Olej, plyn	Tokio Japonsko 0,1 t·h <sup>-1</sup>
Union Carbide	Extruder nepřímý ohřev		Vosky	Pilotní zařízení USA
Voest Alpine	Šachtový reaktor přímý ohřev 500 – 700 °C	Vybrané druhy odpadů	Plyn, pára	Pilotní zařízení 0,65 t·h <sup>-1</sup> Linec, Rakousko
Waterloo University	Krátkodobá pyrolýza 500 – 700 °C	Plasty	Olej, plyn	Laboratorní zařízení Waterloo, Kanada
West Virginia University	Dvě fluidní jednotky jedna oxidační	Vybrané druhy odpadů	Energie	Laboratorní zařízení West Virginia University USA
BASF postup	Míchaný reaktor 400 °C	Vybrané druhy odpadů	Pyrolýzní olej, plyn	Pilotní zařízení 1,7 t·h <sup>-1</sup> Ludwigshafen SRN
Hamburg postup	Fluidní jednotka, nepřímý ohřev, 600 – 900 °C	Odpadní plasty	Pyrolýzní olej, plyn, saze	20-60 kg·h <sup>-1</sup> Universita Hamburg 0,5 t·h <sup>-1</sup> Ebenhausen, Ingolstadt SRN
DAL	Rotační buben	SKO, pneumatiky, drcené kabely	Pyrolýzní plyn, energie	Plaidt u Koblenz SRN 2 t·h <sup>-1</sup>
MVU	Rotační buben	Odpadní plasty, pneumatiky, kabely		200 kg·h <sup>-1</sup>
Destrugas-Postup von Kroyer	Šachtový reaktor	SKO	Plyn	Kalundborg Dánsko 250 kg·h <sup>-1</sup>
VŠB – TU PYROMATIC	Šneková retorta	Plasty, pneumatiky	Plyn, olej, koks Energie	Ostrava ČR 100 kg·h <sup>-1</sup>

## **Popis zkušeností z pyrolýzních zařízení v ČR**

V ČR nebyla technologie pyrolýzy pro zpracování odpadů v průmyslovém měřítku doposud aplikována. V současné době testuje VŠB – TU Ostrava pilotní zařízení na pyrolytický rozklad vybraných frakcí odpadů označovaný jako systém PYROMATIC.

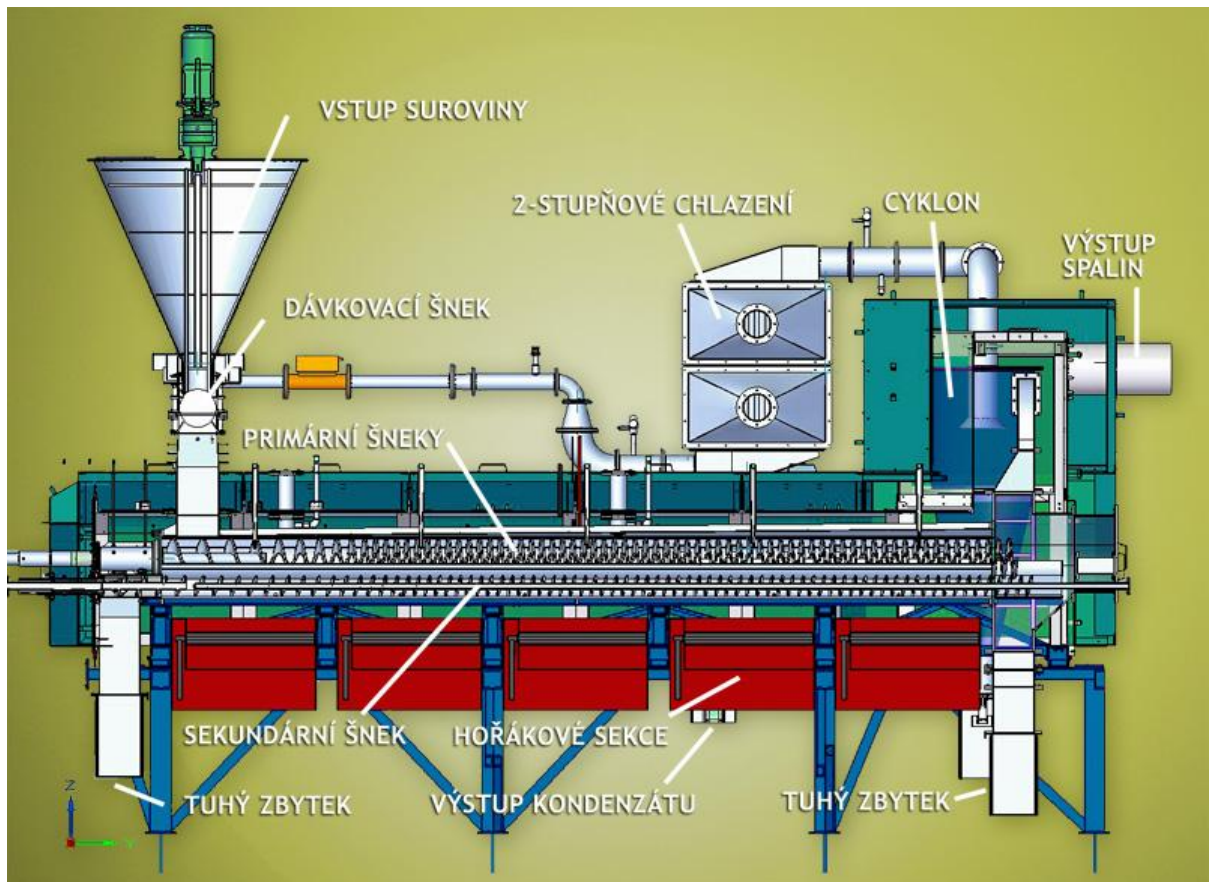
### ***Technologický popis pyrolýzní jednotky PYROMATIC [14]***

Mechanicky upravený materiál je navážen na požadovanou hmotnost váhou a následně nadávkován pasovým dopravníkem do hermeticky uzavřeného zásobníku. Pomocí zásobníkové stěrky a šnekového dopravníku je materiál dále dávkován do pyrolýzní pece. Šnekový dopravník je poháněn třífázovým asynchronním motorem s kotvou na krátko a regulace otáček je zabezpečena frekvenčním měničem.

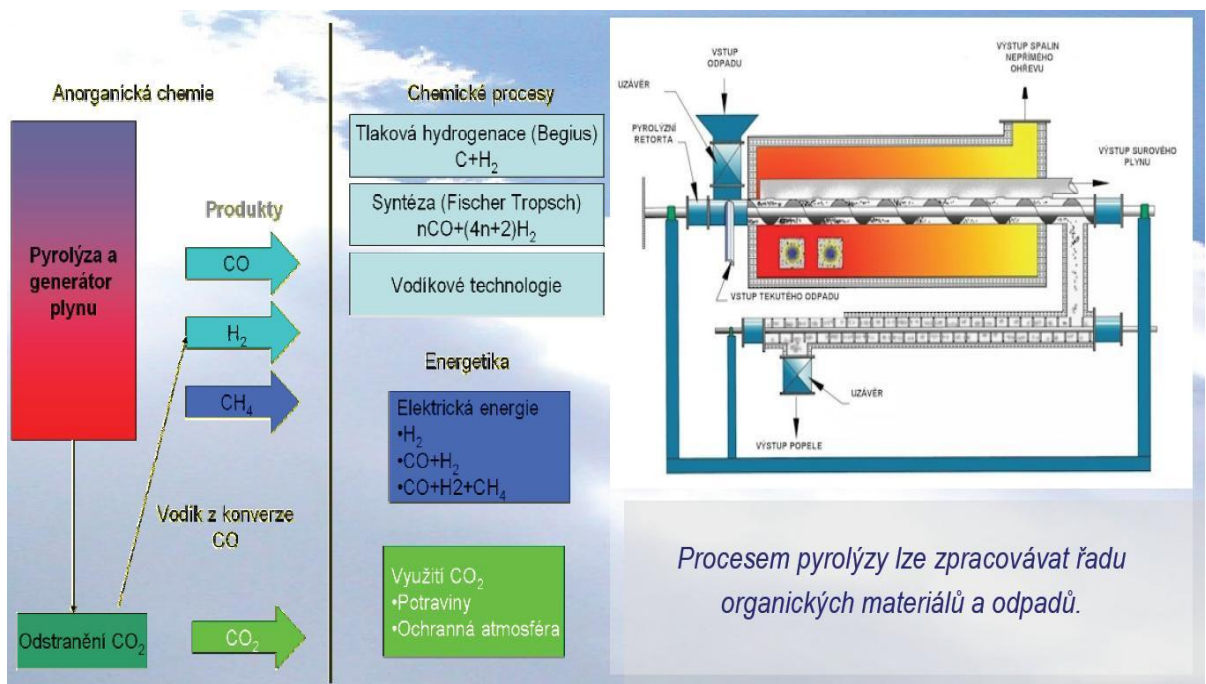
Po vyhřátí pece na požadovanou teplotu 500 až 700 °C je materiál postupně dávkován do pyrolýzní retorty. Aktivní délka tříšnekové retorty je 4 000 mm o průměru 2 · 210 mm a 1 · 110 mm. Posun materiálu v retortě je uskutečněn třemi bezjádrovými šneky, jejichž změnou rychlosti otáček lze měnit dobu zdržení materiálu v aktivní zóně retorty, od 20 do 80 minut. O pohon pyrolýzních šneků se starají třífázové motory s kotvou na krátko, které jsou řízeny taktéž frekvenčními měniči a jejich otáčky jsou redukovány přes planetovou převodovku. Ohřev retorty je zajištěn pomocí pěti sekcí plynových hořáků napájených propanem o celkovém výkonu 50 až 200 kW, které umožní dosažení maximální provozní teploty až 800 °C. Materiál v pyrolýzní peci je tedy rozkládán na pevný uhlíkový zbytek, který je jímán do popelového boxu na konci sekundárního šneku a plynou fázi, která je odváděna potrubím z retorty do cyklonu. Cyklon je zařízení, kde dochází k expanzi plynu a pomocí gravitace jsou odloučeny tuhé znečišťující látky. Tento vyčištěný plyn je dále odváděn do primárního chladicího stupně, kterým jsou dva křížové chladiče pyrolýzní plyn - vzduch. Sekundární dochlazování tvoří výměník pyrolýzní plyn - voda, kde je plyn podchlazován tak, aby nám v potrubí dále již nekondenzoval. Kondenzát vzniklý chlazením pyrolýzního plynu je shromažďován v nádrži na kapalnou pyrolýzní fázi. Tato nádrž je vybavena míchadlem, aby se zamezilo sedimentaci těžkých uhlovodíků. Ochlazený plyn je veden přes odběrovou sondu a průtokoměr do zásobníku pro pyrolýzní plyn odkud je následně spotřebováván dalšími technologiemi například kogenerační jednotkou.

Celá pyrolýzní jednotka je řízena pomocí počítače z velínu, jenž je umístěn v přilehlé budově. Výstupy z odběrové sondy jsou vedeny do analyzátorové skříně kde jsou analyzovány H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Dále je zde přiveden impuls z měřiče průtoku plynu,

teploty a vlhkosti plynu za sekundárním chladičem. V druhé skřini je umístěna řídicí jednotka ředění a jednotka úpravy ředícího vzduchu. Poměr ředění odebraného plynu je 1:50 nebo 1:100.

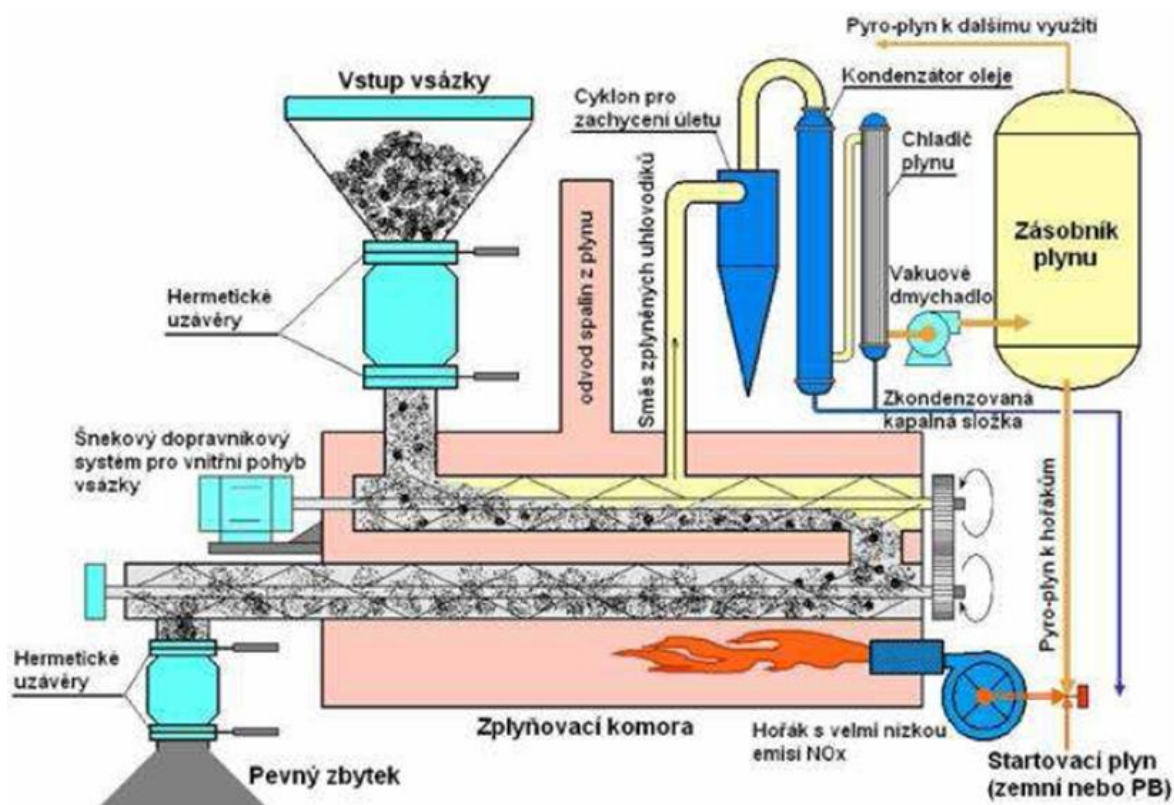


Obrázek 10: Schéma pyrolýzní jednotky PYROMATIC [16]



Obrázek 11: Chemické procesy a schéma pyrolýzní jednotky PYROMATIC [17]

Podobným technologickým zařízením jako je POROMATIC, které je představeno výše, se budu zabývat dále v praktické části mé práce. Je to **pyrolýzní zplyňovací systém M3RP** a jedná se o tzv. “vakuovou pyrolýzu“, která je termální depolymerací uhlovodíkových materiálů v evakuované, nepřímo ohřivané, retortě, tedy v bezkyslíkovém prostředí a za sníženého tlaku.

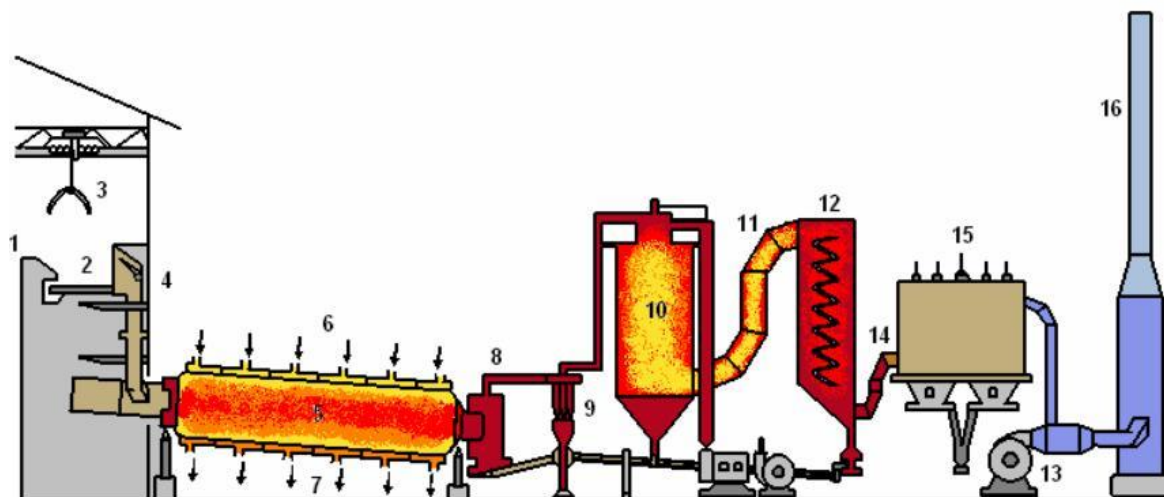


Obrázek 12: Schéma pyrolýzního zplyňovacího systém M3RP [19]

## Popis některých zařízení využívaných v průmyslovém měřítku v zahraničí

### *Pyrolýzní systém Babcock* [14]

Systém byl navržen pro odstraňování směsného odpadu typu TKO, čistírenských kalů apod.



Obrázek 13: Schéma pyrolýzní jednotky Babcock: [13]

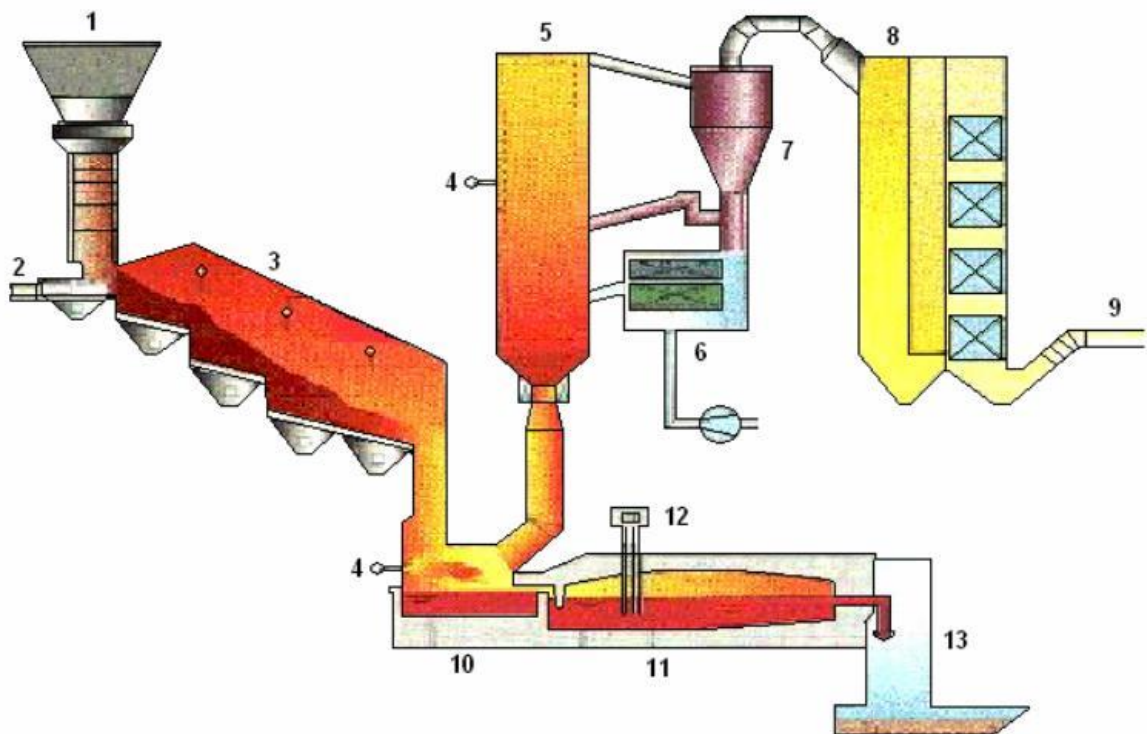
1 – svoz odpadu do bunkru, 2 – násypka, 3 – drapák suroviny, 4 – vstup vápna, 5 – rotační pyrolýzní pec, 6 – vstup otopových spalin, 7 – odtah otopových spalin, 8 – vynášecí komora, 9 – cyklon, 10 – spalovací komora, 11 – vstup spalin do kotle, 12 – kotel na odpadní teplo, 13 – spalinový ventilátor,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

Technologický proces je kombinací pyrolýzy a řízeného spalování neupraveného surového plynu. Pyrolýza probíhá v nepřímě otápeném bubnu při teplotách 500 až 600 °C. Plyn z pyrolýzní pece je v cyklonech zbaven většinového podílu tuhých částic a vstupuje do spalovací komory, kde shoří za teplot okolo 1 200 °C. Vznikajících spalin je využíváno dvojím způsobem. Především slouží k vlastnímu vytápění válcové pyrolýzní pece, které probíhá nepřímým způsobem. Zbytková entalpie spalin je pak využívána v kotli na odpadní teplo. Za tímto kotlem je zařazen tkaninový filtr na finální jemné odprášení. Plyny jsou čištěny suchou cestou za pomoci vápna, které je přidáváno jednak do samotného vstupujícího odpadu a dále vháněno do proudu spalin před tkaninovým filtrem.

### *Systém RCP ( Recycled Clean Products)* [13]

Systém byl navržen pro zpracovávání TKO. Jednotka o tepelném výkonu 17,5 MW s hmotnostním tokem odpadu 6 t·h<sup>-1</sup> je v provozu od roku 1997 v Bremerhavenu.

Základem zařízení je vnitřně vyhřívaná pyrolýzní komora, v níž probíhá kontrolované odplynění odpadu. Doba zdržení odpadu v komoře je regulována v závislosti na složení odpadu roštem typu Von Roll. Bezprostředně za pyrolýzním blokem je zařazena tavicí pec, kde za teplot přes 1 400 °C probíhá současné spalování plynu a tavení strusky. Struska je následně zušlechťována technologií HSR (Hochtemperatur-Schmelz-Redox) a upravována v granulační lázni na parametry umožňující její použití jako přísady do portlandských cementů.



Obrázek 14: Schéma jednotky RCP: [13]

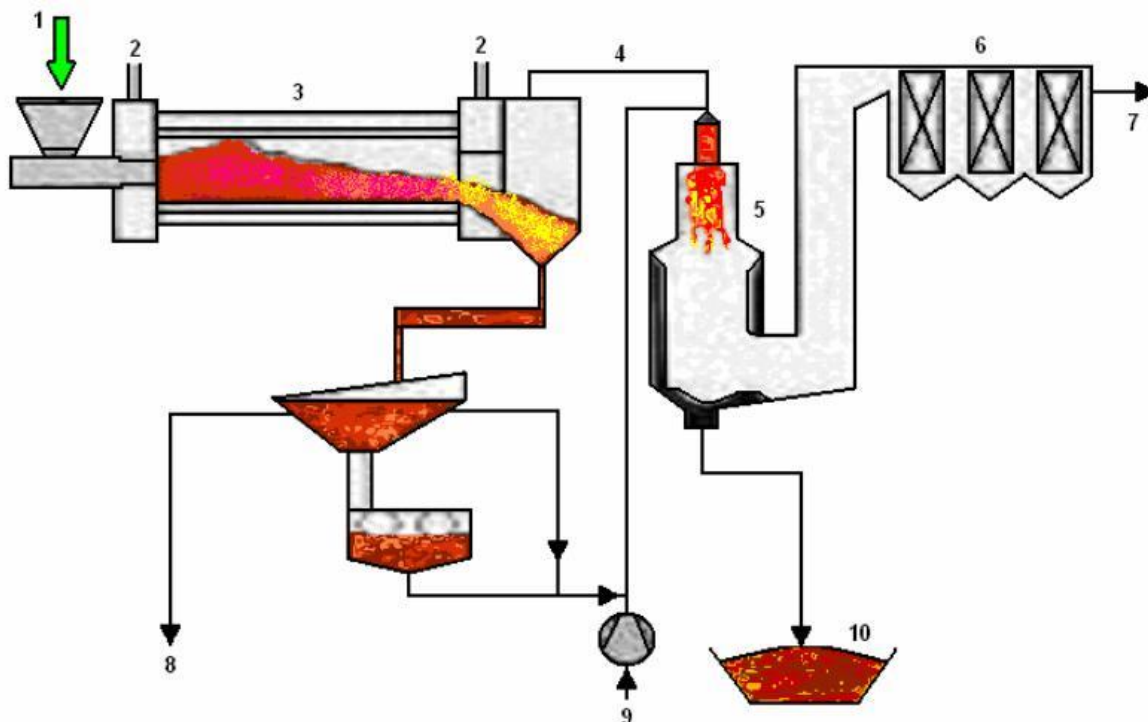
1 – násyp odpadu, 2 – podavač, 3 – pyrolýzní komora, 4 – přívod kyslíku, 5 – fluidní dopalovací reaktor, 6 – chladič, 7 – cyklon, 8 – kotel na odpadní teplo, 9 – výstup spalin k čištění, 10 – tavicí pec, 11 – odtah kovů, 12 – zušlechtění strusky, 13 – granulační lázeň

Horké spaliny z tavicí pece vstupují do fluidní dopalovací komory s cirkulující vrstvou, kde jsou zároveň chlazeny pomocí písku na teplotu nižší než 1 000 °C. Za fluidní komorou je zařazen cyklonový odlučovač úletu. Zbytkové teplo spalin je využíváno prostřednictvím kotle na odpadní teplo. Snaha o minimalizaci objemu spalin k čištění vedla k náhradě spalovacího vzduchu ve všech stupních čistým kyslíkem. Spaliny jsou denitřifikovány selektivní nekatalytickou redukcí. Odsíření je prováděno suchou vápencovou metodou a těžké kovy jsou odlučovány v kyselých pračkách. Díky přítomnosti vysokoteplotní tavicí pece štěpící cyklické uhlovodíky není výrobcem předpokládán vznik PCDD a PCDF.



### Technologie S-B-V firmy Siemens-KWU [13]

Zde je náčrt základní části zařízení S-B-V (Schwel-Brenn-Verfahren) v podobě, v jaké bylo realizováno roku 1988 v pilotní jednotce v Ulm-Wiblingenu a poté v provozním měřítku ve Fürthu. Kapacita provozního zařízení je deklarována na  $100\,000\text{ t}\cdot\text{r}^{-1}$  drceného odpadu a čistírenských kalů.



Obrázek 15: Schéma jednotky S-B-V: [13]

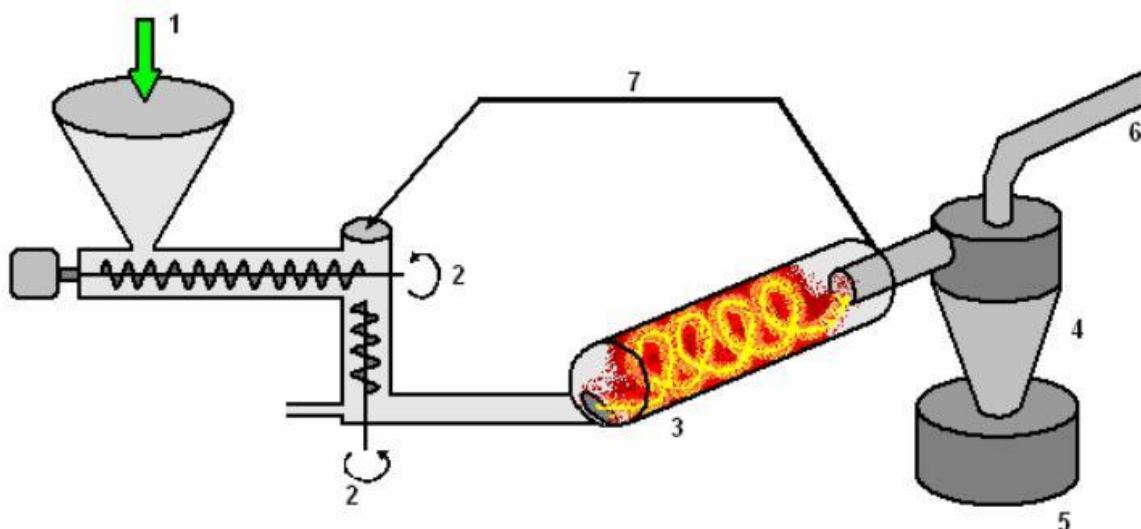
1 - vstup drceného odpadu, 2 – otop pyrolýzního reaktoru, 3 – pyrolýzní komora, 4 – výstup pyrolýzního plynu, 5 – spalovací sektor, 6 – kotol, 7 – odtah spalin na čištění, 8 – výstup hrubé frakce (kovy, sklo, kameny), 9 – přívod spalovacího vzduchu, 10 – granulační lázeň

Směsný odpad je spolu s kalem z ČOV kontinuálně přiváděn do rotační pyrolýzní komory, kde je po dobu přibližně 1 hodiny zahříván na teplotu  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z tuhého zbytku je poté na sítích oddělena hrubá frakce tvořená převážně sklem, kamením a kovy. Takto vyčištěný karbonizovaný zbytek je spolu s pyrolýzním plynem veden do spalovacího prostoru, kde probíhá dokonalé spalování při teplotách  $1\,200$  až  $1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vznikající struska je chlazená ve vodní granulační lázni a poté může být používána ve stavebnictví nebo deponována na skládkách. Spaliny se dále po odprášení odsiřují, denitrifikují a adsorpčně zbavují PCDD/PCDF. Firma Siemens uvádí, že z  $1\text{ t}$  TKO lze takto získat  $1\,470\text{ kWh}$  užitečného tepla.

### ***Pyrolýzní reaktor Vortex-Solar Energy Research Institute [13]***

System Vortex je určen pro konverzi tuhých organických látek a biomasy především na kapalné produkty. Schématický náčrt zařízení vyvinutého SERI (Solar Energy Research Institute) v Coloradu (USA).

Proud zpracovávaného materiálu je veden tangenciálně do reakčního prostoru, kde kontaktem s horkou stěnou pyrolýzérů a díky obvodové rychlosti přes  $350 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dochází k rychlé pyrolýze za teploty stěny  $625 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zatímco postup tuhých částic reaktorem je zpomalován intenzivním třením o jeho stěny, vznikající pyrolýzní plyn odchází středem zařízení s velmi krátkou dobou zdržení. System byl testován na měkkém suchém dřevu a na měkkých předdrcených peletách RDF (Refuse Derived Fuel).



Obrázek 16: Schéma pyrolýzní jednotky Vortex-SERI: [13]

- 1 – vstup suroviny, 2 – šnekový podavač, 3 – reaktor s tangenciálním vstupem, 4 – cyklon,  
5 – kolektor tuhého zbytku, 6 – odťah pyroplynu, 7 – recykl prachových částic

Z dřeva bylo při hmotnostním toku suroviny  $10,6 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  vyprodukováno 10 až 12 % tuhých zbytků, 13 až 16 % vody a reálně 54 % kapalného organického produktu. Z RDF bylo obdobným způsobem vyrobeno 44,1 až 41,6 % kondenzátu. Převedení zařízení do provozního měřítka dosud naráží na problémy spojené se zanášením reaktoru částicemi s vysokou hustotou a s vysokou abrazí způsobenou tvrdými anorganickými komponentami přítomnými zejména v RDF.

#### ***Co je RDF:***

V současné době neexistuje žádná závazná definice významu Refuse derived fuel (RDF) a tento název je v různých zemích interpretován odlišně. Je to dáno i tím, že je terminologie ovlivněna specifickými odpady, u kterých existují místní a legislativní

požadavky na recyklaci. „Refuse“ je běžný název pro komunální odpad v anglických zemích a RDF je obvykle vztaženo k tříděné, vysokovýhřevné frakci komunálního a průmyslového odpadu. V Itálii zkratku RDF nahradilo označení CDR (Cumbustibili derivato di rifiuti) a v Německu se používá zkratka BRAM (Brennstoff aus Müll) případně v širším slova smyslu termín EBS - Ersatzbrennstoff. [18]

### 3 VÝCHOZÍ PODMÍNKY ŘEŠENÍ A NÁVRH INOVACE

Praktickou část předkládané diplomové práce jsem zpracovával na pyrolytickém systému M3RP, dodavatel: AmbientEnergy LLC. (USA), výrobce Scogen (Indie) u společnosti AGMECO LT, s.r.o., která byla založena na podzim roku 2003. Ve své činnosti navázala na více než desetiletou činnost společnosti Agmecol spol. s.r.o.

Za účelem zlepšení životního prostředí se společnost AGMECO LT, s.r.o. zaměřila rovněž na dodávky technologie, která umožní vyřešit problémy se složitě biologicky odbouratelnými odpady hromadícími se na skládkách a hrozící vyvoláním katastrof např. při požáru, kontaminací půdy a spodních vod atd.

#### 3.1 VÝCHOZÍ STAV [19]

##### Základní údaje o záměru:

Produkce (množství zpracovaných odpadů)	max. 1 800 t ·rok <sup>-1</sup>
Fond pracovní doby:	max. 300 dnů·rok <sup>-1</sup> · 8 hod·den <sup>-1</sup> (1 směna)
Energie:	
Elektrická energie	230/400 V, 50 Hz, 3 · 80 A

##### Základní technické a technologické vybavení provozovny

###### *1. Dílenské prostory a kanceláře*

- kancelář provozu
- velín
- hala třídění a drcení odpadů
- hala pyrolytické jednotky
- sociální zázemí zaměstnanců

###### *2. Skladovací prostory*

- sklad odpadů (pneumatik) na zpevněné ploše
- sklad (zásobník) drtě
- mezisklad
- úložiště pyrolýzního oleje
- sklad pevného zbytku (sazí)

### 3. Zpevněné plochy a jámky

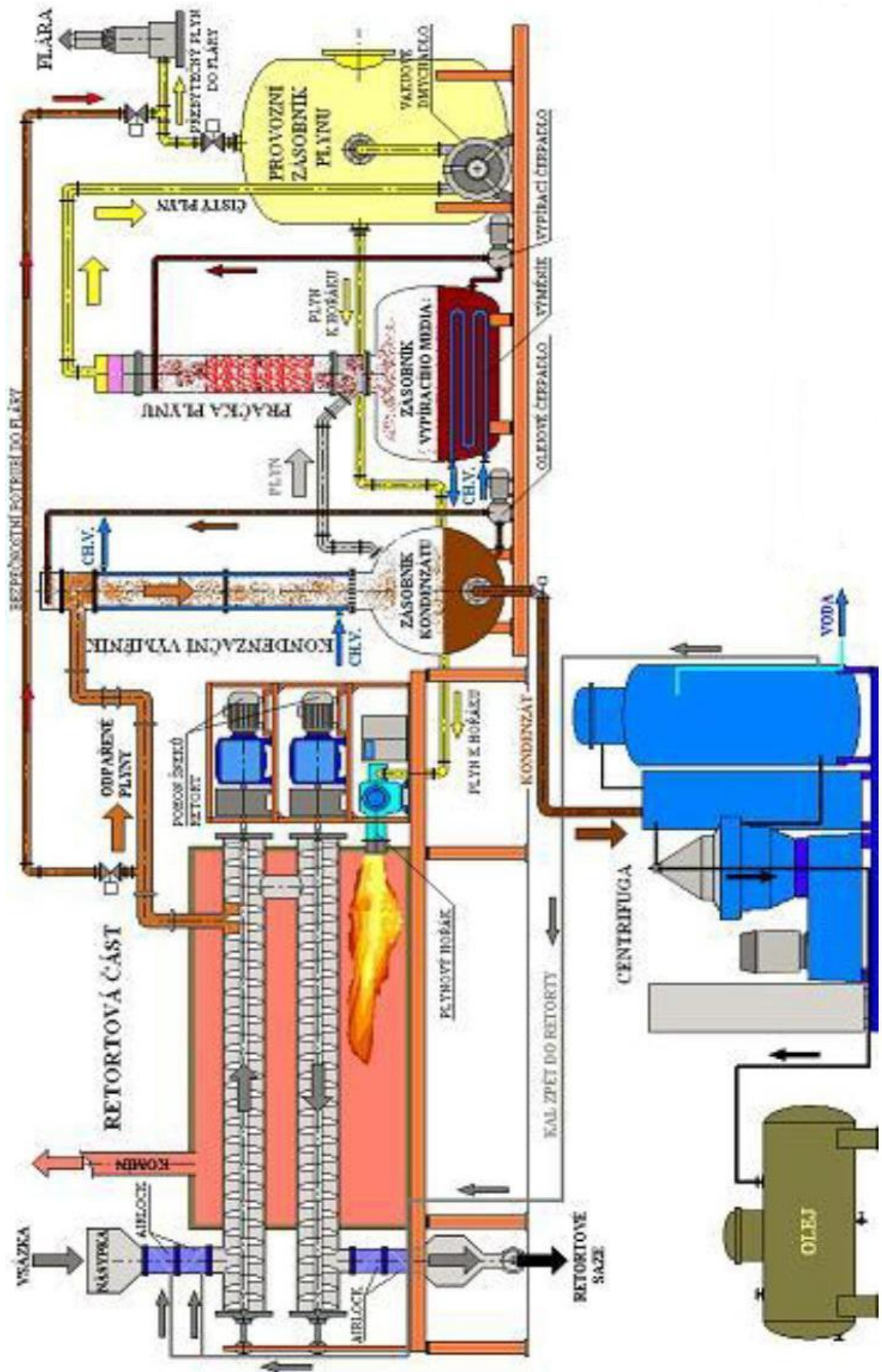
- jámka na užitkovou vodu – součást ČOV
- lapol - součást ČOV záchytná vana na úkapy
- přístupové a objezdové komunikace
- zpevněné manipulační plochy

### 4. Technologie, manipulace

- pyrolyzní jednotka: M3RP, dodavatel: AmbientEnergy LLC. (USA), výrobce Scogen (Indie)
- dopravní pás šířky 800 mm od skladu odpadu k drtiči
- drtič o výkonu  $500 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$
- zásobník drtě s vynášecím dopravníkem
- dopravní pás od drtiče k zásobníkům
- šnekové dopravníky od drtiče k násypce retorty

#### Technologický popis procesu

Odpady (pneumatiky apod.) budou pomocí vysokozdvížného vozíku 2 t dopraveny, složeny a dočasně umístěny do skladového prostoru v hale. Pomocí vysokozdvížného vozíku 1,5 t, trvale umístěného v hale, bude odpad přemístěn k dopravnímu pásu, na který bude navazovat drtič odpadů o výkonu  $500 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$  což představuje např. 50 ks pneumatik z osobních aut. Drtič bude usazen na zásobníku drtě o frakci cca  $50 \cdot 50 \text{ mm}$  s pohyblivým dnem a vynášecím dopravním pásem, svislým korečkovým dopravníkem a dopravním pásem přivádějící pryžovou drť do násypky retortové části pyrolytické jednotky.



Obrázek 17: Schéma pyrolytické jednotky [19]



Obrázek 18: Fotka pyrolytické jednotky



Obrázek 19: Fotka retortové části

Vzniklý pyrolytický plyn je odsáván přes speciální filtrační a separační systém, k odloučení prachových částic (uhlíkové úlety) slouží speciální horko plynové filtry, které jsou schopné krom prachových částic ( $PM < 2 \text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ), zachytit za pomoci suchého praní, při užití speciálních sorbetů i další možné znečišťující látky jako  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  a dokonce i  $\text{NO}_x$ .

Následně je pyrolytický plyn veden k věžové kondenzační pračce plynu (Tower Scrubber), sloužící k odstranění zbývajících prachových částic a kondenzaci těžké kapalné frakce. Kondenzace je podporována vypírací kapalinou, která je do výplně pračky vstřikována. Zachycená těžká frakce je odváděna zpět do vakuové retorty, kde je opět odpařena a depolymerována. Následně je takto pročištěný plyn veden do kondenzační kolony tvořené soustavou výměníků tepla napojených na systém s chladicí věží, plyn se ochlazuje a dochází ke kondenzaci do kapalné fáze (vznik olejů). Vychlazený a vyčištěný nezkondenzovatelný plyn (cca  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ) je poté čerpán do vloženého vyrovnávacího zásobníku (nízkotlakého tanku), ze kterého je plyn použit jako palivo pro hořáky retorty. Jednotka SCOGEN M3RP je konkrétně osazena hořákem od firmy GB-GANZ, typ ABG-45 s instalovaným výkonem 160 až 380 kW. Spaliny z hořáku retorty (ohřev retorty) dosahují emisních hodnot dle údajů výrobce hluboce pod stanovenými limity. Jako startovací plyn pro hořák pyrolýzní jednotky se bude v konkrétním případě využívat propan-butan. Když tlak vyrobeného pyrolýzního plynu dosáhne nastavené hodnoty, řídicí systém přepne speciální plynový trojcestný ventil a uzavře přívod PB.

Typ ABG-45PB-EEX

Hlavní technické údaje:

Rozsah výstupního výkonu 160 až 380 kW

Startovací výstup 140 kW

Palivo: LPG, zemní plyn, PB

Snižovací poměr 1:2

Detektor plamene: ionizační elektroda

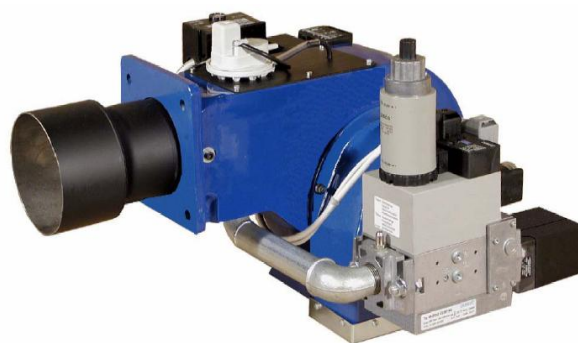
nebo UV na zvláštní přání

Primární řízení spalování: LGB 21/22 v agy LMG 21/22 (Landis)

El připojení: 230 V, 50 Hz + PE, 300 W

Elektrická ochrana: IP 20, na speciální přání IP 40

Váha: 35 až 41 kg v závislosti na použitém průměru plynového řádu.



Obrázek 20: Hořák ABG-45 [19]



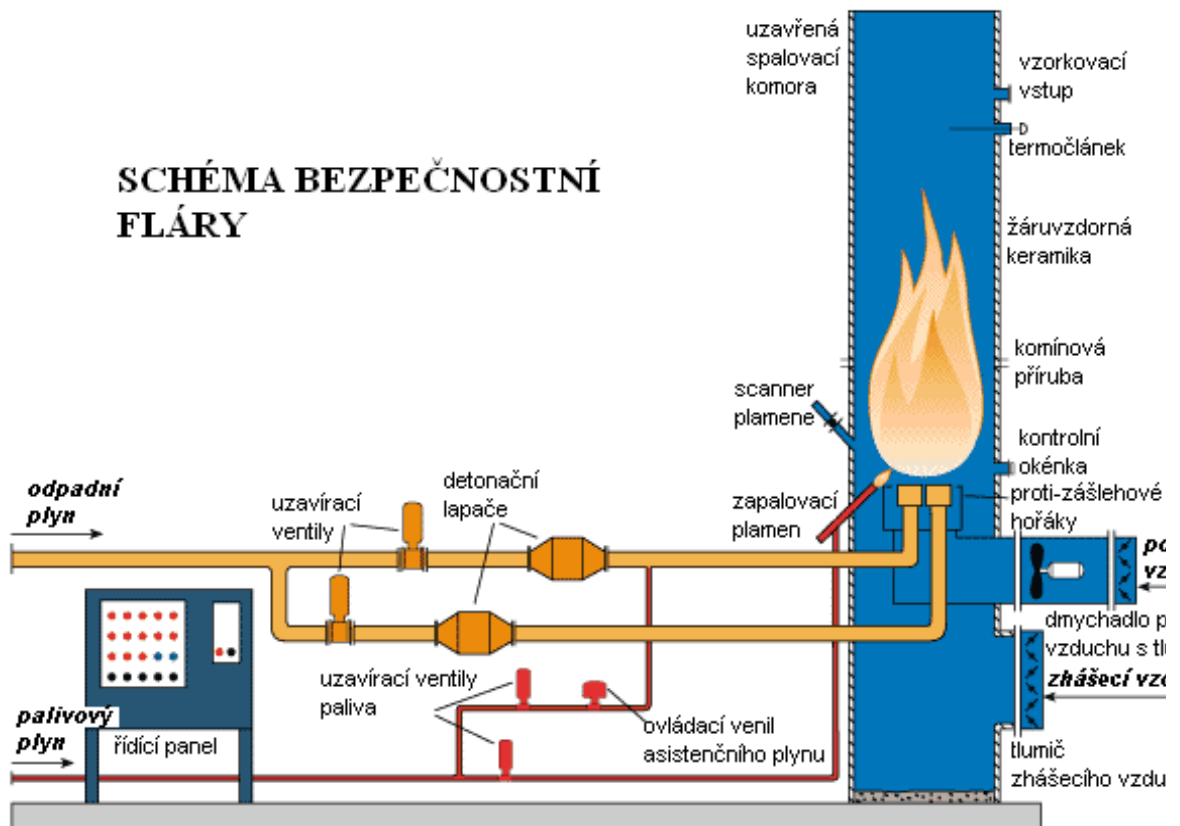
Hořák dosahuje dle výrobce tyto emise:

Zemní plyn:  $\text{CO} = 9 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ ;  $\text{NO}_x = 127 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$   
 (E 676 limit:  $\text{CO} = 100 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$   $\text{NO}_x = 170 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ )

LPG  $\text{CO} = 11 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ ;  $\text{NO}_x = 178 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$   
 (E 676 limit:  $\text{CO} = 100 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$   $\text{NO}_x = 230 \text{ mg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ )

Do systému je zařazena bezpečnostní fléra, která bude spalovat přebytečný, tedy nespotřebovaný pyro-plyn a spaliny emitovat do ovzduší. Fléra také slouží jako bezpečnostní pojistka pro případ poruchy na zařízení. V takovém případě řídicí systém dá povel k odčerpání plynu ze systému a jeho bezpečnému spálení ve fléře.

Ve fléře odpadní plyn vstupuje sběračem do spodku zařízení a je poté odkloněn do řízené trasy hořáku. Speciálně navržený hořák promíchá odpadní plyn, dávku přirozeně nasátého vzduchu a nosný (pomocný) plyn, je-li třeba. Přídavný vzduch se získává odděleným sacím potrubím. Vzduch, který se nezúčastní hoření, odchází vzhůru komínem a vytváří v něm ochranou bariéru a zároveň snižuje teplotu komínové stěny. Schéma je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 21: Schéma bezpečnostní fláry [19]

## **Výbava:**

Termoelektrický článek: Používá se k určení a přenosu informací o vnitřní komínové teplotě. Bývá připojen k teplotnímu displeji, eventuálně přenáší signál do řídicího počítače. Provozní rozsah je obvykle 0 až 1 600 °C.

Teplotní výstupní displej: Dostává 4 až 20 mA signál z termočlásku a zajišťuje zobrazení teploty uvnitř komína oxidizéru.

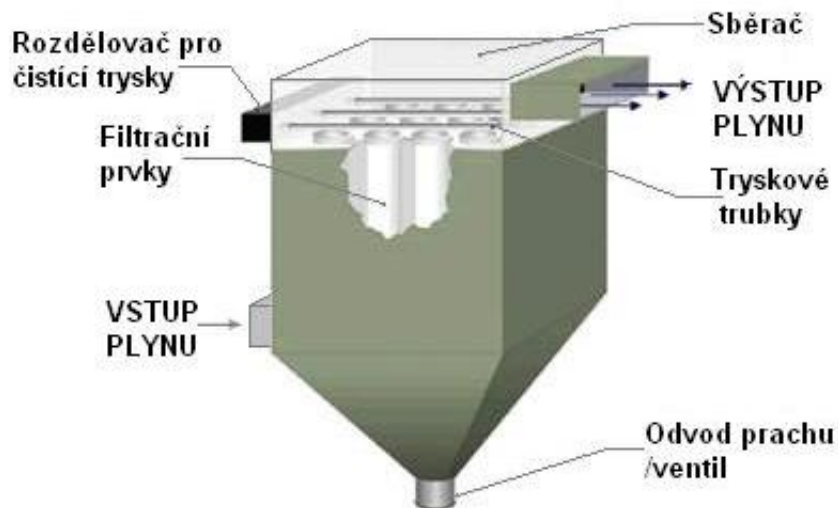
Poloautomatické řízení odpadního plynu: Odpadní plyn je řízen manuálně kulovými kohouty (ventily) ve spojení s jedním nebo více regulátory zpětného tlaku vložených mezi hlavním potrubím odpadních plynů (sběračem) a TCI kruhovými hořáky. Tento systém je typicky používán pro nepředvídatelný a značný průtok odpadních plynů.

Ruční nebo havarijní (v případě uhasnutí plamene) zapalování: Ruční tlačítko piezo zapalovače se typicky používá k nouzovému použití lidskou obsluhou. Jiskra zapálí palivo (topný plyn), který zažehne plamen v hořácích uvnitř zařízení. Informaci o poruchách plamene přeneše zapalovací systém na řídicí panel, který spustí poplašné systémy a průběžné znovuzapálení.

Vlastní pyrolýzní jednotka, sestávající ze dvou částí (retortové a úpravny plynu), bude umístěna v hlavní hale navazující na sklad pneu. Součástí pyrolýzní jednotky je shora popsaná kondenzační jednotka, a jako příslušenství pro úpravu vyprodukovaného oleje je zařazena centrifuga Alfa-Laval, která je schopna oddělit z oleje vodu, zbylé nečistoty a dokonce oddělit od sebe oleje podle na základě jejich specifické váhy. K zařízení může být dále připojena kogenerační jednotka (zatím se, z důvodů zvýšení investice o ní neuvažuje), potřebující přebytečný pyro-plyn a sanující požadavky zařízení na elektrickou energii. Zkondenzovaný olej bude jímán do mobilního zásobníku umístěného mimo budovu na zabezpečené ploše izolované proti úkapům oleje při manipulaci s ním.

Pyrolytický plyn bude v prvním stupni filtrován a čištěn pomocí keramických filtrů. Filtry mají následující výhody:

- Typická pracovní teplota mezi 200 až 600 °C s maximem 900 °C
- Vysoká účinnost sběru na výstupu z filtračního zařízení; hodnoty jsou nižší než 0,001 (2 mg·Nm<sup>-3</sup>) a v řadě případů dosahují hodnot nižších než (1 mg·Nm<sup>-3</sup>). Na vstupu může být i dosti vysoké zatížení. Uvádí se až (2 300 mg·Nm<sup>-3</sup>)
- Filtry jsou odolné korozi; keramika je takřka inertní s výjimkou vysokých koncentrací HF



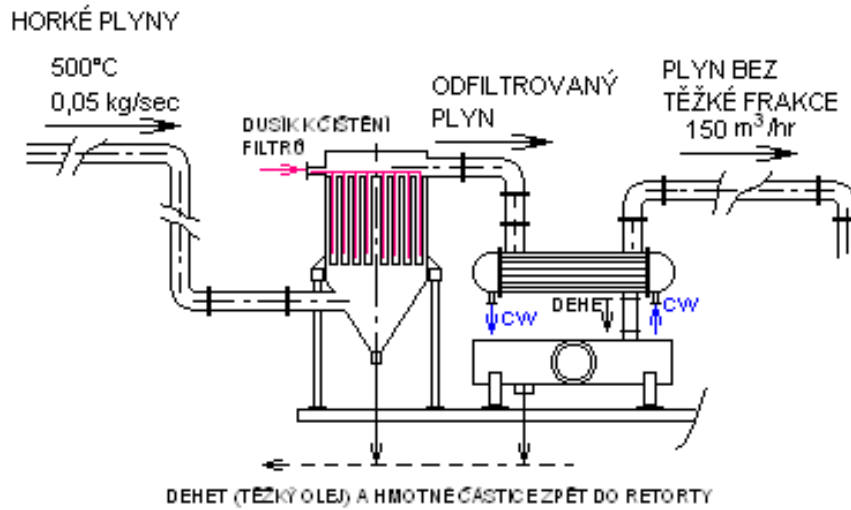
Obrázek 22: Zařízení pro filtraci [19]

Čištění filtru se provádí zpětným pulsem vzduchu či inertního plynu (dusíku vyrobeného Membránovým generátorem N<sub>2</sub> INMATEC IMT-SN750). V systému je spolehlivé a snadno přístupné zařízení, které čištění umožňuje. Tento filtrační systém má možnost vstřiku kalciových nebo sodíkových sorbentů před tím, než dojde k filtraci plynů pro odstranění kyselosti plynů (SO<sub>2</sub>, HCl). Filtrační systém snadno vychytá tyto další vzniklé polutanty.

- SO<sub>2</sub> odstranění až 97 % v závislosti na aplikaci
- HCl odstranění až 99 % v závislosti na aplikaci

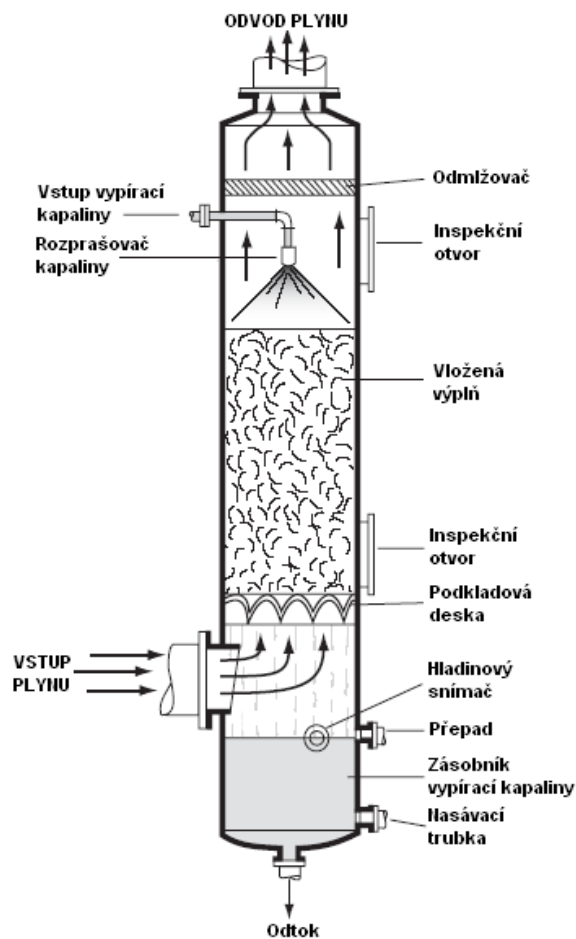
V případě potřeby lze odstraňovat NO<sub>x</sub>, VOC, dioxiny. Filtrační elementy s vloženými katalyzátory umějí tyto polutanty velice účinně odstraňovat. Velkou výhodou tohoto filtračního systému je to, že je lze ušít na míru způsobu použití, lze injektovat sorbenty, použít katalyzátory apod. a tím velice účinně snížit i tak nízké znečištění plynu s účinností až 90 %.

Ve druhém stupni budou kondenzovány dehty a těžké oleje podle následujícího schématu.



Obrázek 23: Kondenzace dehtů a těžkých olejů (II. stupeň) [19]

Třetí stupeň čištění probíhá na pračce plynu



Obrázek 24: Sloupcová výplňová pračka plynů (III. stupeň) [19]

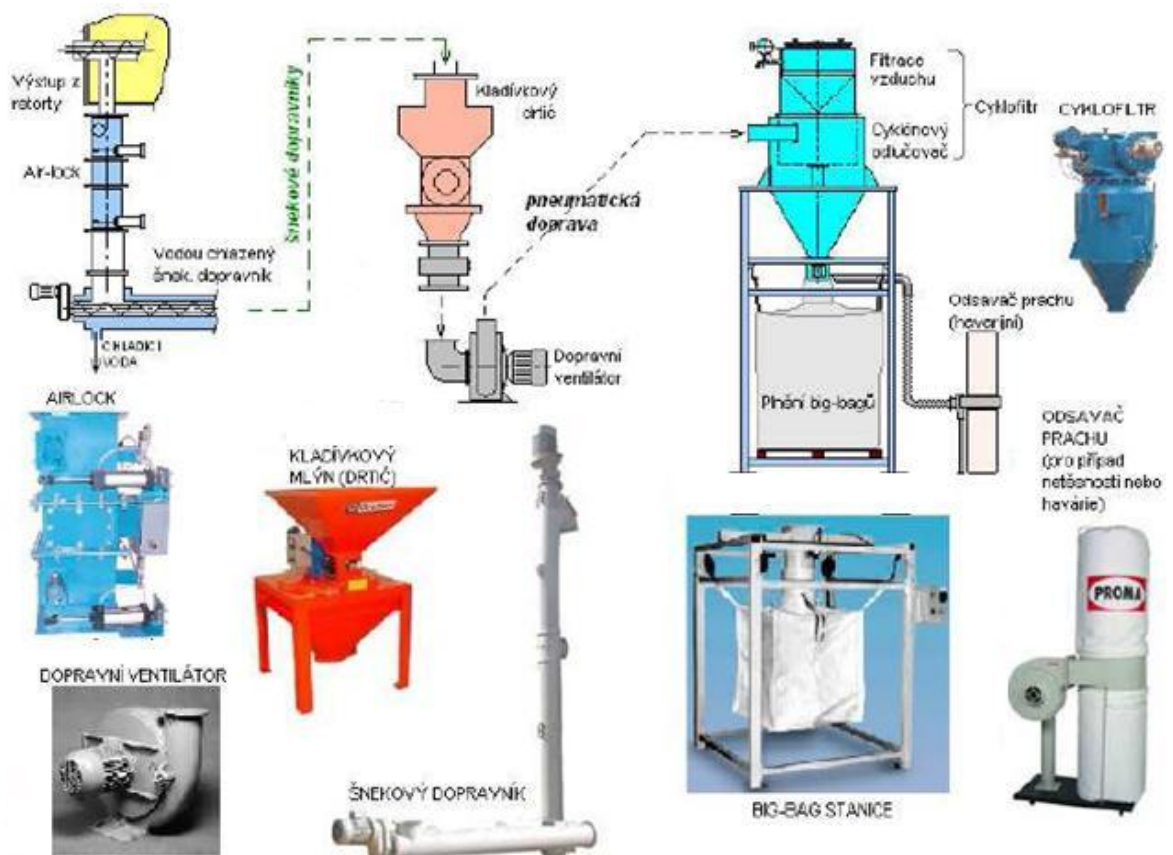
Posledním stupněm čištění je odstředivá separace kapalných produktů podle specifické váhy a oddělení vody z oleje.



Obrázek 25: Centrifuga Alfa Laval [19]

Separované prachové částice (uhlík) jsou produkovány a transportovány v podtlakovém a hermeticky uzavřeném prostředí. Při vypadnutí tuhého zbytku z retorty do vzduchotěsného, ochlazovaného zásobníku (ochlazení na cca 150 °C), navíc dojde k jeho mírné aktivaci (snížení prašnosti). Dopravní ventilátor bude umístěn až za kladívkovým mlýnem. Plnění big-bagů se provádí v zařízení, které je vybaveno cyklonem s filtračním rukávцем, který zachytí dle informací dodavatele až 99,8 % sazí o granulometrii 40 mikronů.

Schéma dopravy uhlíku je na následujícím obrázku:



Obrázek 26: Schéma dopravy uhlíku (sazí) [19]

Zařízení neobsahuje kogenerační jednotku. Lze však uvažovat o eventuálním rozšíření systému v případě potřeby v budoucnosti.

### Ostatní surovinové a energetické zdroje (například druh, zdroj, spotřeba)

V provozu budou užívány níže uvedené surovinové a energetické zdroje. Pro potřeby oznámení je uváděn odhad úrovně spotřeb:

Elektrická energie: instalovaný příkon 120 kWh  
spotřeba cca 960 kWh denně při jedné směně

Zemní plyn / propan-butan: 15 kg jednorázově při startu

Vstupní odpady: 250 kg·hod<sup>-1</sup>, tj. 6 t·den<sup>-1</sup>

Vlastní pyrolytický proces v uzavřených retortách vyžaduje elektrickou energii pro pohon vnitřních šneků v retortách, pohon vakuových dmychadel, čerpadel oleje a chladicí vody a ventilátoru chladicí věže, což si vyžádalo nainstalovat příkon cca 35 kW. Příprava vsázky, která používá drtič pneu DRT 900 firmy ODES Jaroměř a několik dopravníků

vsázky má nainstalovaný příkon cca 35,2 kW. Instalovaný příkon pro dopravu a úpravu sazí je 10,7 kW a další spotřeby jako osvětlení, boiler atd. tvoří cca 12 kW, tedy celkem bez centrifugy Alfa Laval je nainstalován příkon 93 kW. Centrifuga je vybavena elektrickým topením (18 kW) pro ohřev odstředovaného oleje na teplotu cca 55 °C pro dosažení odpovídající viskozity a vlastními motory s příkonem cca 9 kW. Spotřeba byla odhadnuta podle procenta souběhu při provozu v jedné směně na 960 kWh. Výhledově bude do výrobního procesu zařazena též kogenerační jednotka, která nejenže pokryje vlastní spotřeby zařízení, ale přebytky lze odprodávat do veřejné sítě.

Přívod elektrické energie do areálu je zajištěn přípojkou. Samotná spotřeba v současné době zdaleka nedosahuje instalovaných hodnot a s realizací záměru dojde pouze k jejímu nárůstu v mezích současných možností. Výrobní a sociální objekty jsou zásobovány elektrickou energií z rozvodů Středočeská energetická a.s.

K prvotnímu zahřátí retort je použit propan-butan (dále jen PB), pro jednorázové zahřátí jednotky se předpokládá spotřeba 15 kg PB. Následná spotřeba je autonomní, tj. pro hořáky v retortách se využívá vyrobený pyrolytický plyn.

## 3.2 POŽADAVKY NA INOVACI

V rámci linky bude umístěna úpravna sazí (pevného uhlíkového zbytku) se separací kovových předmětů (ocel z kordů pneumatik) magnetickým separátorem.

V pneumatice osobního vozu se vyskytuje přibližně 1,13 kg ocelových drátů v kordu pneumatiky a patním lanku. Pro výrobu se používá kvalitní uhlíková ocel s vysokým obsahem uhlíku a jmenovitou pevností v tahu okolo 2,75 MN·m<sup>-2</sup> (ASTM 1070 Ocelový drát pro pneumatiky).

### **Magnetická separace**

Magnetická separace má za úkol z materiálu vytřídit feromagnetické kovy. K tomuto účelu slouží různé druhy magnetických separátorů, které lze dělit dle konstrukce na blokové (deskové, stacionární), bubnové a pásové. Podle principu činnosti pak rozeznáváme separátory s permanentními magnety a elektromagnety (pro separování feromagnetických materiálů, tj. železných kovů) a na separátory využívající vířivých proudů (pro separaci paramagnetických a diamagnetických materiálů vedoucích elektrický proud, tj. neželezné kovy). Separátory, které mají permanentními magnety, jsou nezávislé na elektrické energii a oproti ostatním druhům jsou také levnější, na druhou stranu, elektromagnety se podstatně lépe čistí - v podstatě je stačí vypnout. Výhodou bubnových a pásových separátorů je jejich samočisticí schopnost.

Vzhledem k tématu předkládané práce a potřeby vyseparování a okamžitého odvodu relativně většího množství feromagnetického materiálu, který znehodnocuje pevný uhlíkový zbytek z pyrolýzního procesu pro další využití a sám je druhotnou surovinou, se výběr konstrukce magnetického separátoru a její následné teoretické představení omezí na reálně použitelné druhy, které se dají zakomponovat do stávající linky.

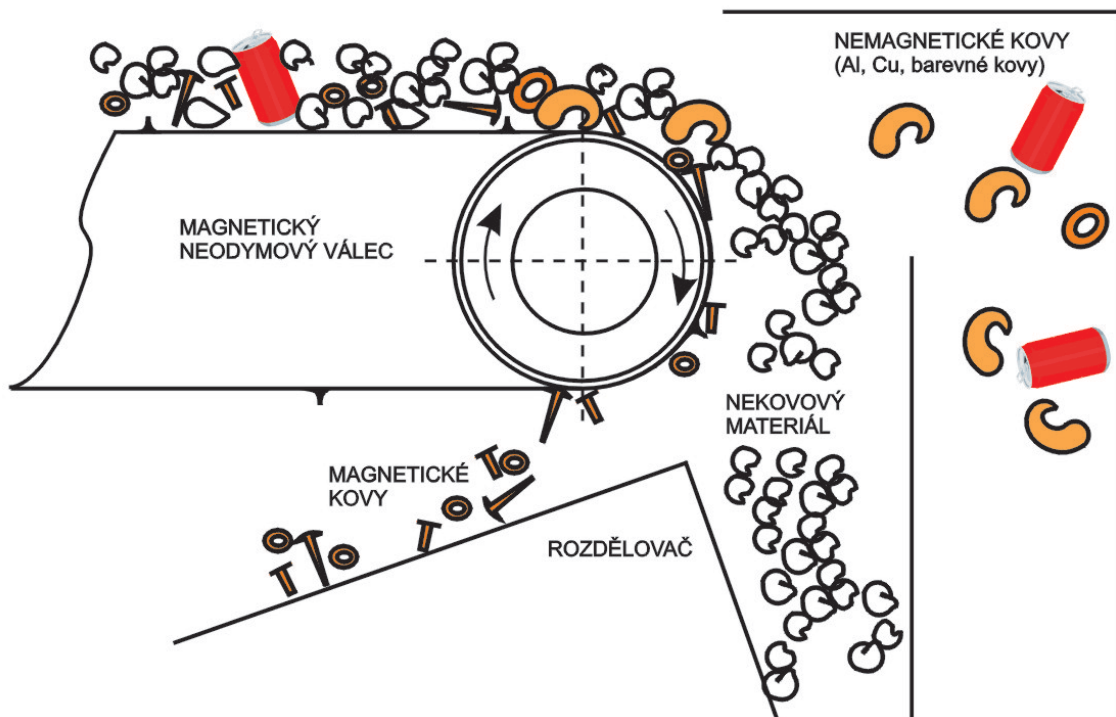
### **Alternativní konstrukce magnetických separátorů**

#### ***1. Bubnové magnetické separátory***

Tato konstrukce magnetického separátoru je jedna z nejpoužívanějších, jelikož je jednoduchá a možnost její implementace do provozní linky je velmi výhodná. Buben magnetického separátoru nahrazuje stávající hnací buben dopravníku a svými magnetickými vlastnostmi pozdrží feromagnetické částice na pásu o něco déle, dokud se nedostanou z jeho dosahu. Následně padají vyseparované částice do zásobníku a ostatní putují dál. Výhodou je praktická bezúdržbovost celého systému, s nutnou podmínkou nízké vrstvy materiálu při vstupu na dopravníku. Tím se zabrání strhnutí magnetických částic



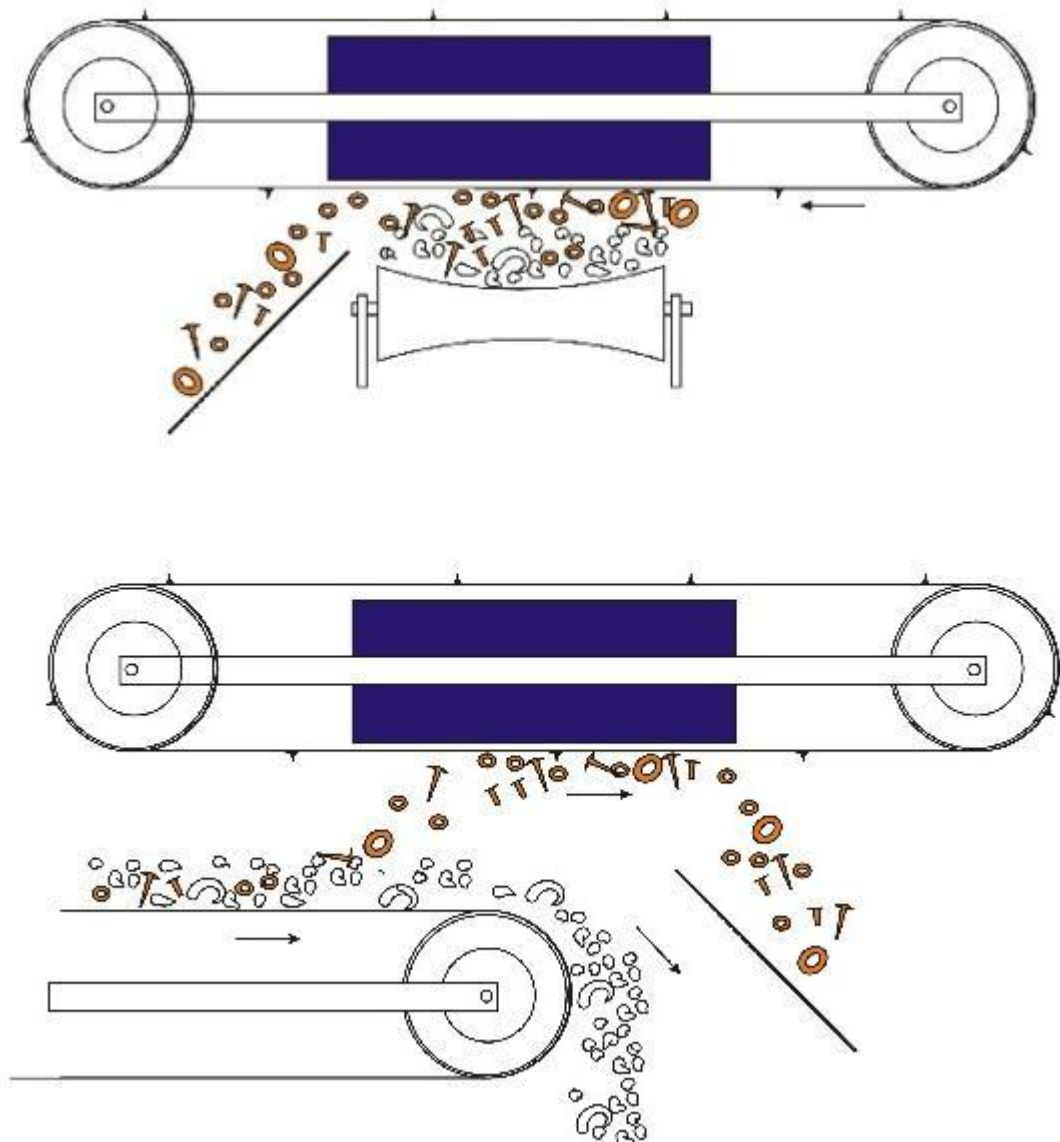
s ostatním materiálem. Tomu lze také předejít stěrkou na začátku dopravníku, nebo zrychlením pásu. [20]



Obrázek 27: Schéma bubnové magnetické separace [21]

## 2. Příčné nebo podélné pásové magnetické separátory

Neméně významnými zástupci jsou příčné nebo podélné pásové magnetické separátory. Jejich instalací vůbec nedochází k zásahu do stávající linky, protože vlastní separátor je umístěn nad pásovým dopravníkem. Vlastní separátor je tvořen permanentním magnetem či elektromagnetem, přes který obíhá pás dělený na pole. V okamžik, kdy se na pásu s materiálem objeví feromagnetická částice a dostane se do dosahu separátoru je přitažena na dopravník separátoru a odváděna mimo. Tímto způsobem je zajištěno samočištění a údržba se tak omezuje na příležitostné promazání ložisek. Kvalita separace je kromě síly magnetu závislá na blízkosti separátoru u pásu, ale také na síle vrstvy materiálu, kterým částice musí před přitažením projít. [20]

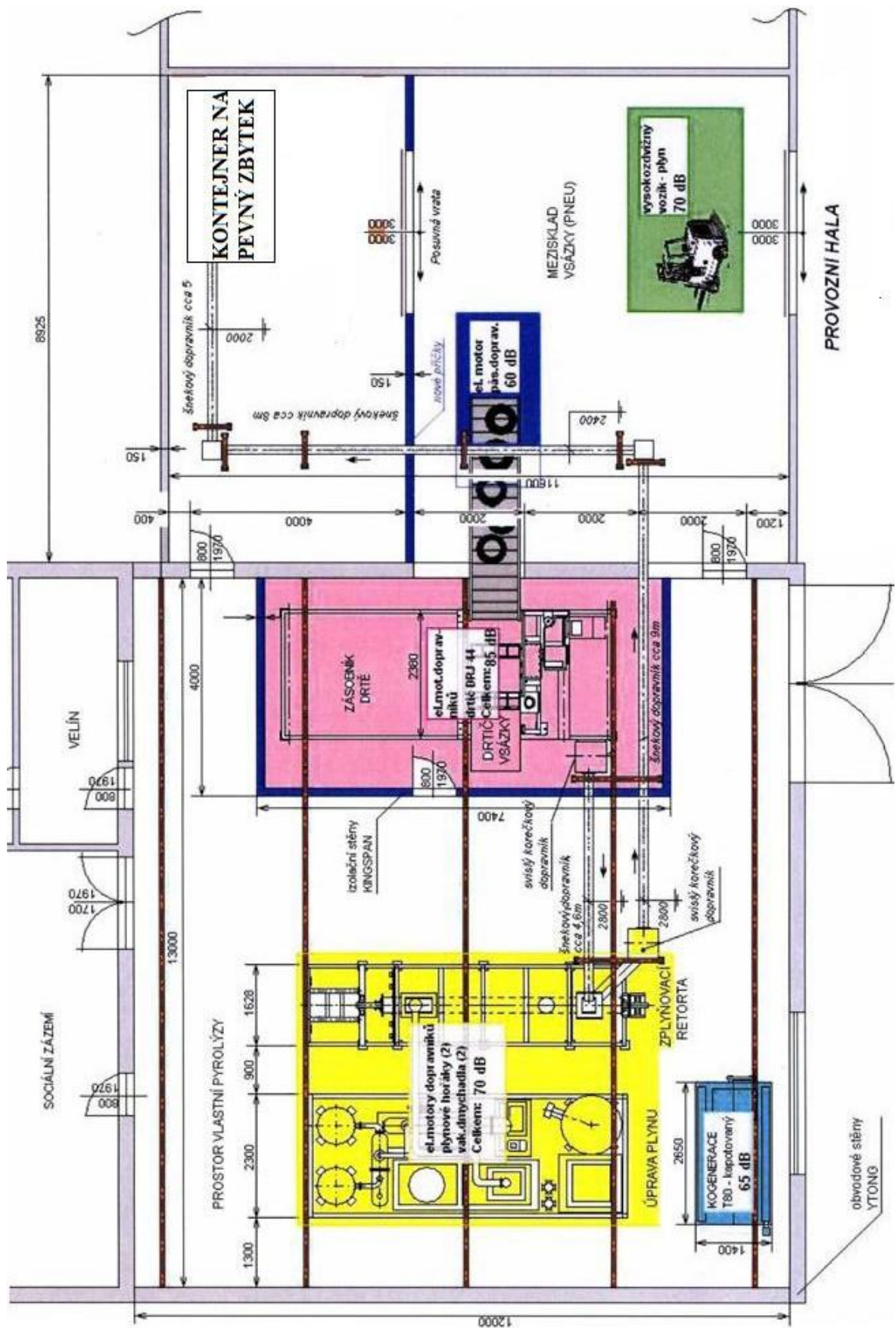


Obrázek 28: Příčná (nahore) a podélná (dole) pásová magnetická separace [22]

### 3.3 TECHNOLOGICKÉ ŘEŠENÍ INOVACE

Po konzultaci ve společnosti AGMECO LT, s.r.o. bylo rozhodnuto z důvodů snazší realizace, používání a údržby zvolit závěsný pásový dopravníkový magnetický separátor v příčném uspořádání.

Dále následují schematická znázornění stavu linky, na prvním ve stavu, kdy se pevný uhlíkový zbytek z pyrolýzního procesu volně sypal do přistaveného odpadního kontejneru bez následného využití a na druhém s doplněnou magnetickou separací, která nám umožnila získat další materiálově a též ekonomicky využitelné suroviny, tj. pevný uhlíkový zbytek (saze, uhlík) a kvalitní uhlíkovou ocel z kordů pneumatik.



Obrázek 29: Schéma linky před inovací



## 4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Následující naměřené hodnoty byly získány za pomoci laboratorního zařízení v rámci České asociace pro pyrolýzu a zplyňování o.s. (zkráceně „CPGA“), která byla založena s posláním zvýšit v České republice důvěryhodnost technologií využívajících termických procesů zplyňování a pyrolýzy a přispět k rozšíření jejich aplikace, zejména pro účely energetického využití biomasy a odpadů, je-li takto dosaženo vyšší efektivity a větší šetrnosti k životnímu prostředí v porovnání s jinými postupy a technologiemi.

### **Metodika měření [24]**

Zjišťování vlastností zpracovaného materiálu vstupujícího do jakéhokoliv termochemického procesu patří k základním parametrům potřebným k určení hmotnostní a energetické bilance procesu a následného výpočtu účinnosti jakéhokoliv termokonverzního systému.

U pevných paliv hraje důležitou roli obsah vlhkosti (W), obsah prchavé hořlaviny (V), obsah popele (A). Pro stanovení uvedených parametrů je využívána sušárna a pec s regulovanou teplotou. Výsledky stanovení některých vlastností (popel A, prchavá hořlavina V) jsou závislé na podmínkách stanovení (teplota, doba), které jsou přesně specifikovány v platných normách.

Typickým příkladem je stanovení obsahu popele v různých typech biomasy (dřeviny, traviny, slámy) a alternativních paliv, kdy na rozdíl od pevných paliv (uhlí) je nutno provádět stanovení při teplotě 550 °C. Spalování za těchto podmínek trvá sice delší dobu, ale v tomto případě nehrozí odtěkání alkalických podílů popelovin, výsledky obsahu popele (A) zpravidla jsou skoro 2 x vyšší, než při spalování při teplotě 815 °C. Složení popele umožňuje stanovení jeho dalších vlastností (bod měknutí, tání) důležitých z hlediska provozu moderních termokonverzních zařízení. Podobným způsobem se stanovují i vlastnosti pevných a kapalných produktů vznikajících při zplyňování a pyrolýze.

Stanovení obsahu prchavé hořlaviny (V) se provádí rychlým ohřevem relativně malého množství paliva v uzavřeném kelímku umístěném v peci při 900 °C a to po dobu 7 min. Obsah prchavé hořlaviny je důležitým ukazatelem stability paliva a rozdělení jeho hmoty při termickém procesu mezi plynnou a pevnou hořlavinu. Tato hodnota zásadním způsobem ovlivňuje průběh celého procesu, reaktivitu paliva a tvorbu dehtu při zplyňování. Materiály s vysokým obsahem prchavé hořlaviny ( $V > 50\%$ ) jsou zpravidla

více reaktivní, a při spalování tvoří dlouhé svítivé plameny, při zplyňování běžnými postupy je produkován plyn s vyšším obsahem kondenzujících podílů (dehtu).

Dalším důležitým parametrem paliv je hodnota *spalného tepla* ( $Q_s$ ), *případně výhřevnosti* ( $Q_i$ ), jejíž stanovení se provádí za pomoci *kalorimetru IKA C200*, kde se měří teplo uvolněné při úplném dokonalém spálení za tlaku v čisté atmosféře kyslíku. Měření uvolněného tepla se provádí v kalorimetrické nádobě při teplotách do 25 °C, kdy se voda přítomná ve vzorku ( $W$ ) a vzniklá při spalování ( $W_H$ ) vylučuje ve zkondenzovaném stavu. Výhřevnost ( $Q_i$ ) je hodnota spalného tepla uvolněného za stejných podmínek zmenšená o hodnotu kondenzačního tepla vody přítomné ve spalinách v plynné formě. Výhřevnost ( $Q_i$ ) lze snadno spočítat z hodnoty spalného tepla ( $Q_s$ ) a obsahu vlhkosti ( $W$ ) a množství vody vzniklé při spalování palivového vodíku ( $H$ ) přítomného v původním materiálu.

Obsah vodíku ( $H$ ) v původním materiálu, podobně i jako obsah uhlíku ( $C$ ), dusíku ( $N$ ), síry ( $S$ ), případně i kyslíku ( $O$ ) se stanovuje na *dvoukanálovém elementárním analyzátoru CHNS-O Flash EA 1112*. Princip stanovení spočívá v měření přesného množství obsahu dusíku ( $N_2$ ), oxidu uhličitého ( $CO_2$ ), vody ( $H_2O$ ), a oxidu siřičitého ( $SO_2$ ) vznikajícího při dokonalém spálení přesného množství suchého materiálu v atmosféře čistého kyslíku při teplotách 950 až 1 050 °C. Směs spalin prochází horkou křemennou trubicí s vhodným katalyzátorem a adsorbentem pro zachycení přebytečného kyslíku. Následuje separace na chromatografické náplňové koloně přístroje a detekce jednotlivých složek za pomoci *tepelně-vodivostního detektoru (TCD)*. Stanovení kyslíku ve vzorku se provádí na druhém kanálu přístroje a to stanovením obsahu  $CO$  vzniklého v horké křemenné trubce s uhlíkatým katalyzátorem ze sloučenin obsahujících kyslík (např.  $H_2O$ ,  $CO_2$ ) uvolněných při pyrolýze vzorku při teplotě 950 °C. Pro oba přesné stanovení je zapotřebí znát také přesné množství spalovaného vzorku. Na *extra citlivých váhách Metler MX5* se navažuje 2 až 3 mg, s přesností na 0,001 mg.

Zde je nutné podotknout, že výsledky z jakékoliv analýzy vlastností je vždy nutno vztáhnout na přesně definovaný stav použitého paliva (původní vzorek (a), suchý vzorek (d), suchý a popele prostý vzorek (daf)), a tuto informaci je nutné vždy uvést při publikaci, nebo předávání výsledků.

Pro zjištění chování pevných materiálů při jejich ohřevu je používáno několik laboratorních a analytických zařízení. Pro jednoduché zkoušky potřebné pro určení hrubé bilance pevných, plynných a kapalných produktů lze použít klasickou aparaturu pro nízkoteplotní karbonizaci (Fischerova zkouška) provozovanou za definovaných podmínek (teplota do 520 °C, ohřev do 1 hodiny). Studium vlivu teploty procesu, na distribuci

a složení hlavních produktů za nepřítomnosti oxidovadla se provádí na křemenné laboratorní aparatuře. Přestože maximální množství testovaného vzorku se pohybuje od 20 do 50 g, vypracovaný analytický postup umožňuje získat docela přesné znalosti o hmotnostní bilanci celého procesu v závislosti na teplotě a způsobu ohřevu. Podobné bilanční znalosti jsou nezbytnou informací pro návrh termokonverzního zařízení, pracujícího s určitým konkrétním typem biopaliva.

Pro detailnější studium těkavých reaktivních produktů vznikajících za podmínek tzv. „rychlé pyrolýzy“ se používá *analytický pyrolyzer Pyroprobe 5000* napojený na *plynový chromatograf s hmotnostním detektorem (Py-GC-MS)*. Vzorek testovaného materiálu (2 až 5 mg) se umísťuje dovnitř tenké křemenné kapiláry ovinuté topným platinovým drátkem umožňujícím rychlý a hlavně přesně definovaný ohřev. Sonda umístěná v pyrolýzní komoře je proplachována inertním plynem odváděným vyhřívanou kapilárou do nástřikové komůrky plynového chromatografu, kde probíhá analýza složení a obsahu vznikajících produktů. Py-GC-MS umožňuje také pyrolýzu kapalných, pevných, plastických materiálů a jejich směsí, zjištění vlivu teploty a rychlosti ohřevu na distribuci vznikajících složek, jejich identifikaci za pomoci databáze MS spekter. Na základě souhrnu vznikajících sloučenin lze u čistých látek určit také i složení původních materiálů. Stanovení složení plynu a obsahu nežádoucích látek hraje jednu z klíčových rolí při hodnocení provozu libovolného termokonverzního procesu, a to jak z hlediska jeho stability, tak i kvality produkovaného plynu.

Pro stanovení kvality plynu byla vypracována řada tzv. off-line analytických metod založených na odběru vzorků plynu a jejich následné analýze v laboratoři. Komplexní stanovení složení plynu umožňuje provést přesný výpočet hodnoty spalného tepla a výhřevnosti plynu nutný pro výpočet celkové energetické účinnosti zařízení. Pro uvedené účely je použit *dvoukanálový plynový chromatograf s tepelně-vodivostním a plamenově-ionizačním detektorem*. TCD kanál se používá pro stanovení obsahu H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> (Ar), N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub> v plynu v koncentracích od 0,01 % obj. Na FID kanálu je prováděno stanovení plynných nasycených a nenasycených uhlovodíků v rozsahu od methanu do C<sub>7</sub> frakce (toluen, xyleny) s citlivostí od 1 ppm. Odběr vzorků se provádí do plynotěsných skleněných vzorkovnic dopravovaných k místu jejich analýzy v laboratoři.

Přesné složení plynu odebraného v určitých časových intervalech není však dostatečným ukazatelem pro hodnocení stability provozu termokonverzního zařízení. V praxi se může stát, že mezi takto provedenými odběry vzorku se složení plynu může pozvolna nebo skokově změnit.

Měřicí přístroje:

Plynový chromatograf HP 6890 s TC/FI detektorem

- Stanovení složení permanentních plynů na TCD kanálu ( $H_2$ ,  $O_2$  (Ar),  $N_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ) a těkavých organických látek na FID kanálu ( $C_1$  až  $C_8$  uhlovodíky)
- Komplexní analýzy topných, pyrolýzních plynů, plynu ze zplyňování pevných paliv a biomasy
- Rozbory složení zemního plynu a propan butanových směsí
- Stanovení stopových množství vybraných uhlovodíkových složek v plynech

Plynový chromatograf HP 6890 s hmotnostním detektorem (MSD 5973)

- Stanovení složení kapalných produktů termochemické konverze pevných a kapalných paliv
- Stanovení složení a obsahu kapalných vzorků z pyrolýzy
- Stanovení stopových množství vybraných sloučenin v plynu (stanovení siloxanů v bioplynu, analýza sirných a bezsirných odorantů v plynu.
- Stanovení obsahu a složení dehtu v plynu ze zplyňování biomasy dle Tar protokolu.
- Stanovení plyných a kapalných pyrolýzních produktů (Pyroprobe 500 Series, CDS Analytical Ltd.)

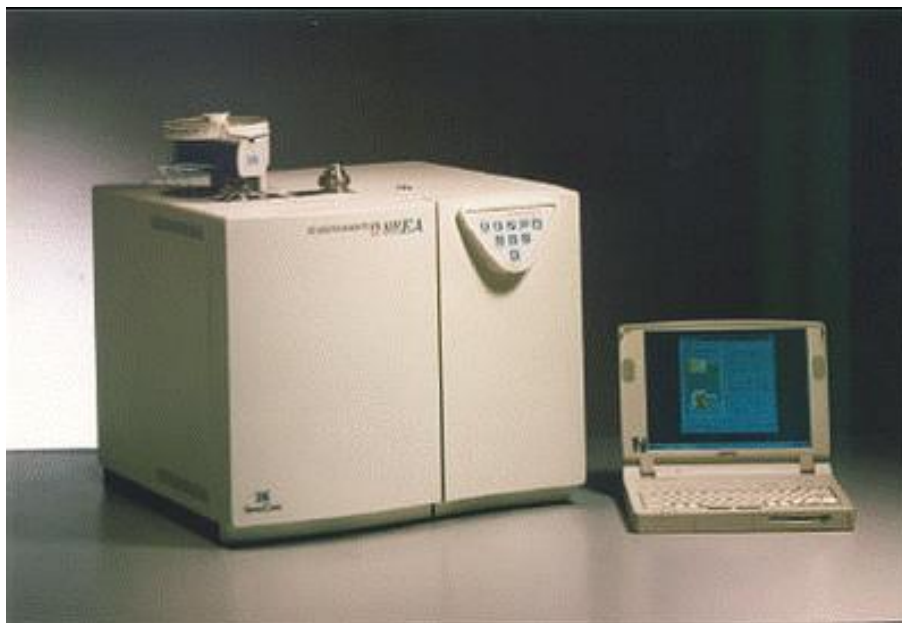


Obrázek 31: Plynový chromatograf HP 6890 [24]



## Elementární analyzátor Flash 1112

- Elementární rozbor (stanovení obsahu C, H, N, S a O) pevných a kapalných látek



Obrázek 32: Elementární analyzátor Flash 1112 [24]

## Kalorimetr C200 IKA

- Stanovení spalného tepla pevných a kapalných paliv



Obrázek 33: Kalorimetr C200 IKA [24]

## 4.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY

### Produkty vakuové pyrolýzy pneumatik:

#### 1. Pyrolýzní plyn

Tabulka 8: Pyrolýzní plyn - vlastnosti: [19]

Veličina	Označení	Rozměr	Pyrolytický plyn		Zemní plyn
			pneu	plasty	
Hustota ( 101 325 Pa, 0°C)	$r_n$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1,295	1,127	0,729
Poměrná hustota	d	-	1,002	0,871	0,564
Spalné teplo	Qv	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	51366	56508	39770
Výhřevnost	Qn	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	47515	52699	35870
Stechiometrický objem kyslíku	Vo	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	2,495	2,79	2
Stechiometrický objem vzduchu	Vvi	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	11,89	13,317	9,53
Stechiom. objem suchých spalin	$V_{s0}^*$	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	10,95	12,238	8,533
Stechiom. objem vlhkých spalin	$v_{sp}^*$	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	12,89	14,319	10,459
Složení spalin		%	12,18	11,9	9,6
CO <sub>2</sub>		%	15,05	14,53	18,2
H <sub>2</sub> O		%	72,77	73,57	72,2
N <sub>2</sub>		%			
Maximální objem CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> max	%	14,34	13,92	11,69
Rosný bod spalin	$t_r$	°C	<b>55</b>	53,5	58
Meze zápalnosti	LD	%	3,6	3,02	5,2
	LH	%	18,9	17,46	13,5
Adiabatická spalovací teplota	$t_{ad}$	°C	2140	2165	2065
Max. spalovací rychlost	Un max	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0,602	0,584	0,31

V případě zpracování pneumatik a odpadové pryže jsou hlavními produkty olej a uhlík. Plyn je spotřebován v zařízení k ohřevu retort, případně v připojené kogenerační jednotce.

Tabulka 9: Složení a vlastnosti pyrolytického plynu vyrobeného z pryžové drti (pneumatik) [23]

Složení pyrolytického plynu: (Tire Derived Gas)		mol %	Výhřevnost:	
			[BTU/scf]	[MJ/m <sup>3</sup> ]
H <sub>2</sub>	vodík	19,873	63,59	2,49419
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	5,244	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	ethylen	9,69	154,56	6,06232
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ethan	8,608	152,79	5,99289
O <sub>2</sub>	kyslík	0,713	0	0
N <sub>2</sub>	dusík	3,649	0	0
CH <sub>4</sub>	methan	35,7	360,57	14,1427
CO	oxid uhelnatý	3,27	10,45	0,40988
<b>mezisoučet :</b>		<b>86,747</b>	<b>741,96</b>	<b>29,1019</b>
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	propan	1,812	47,111	1,8478
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	propylen	5,344	125,04	4,90445
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	isobutan	0,661	22,47	0,88134
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	butan	0,232	7,19	0,28201
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	isobuthylen	4,255	131,9	5,17352
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	trans-buten-2	0,403	12,49	0,4899
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	cis-buten -2	0,287	11,19	0,43891
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	cis-butadien	0,33	9,67	0,37929
<b>mezisoučet :</b>		<b>13,324</b>	<b>367,061</b>	<b>14,39721</b>
<b>Celkem:</b>		<b>100,07</b>	<b>1109,02</b>	<b>43,5</b>

Tabuľka 10:

## NĚKTERÉ PŘÍKLADY ANALÝZ SLOŽENÍ PYROLYTICKÝCH PLYNŮ

Všecké testy byly prováděny na plynovém chromatografu

Vsázka (odpad) Komponenty:	drť pneumatik		plasty (polyolefiny)		plasty (nemocniční) [molová %]	biomasa (Bedminster) [váhová %] [molová %]	slunečnice (odpad) [molová %]	odpad uhlí [molová %]
	[molová %]		[váhová %]					
	1	2	19A	19B				
vzorek č.:			110.TG	630.TG				
Hydrogen	14,6	19,873	0,97	0,6	0,8			
CO	3,59	3,27	3,35	2,4	2,2			
Methane	31,17	35,7	16,62	17,8	13	8,01	4,96	3,8626
Ethylen	8,07	9,69	7,53	8,8	7,2	14,95	10,94	8,277
Ethane	7,62	8,608	7,62	7,2	6,8	5,34	5,99	4,9662
Propylen		5,344		11,6	10	22,96	20,03	17,1058
Propane		1,812		2,6	3,5	3,20	3,92	5,518
cis-butadien		0,33		2,7	3,1			
cis-buten-2		0,287		1,4	2,2			
trans-buten-2		0,403		1,7	2,8			
isobuthylen		4,255		14,8	18,1	24,56	27,87	28,6936
i-Butane		0,661		1,6	3,3			
n-Butane		0,232		0,6	1,3			
i-Pentane				5,3	14			
n-Pentane								
C <sub>6</sub> + (Σ C <sub>3</sub> ->)	27,11		52,41			20,65	25,60	30,9008
Oxygen		0,713		3,8	1,1			
Nitrogen		3,649		10,4	3,5			
CO <sub>2</sub>	7,84	5,244	11,5	6,7	7,1			
Celkem:	100	100,071	100	100	100	99,86	99,42	99,43

Orientační vyřevnost	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/m <sup>3</sup> ]				
	43,7	43,5	43,7	47,52	58,21	52,7	60	71,6	28,57	29,57	28,89	28,92	29

## 2. Pyrolýzní olej

Tabulka 11: Pyrolýzní olej - vlastnosti [19]

Vlastnosti	Jednotky	ELTO	LTO	TTOR2	Pyrolytický
Hustota při 20 °C	kg·m <sup>-3</sup>	max. 860	max. 910	990	829 až 861
Kinematická viskozita	mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	při 20 °C max. 6	při 40 °C 3,2 až 18	při 80 °C max. 118	při 37,78°C 2,2 až 2,5
Obsah popela	hmotnostní %	max. 0,01	max. 0,02	max. 0,14	max. 0,1
Obsah mechanických nečistot	hmotnostní %	max. 0,05	max. 0,1	max. 1,0	
Bod vzplanutí	°C	56	66	110	37,78
Bod tuhnutí	°C	max. - 10	léto: max. + 10 zima: max. - 5	40	
Obsah síry	hmotnostní %	max. 0,2	málosimý max. 1,0 středněsimý max. 2,0	1 až 3	0,3 až 0,5
Výhřevnost	MJ·kg <sup>-1</sup>	min. 42	41	39	43,3

(porovnání s motorovou naftou a lehkými topnými oleji na trhu v ČR)

Tabulka 12: Složení oleje když je vsázkou pryž a pneumatiky je podle výrobce [23]

složka	wt%	Bp [°C]	Kg hustota [g/cc]
C5H12 (n-Pentane)	1,75	36,30	0,630
C6H14 (n-Hexane)	3,25	69,00	0,659
C7H16 (n-Heptane)	7,25	98,40	0,684
C6H6 (Benzene)	9,50	90,10	0,879
C7H8 (Toluene)	9,50	110,80	0,866
C8H10 (Ethyl Benzene)	7,50	136,20	0,867
C8H10 (Xylene)	8,00	144,00	0,881
C8H8 (Styrene)	10,50	145,00	0,903
C9H20 (Nonane)	2,00	150,50	0,718
C10H22 (Decane)	2,75	174,00	0,730
C10H18 (Limonene)	13,3	177,00	0,842
C11H24 (Undecane)	4,00	194,60	0,741
C10H8 (Naphthalene)	1,00	217,80	1,145
C11H10 (Methyl Napht.)	3,00	244,60	1,025
C12H26 (Dodecane)	3,00	214,50	0,751
C13H28 (Tridecane)	4,00	234,00	0,757
C14H10 (Anthracene)	2,70	342,00	1,250
Wax, as C19	7,00	330,00	0,777
Total	100,00		

Pyrolýzní olej je určen k okamžitému použití jako palivo, je možno jej mísit s motorovou naftou pro použití v dieselových motorech, ale díky svému vysokému obsahu aromatických uhlovodíků je také výbornou surovinou pro chemický průmysl.

### 3. Uhlík: [19]

#### a) Pyrolýzní saze pro gumárenství

Vlastnosti: Jedná se o saze vyrobené vakuovou pyrolýzou ojetých pneumatik. Pro aplikaci v gumárenském průmyslu je možné zařadit pyrolytické saze do skupiny poloztužujících (semi - reinforcing) sazí, které se svými vlastnostmi pohybují v pásmu mezi retortovými a termickými.

Tabulka 13: Základní fyzikální a chemické vlastnosti pyrolytických sazí [19]

Zbytek na síť	0,045 mm (325 MESH) - max. 1 % 0,5 mm (35 MESH)
Jodová absorbce	82 mg·g <sup>-1</sup>
Absorbce dibutylftalátu	99 cm <sup>3</sup> ·l <sup>-1</sup> OOg
pH	8
Velikost povrchu (CTAB)	50 m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>

Hodnocení fyzikálně-mechanických a elektrických vlastností

Saze byly hodnoceny v receptuře na bázi SBR podle ČSN 65 8470.

I. Posouzení pevnosti v tahu, tažnosti a modulu v tahu podle ČSN 62 1436.

II. Tvrdost Shore podle ČSN 62 1431.

III. Vnitřní rezistivita podle ČSN 34 6460.

Tabulka 14: Hodnocení fyzikálně-mechanických a elektrických vlastností sazí [19]

Hodnocená vlastnost	Naměřené hodnoty
Modul 200	4,5 MPa
Modul 300	7 MPa
Pevnost v tahu	13,5 MPa
Tažnost	600 %
Tvrdost °ShA	65
Vnitřní rezistivita	8,4 x 10 <sup>13</sup> W.cm

Tabulka 15: Hodnocení zpracovatelnosti vytlačováním na přístroji BRABENDER [19]

Základní podmínky	
Šnek (kompresní poměr)	1 : 1
Otáčky šneku	20·min <sup>-1</sup>
Teplota nastavená: 1	70 °C
2	75 °C
3	75 °C
hubice	80 °C
Průměr hubice	4 mm

Pro srovnání byly kromě hodnocených pyrolytických sazí použity saze N 330 a N 550 v receptuře na bázi SBR podle ČSN 65 8470.

Při extruzi byl hodnocen krouticí moment, teplota extrudátu a tlak v hlavě extruderu.

Tabulka 16: Hodnocení sazí po extruzi [19]

Hodnocené veličiny :	pyrolytické	N 550	N 330
Krouticí moment [Nm] :			
po 10 ti min :	14,50	30,00	28,00
po 20 ti min :	12,00	26,00	33,50
po 30 ti min :	13,40	26,70	32,00
Teplota extrudátu [0C] :			
po 10 ti min :	78	78	78
po 20 ti min :	79	79	79
po 30 ti min :	79	79	79
Tlak v hlavě [bar] :			
po 10 ti min :	77	88	86
po 20 ti min :	70	88	89
po 30 ti min :	70	80	90

Krouticí moment a tlak v hlavě extruderu odpovídají ztužujícím účinkům hodnocených sazí.

Doporučené aplikace pyrolytických sazí v gumárenském průmyslu:

Pyrolytické saze je vhodné používat zejména v oblasti technické pryže, pro technologii zpracování extruzí a lysováním.

Doporučujeme kombinovat ztužující saze se sazemi pyrolytickými za účelem zlepšení zpracování, zejména u extruze (snížení namáhání stroje a spotřeby energie, snížení tvorby frikčního tepla, které má vliv na bezpečnost proti navulkanizování zpracovávaných směsí a dále pak za účelem snížení výsledné ceny směsi.

Tabulka 17: Orientační srovnání typických vlastností sazí ve směsi SBR [19]

Saze :	Pevnost [MPa]	M 300 [Mpa]	°ShA	Tažnost %
Retortové :				
plynovéGPF(N660)	16 - 17,5	8 - 9	65	500 - 550
olejovéFEF (N550)	18 - 20	12 - 13	67	480 - 500
olejovéISAF(N220)	28 - 30	13 - 14	70	470 - 490
Termické :				
FT (N880)	12 - 14	3 - 4	55	630 - 650
MT (N990)	10 - 12	3 - 4	50	640 - 660
Pyrolytické :	13,2	7	64	650



Tabulka18: Orientační srovnání olejového a jodového čísla různých sazí [19]

Saze :	I <sub>2</sub> [mg/g]	DBP [cm <sup>3</sup> /100g]
Retortové :		
plynovéGPF(N660)	28 - 36	95 - 110
olejovéFEF (N550)	30 - 50	110 - 125
olejovéISAF(N220)	120 - 140	115 - 135
Termické :		
FT (N880)	20 - 25	40 - 55
MT (N990)	10 - 15	33 - 35
Pyrolytické :		
	82	99

Vysvětlivky :

saze	MT střední termické
	FT jemné termické
	ISAF retortové se středně velkou odolností
	FEF retortové s dobrou zpracovatelností vytlačováním
	GPF retortové pro všeobecné použití
olejové číslo	stanovení se provádí titrací Iněným olejem nebo dibutylftalátem (DBP); za konec titrace se považuje dosažení kuličky při hnětení; olejové číslo udává počet cm <sup>3</sup> DBP spotřebovaného na 100 g sazí
jodové číslo	zkouškou se zjišťuje hmotnostní množství jodu, které se adsorbuje na saze a je mírou jejich specifického povrchu; vzorek vysušených sazí se smíchá s roztokem jodu, volný jod se dekantuje a titruje 0,039 mol/dm <sup>3</sup> roztokem thiosíranu sodného; jódová adsorbce udává počet mg jódu spotřebovaného na 1 g sazí

Složení pevného zbytku z pneumatik by mělo být podle výrobce [23]

**Uhlíkový zbytek (retortové saze)**

Zrnitost (granulometrie) : 99% - 325 Mesh (A.P.D. - 0,5 - 0,6)

**Složení hlavní:**

Uhlík (čistý) : 85 - 88%  
Těkavé látky : 1,7% max  
Vlhkost : 1,50%  
Obsah síry : 1,5-2,0%

**Ostatní příměsi:**

SiO <sub>2</sub>	4,2
AlO <sub>3</sub>	1,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,24
TiO <sub>2</sub>	0,27
CaO	0,3
MgO	0,13
K <sub>2</sub> O	0,11
Na <sub>2</sub> O	0,16
ZnO	4,5
ostatní	1,03
<b>Celkem:</b>	<b>12</b>

**b) aktivní uhlí**

Tabulka 19: Aktivní uhlí – vlastnosti [19]

Typ	prachový
Jodová absorpce	1187 mg·g <sup>-1</sup>
Metylénové číslo	
pH	5,5
Povrchová plocha	950 až 1 000 m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>
Vlhkost (rozpustné v)	2,0 max.
Max. popel	8 až 10 %
Sypná hmotnost	476,7 kg·m <sup>-3</sup>

Použití:

Trh: Aktivní uhlí vyrobené z uhlíkového zbytku při vakuové pyrolyze pneumatik (Tire Derived Active Carbon - TDAC) se velice efektivně osvědčil při odstraňování rtuti z kouřových plynů z takových zdrojů jako spalovny TKO a uhelné teplárny. Síra obsažená v uhlí právě toto umožňuje. TDAC také dobře pracuje při čištění vod a to je dnes typická a velká oblast trhu s aktivním uhlím.

Z pneumatik se vyprodukuje přibližně 37 až 40 % uhlíkového zbytku. Při šesti tunách denně činí výtěžek 2,2 tuny/den, který poskytne po parní aktivaci výtěžek přibližně 60 % tj.  $1,3 \text{ t} \cdot \text{den}^{-1}$ . Tedy maximální předpokládané roční množství je cca 390 tun.

Balení: Aktivní uhlí bude baleno na italské pytlovací lince Paglierani do vrstvených pytlů po 20 nebo 25 kg a paletováno na dřevěných paletách.

Předpokládaná cena:  $30,- \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$

## 5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Z ekonomického hlediska je inovace stávající linky přidáním magnetického separátoru rozhodně dobrou volbou, která nám umožnila získat další materiálově a též ekonomicky využitelné suroviny, tj. pevný uhlíkový zbytek (saze, uhlík) a kvalitní uhlíkovou ocel z kordů pneumatik.

### Investiční náklady

Tabulka 20: Investiční náklady [19]

I. Konfigurace-pořizovací náklady				USD	CZK
Přepočít : 1 USD = 21 Kč (31.3.14)		Orientační celková cena :		1 221 905	25 660 000
A.	<b><u>Pyrolýzní zpracování odpadních pneu</u></b>			Rovnoměrné odpisování	
	<b>DEMONSTRAČNÍ JEDNOTKA</b>	USD	CZK	Odpis sk.:	Odpis-let
	1 Pyrolýzní jednotka - Model M3RP Scogen o výkonu : (pryžová drt) 250 kg/hod	950 000	19 950 000	3	10
	2 Doprava, pojištění, instalace	60 000	1 260 000	3	10
<b>Dovoz celkem:</b>		<b>1 010 000</b>	<b>21 210 000</b>		
B.	<b><u>Navazující zařízení včetně montáže :</u></b>				
	1 drtič pneu (frakce 5x5x5cm) s přítlakem	40 476	850 000	3	10
	2 zásobník drti s dopravníky vsázky	38 095	800 000	2	5
	3 drtič pevného retort. zbytku (uhlíkové škváry)	4 762	100 000	2	5
	4 magnetický separátor (pásový - příčný)	5 714	120 000	2	5
	5 dopravníky uhlíku v bezprašném provedení	19 048	400 000	2	5
	6 plnicí stanice pro big-bagy (uhlík)	9 524	200 000	2	5
	7 generátor dusíku	3 810	80 000	2	5
	8 kompletní montáž zařízení, ASŘTP a elektro	11 905	250 000	2	5
	9 vyzkoušení a uvedení celé jednotky do provozu	4 762	100 000	2	5
<b>Navazující:</b>		<b>138 095</b>	<b>2 900 000</b>		
<b>Technologie celkem (A + B):</b>		<b>2 158 095</b>	<b>24 110 000</b>		

C. <b>Pozemky a stavby</b>					
1	úpravy objektu	73 810	1 550 000	neodepisovat	
2	provozní budova cca 600 m <sup>2</sup>	0		5	30
3	spodní stavby pro sila, olejové hospodářství dle specifikací	0		5	30
4	příjezdové a obslužné komunikace	0		5	30
5	zpevněné plochy pro deponování vsázkových pneu	0		5	30
6	inženýrské sítě s body připojení dle specifikací	0		5	30
7	další drobné stavby (kancelářské, sociální, ubytovací, šatny pro pracovníky montáže atd.)	0		5	30
8	další stavby dle požadavků místních orgánů (ČOV, požární nádrž atd.)	0		5	30
<b>Stavby celkem:</b>		<b>73 810</b>	<b>1 550 000</b>		
<b>PROJEKT CELKEM:</b>		<b>2 231 905</b>	<b>25 660 000</b>		

## Nákladové položky

Tabulka 21: Nákladové položky [19]

1. POŘIZOVACÍ NÁKLADY NA CELÝ PROJEKT						
		USD		CZK		
A.	<i>Pyrolýzní zpracování odpadních pneu</i>	1 010 000		21 210 000		
B.	<i>Navazující zařízení včetně montáže :</i>	138 095		2 900 000		
C.	<i>Pozemky a stavby</i>	73 810		1 550 000		
<b>Pořizovací náklady celkem:</b>		<b>1 221 905</b>		<b>25 660 000</b>		
2. PROVOZNÍ NÁKLADY						
1. Materiál obaly na produkty (aktivní uhlí a saze)						
		ks/rok	CZK/ks	USD	CZK	
pytle (ventilové)-ak.uhlí			8	0	0	
big-bag (vratné)-saze (obrátkovost = 4/rok)		150	550	3 929	82 500	
		<b>Celkem:</b>		<b>3 929</b>	<b>82 500</b>	
2. Energie <i>elektrická energie</i>						
		kWh/den	kWh/rok	CZK/kWh	USD	CZK
spotřeba		1 200	396 000	3,90	73 543	1 544 400
stále platby za příkon (údaje VČE)			Kč/měsíc	1185	677	14 220
		<b>Celkem:</b>			<b>74 220</b>	<b>1 558 620</b>
		<i>vodné stočné</i>		m <sup>3</sup> /rok	CZK/m <sup>3</sup>	
				320	38	
				579	12 160	
		<i>PHM</i>		CZK/měs	USD	CZK
				7 200		86 400
<b>Energie celkem:</b>				<b>78 913</b>	<b>1 657 180</b>	
3. Osobní náklady						
1. Mzdové						
<i>Provozní zaměstnanci:</i>		mzda 1 prac.	na 1 směnu	počet směn	CZK/měs.	CZK/rok
obsluha pyrolýzy		30 000	2	3	180 000	2 160 000
příprava vsázky		20 000	2	1	40 000	480 000
údržba		22 000	1	1	22 000	264 000
<b>Celkem:</b>			5		242 000	2 904 000
<b>Mzdové náklady celkem:</b>					2 904 000	138 286
2. Sociální pojištění		35%			1 016 400	48 400
4. Opravy a údržba		stavební		% z poř.ceny	USD	CZK
		strojní		2,5	0	0
				5	53 571	1 125 000
				<b>Celkem:</b>	<b>53 571</b>	<b>1 125 000</b>
5. Ostatní (marketing, telefon, SW, účetní, atd.)					9 524	200 000

## Odpisy

Tabulka 22: Odpisy [19]

Rozdělení podle odpisových skupin:																																																																																															
			Pořizovací cena		Odpisy:	Rovnoměrné odpisování (lineární):																																																																																									
Odpisová skupina:			USD	CZK		1.rok																																																																																									
bez odpisu			73 810	1 550 000	%	USD	Kč																																																																																								
1					1	20	0	0																																																																																							
1a					1a	14,2	0	0																																																																																							
2		85 714	1 800 000		2	11	9 429	198 000																																																																																							
3		1 071 429	22 500 000		3	5,5	58 929	1 237 500																																																																																							
4					4	2,15	0	0																																																																																							
5		0	0		5	1,4	0	0																																																																																							
6					6	1,02	0	0																																																																																							
Celkem:			1 230 953	25 850 000	Odpis celkem:		68 358	1 435 500																																																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4"></th> <th rowspan="2">Odpisy:</th> <th colspan="3">Rovnoměrné odpisování (lineární):</th> </tr> <tr> <th colspan="4"></th> <th colspan="3">další roky</th> </tr> <tr> <th colspan="4"></th> <th>%</th> <th>USD</th> <th colspan="2">Kč</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>40</td> <td>0</td> <td colspan="2">0</td> </tr> <tr> <td>1a</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>28,6</td> <td>0</td> <td colspan="2">0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>22,25</td> <td>19 071</td> <td colspan="2">400 500</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>10,5</td> <td>112 500</td> <td colspan="2">2 362 500</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>5,15</td> <td>0</td> <td colspan="2">0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>3,4</td> <td>0</td> <td colspan="2">0</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2,02</td> <td>0</td> <td colspan="2">0</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Odpis celkem:</td> <td></td> <td>131 571</td> <td colspan="2">2 763 000</td> </tr> </tbody> </table>													Odpisy:	Rovnoměrné odpisování (lineární):							další roky							%	USD	Kč		1				40	0	0		1a				28,6	0	0		2				22,25	19 071	400 500		3				10,5	112 500	2 362 500		4				5,15	0	0		5				3,4	0	0		6				2,02	0	0		Odpis celkem:					131 571	2 763 000	
				Odpisy:	Rovnoměrné odpisování (lineární):																																																																																										
					další roky																																																																																										
				%	USD	Kč																																																																																									
1				40	0	0																																																																																									
1a				28,6	0	0																																																																																									
2				22,25	19 071	400 500																																																																																									
3				10,5	112 500	2 362 500																																																																																									
4				5,15	0	0																																																																																									
5				3,4	0	0																																																																																									
6				2,02	0	0																																																																																									
Odpis celkem:					131 571	2 763 000																																																																																									
Rekapitulace odpisů:																																																																																															
0	1	2	3	4	5	6	7	8																																																																																							
CZK	1 435 500	2 763 000	2 763 000	2 763 000	2 763 000	2 362 500	2 362 500	2 362 500																																																																																							
USD	68 357	131 571	131 571	131 571	131 571	112 500	112 500	112 500																																																																																							

## Rekapitulace příjmů a nákladů

Tabulka 23: Příjmy a náklady -rekapitulace [19]

<b>1. Příjmy :</b>						
A.	Příjmy z prodeje produktů		množství [t]	CZK/t	CZK/rok	USD/rok
		topný olej	904	9 000	8 132 400	387 257
		saze	599	12 000	7 188 000	342 286
		aktivní uhlí	0	30 000	0	0
		ocel	90	3 500	315 000	15 000
				<b>15 635 400</b>	<b>744 543</b>	
B.	Příjmy z poplatků za likvidaci	vybratelnos	množství [t]	CZK/t	CZK/rok	USD/rok
		50%		950	0	0
<b>Příjmy v běžném roce celkem:</b>				<b>15 635 400</b>	<b>744 543</b>	
<b>2. Náklady :</b>						
A.	<b>Požizovací náklady :</b>				CZK	USD
	Pyrolýzní zpracování odpadních pneu				21 210 000	1 010 000
	Navazující zařízení včetně montáže :				2 900 000	138 095
	Pozemky a stavby				1 550 000	73 810
<b>Požizovací náklady celkem</b>				<b>25 660 000</b>	<b>1 221 905</b>	
B.	<b>Provozní náklady:</b>					
	<b>I. Spotřeba materiálu,energií a služeb</b>				<b>5 534 680</b>	<b>263 556</b>
	1.Materiál, Bigbag apod.				82 500	3 929
	2.Energie, voda, phm				1 657 180	78 913
	3.Nájem, leasing				2 470 000	117 619
	4.Opravy a údržba				1 125 000	53 571
	5.Ostatní				200 000	9 524
	<b>II. Osobní náklady</b>				<b>3 920 400</b>	<b>186 686</b>
	1. Mzdové				2 904 000	138 286
	2. Sociální pojištění				1 016 400	48 400
	<b>III. Daně a poplatky</b>				<b>8000</b>	<b>381</b>
	1. Silniční daň				8000	381
	2. Daň z nemovitostí					0
	<b>IV. Jiné provozní náklady</b>				<b>500 000</b>	<b>23 810</b>
<b>Provozní náklady celkem :</b>				<b>9 963 080</b>	<b>474 432</b>	

## Produkty, jejich vlastnosti a cenová tvorba

### *Plyn*

Vyrobený plyn se spotřebuje ve vlastním zařízení a nevstupuje tak dále do ekonomiky jako produkt a proto s ním není dále počítáno (slouží jako vlastní palivo po naběhnutí procesu pomocí externího plynu).



## Olej

Tabulka 24: Výkupní ceny - pyrolýzní olej [19]

Firma:		Kč/lt	Kč /kg	Kč/t
Českomoravská olejářská, k.s.		16,94	20,36	20 360
KROS,s.r.o.		17,1	20,55	20 550
SETA SEVER,s.r.o.		15,9	19,11	19 110
THERMOIL,s.r.o.		13,54	16,27	16 270
PROBO TRANS Praha, s.r.o.		16,1	19,35	19 350
SILMET OIL		16,5	19,83	19 830
Pozn.: Uvedené ceny včetně dopravy (do 300 km)			<b>Průměrná cena :</b>	<b>19 245</b>
Z pyrolýzy :	pyrolytický olej :		Kč/t	9 000
	doprava			
			<b>Celkem :</b>	<b>9 000</b>

## Uhlík

Tabulka 25: Výkupní ceny - saze pro gumárenství [19]

Saze pro gumárenství :	
Ceny na trhu v ČR:	
Dodavatel:	Kč/t
KREMENČUG (Ukrajina)	18 000
CS CABOT (ČR)	25 000
Columbian (USA)	30 000
Z pyrolýzy	12 000

Tabulka 26: Výkupní ceny – aktivní uhlí [19]

Aktivní uhlí:		
Ceny na trhu v ČR:		
Země původu:	Kč/kg	Kč/t
Čína	90	90 000
Švédsko	120 - 200	120 000-200 000
SRN	180 - 300	180 000-300 000
Z pyrolýzy	30	30 000

## Ocel

Tabulka 27: Výkupní ceny - ocel z kordů pneumatik [19]

OCEL (z kordů pneumatik)	Kč/kg	Kč/t
Ceny na trhu v ČR:	3,5	3 500
Z pyrolýzy	3,5	3 500

Tabulka 28:

<b>financování vlastními zdroji</b>	1. rok	2. rok	3. rok	4. rok	5. rok	6. rok	7. rok	8. rok	9. rok	10. rok
vlastní kapitál	25660000									
tržba	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400
<b>příjmy celkem</b>	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400
Investiční výdaj	25660000									
provozní náklady	9963080									
provozní náklady 2. až 10. rok		11290580	11290580	11290580	11290580	11290580	11290580	11290580	11290580	11290580
material a obaly na produkty	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500
energie	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180
mzdy	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000
sociální poj.	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400
opravy a údržba	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000
ostatní	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
odpisy	1435500	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000
provozní náklady bez odpisů	8527580	8527580	8527580	8527580	8527580	8527580	8527580	8527580	8527580	8527580
daň z příjmů	1077740,8	825515,8	825515,8	825515,8	825515,8	825515,8	825515,8	825515,8	825515,8	825515,8
<b>CF</b>	<b>6030079</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>	<b>6282304,2</b>
míra rentability	0,234999	0,2448287	0,2448287	0,2448287	0,2448287	0,2448287	0,2448287	0,2448287	0,2448287	0,2448287
<b>CF snížené o odpisy</b>	<b>4594579</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>	<b>3519304,2</b>
snížená míra rentability	0,179056	0,1371514	0,1371514	0,1371514	0,1371514	0,1371514	0,1371514	0,1371514	0,1371514	0,1371514

Tabulka 29:

<b>financování úvěrem</b>	1. rok	2. rok	3. rok	4. rok	5. rok	6. rok	7. rok	8. rok	9. rok	10. rok
<b>úvěr</b>	25660000									
<b>tržba</b>	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400	15635400
<b>příjmy celkem</b>	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400	41295400
<b>Investiční výdaj</b>	25660000									
<b>provozní náklady bez úroků</b>	9963080									
<b>provozní náklady s odpisy 2. až 10. rok</b>		10727580,00	10727580,00	10727580,00	10727580,00	10727580,00	10727580,00	10727580,00	10727580,00	10727580,00
<b>materiál a obaly na produkty</b>	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500	82500
<b>energie</b>	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180	1657180
<b>mzdy</b>	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000	2904000
<b>sociální pojištění</b>	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400	1016400
<b>opravy a údržba</b>	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000	1125000
<b>ostatní</b>	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
<b>odpisy</b>	1435500	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000	2763000
<b>provozní náklady bez odpisů</b>	8527580	10527580,00	10527580,00	10527580,00	10527580,00	10527580,00	10527580,00	10527580,00	10527580,00	10527580,00
<b>úrok</b>	1283000	1180996	1073891	961431	843349	719362	589175	452480	308949	158242
<b>daň z příjmů</b>	833971	708097	728446	749814	772250	795807	820542	846515	873785	902420
<b>splátka jistiny</b>	2040087	2142091	2249196	2361656	2479738	2603725	2733912	2870607	3014138	3164844,526
<b>CF</b>	5516762	3438628	3204069	2957782	2699180	2427649	2142541	1843178	1528846	1198798
<b>míra rentability</b>	0,21499463	0,134007314	0,12486628	0,11526819	0,1051902	0,094608303	0,083497316	0,071830779	0,059580915	0,046718559
<b>CF snížené o odpisy</b>	4081262,2	675627,67	441068,67	194781,72	-63819,58	-335350,95	-620458,88	-919822,21	-1234153,71	-1564201,8
<b>snížená míra rentability</b>	0,15905153	0,026329995	0,01718896	0,00759087	-0,0024871	-0,01306902	-0,02418	-0,03584654	-0,048096403	-0,06095876

## **Závěrečné ekonomické posouzení**

Peněžní tok, nebo také cash-flow, je jednoduše řečeno příjem nebo výdej peněžních prostředků. Peněžní tok za určité období představuje tedy rozdíl mezi příjmy a výdaji peněžních prostředků za toto období. V podnikové praxi je peněžní tok důležitou veličinou, která vypovídá o schopnosti podniku generovat peníze. Schopnost přinést podniku peněžní prostředky je také jedním z rozhodujících kritérií při výběru a hodnocení investičních projektů. [25]

Míra rentability nebo také výnosnost znamená schopnost dosahovat výnosu (zisku apod.) na základě vložených prostředků, v tomto případě označeno jako příjmy. Ukazatel výnosnosti nebo efektivnosti hospodaření se vypočte jako poměr příjmu k vynaloženým prostředkům (investice a náklady) a vyjadřuje se obvykle v procentech. Jde o jeden ze základních ekonomických pojmů a jedno z hlavních kritérií hospodářského podnikání.

U financování vlastními zdroji činí průměrný roční tok hotovosti 6 257 082 Kč a míra rentability je 24 %, z toho plyne doba návratnosti čtyři roky a v případě financování úvěrem je průměrný roční tok hotovosti pouze 2 695 743 Kč a míra rentability je 10,5 % a z toho plyne doba návratnosti devět a půl roku.

V obou případech je investice realizovatelná beze ztráty, ale v případě financování úvěrem, kde je doba návratnosti téměř stejně dlouhá jako plánovaná doba používání linky, tj. deset let, je riziko ztrátovosti v případě nečekaných událostí, např. kratší životnosti linky, příliš vysoké.

## 6 ZÁVĚR

Cílem předkládané diplomové práce bylo shrnout poznatky o termickém zpracování odpadů se zaměřením na pyrolytické postupy. Praktická část této práce byla zpracována na pyrolytickém systému M3RP, dodavatel: AmbientEnergy LLC. (USA), výrobce Scogen (Indie) u společnosti AGMECO LT, s.r.o., která se za účelem zlepšení životního prostředí zaměřila na dodávky technologie, jež umožní vyřešit problémy se složitě biologicky odbouratelnými odpady, jako jsou ojeté pneumatiky, směsné plasty apod., hromadícími se na skládkách a hrozících vyvoláním katastrof např. při požáru, kontaminací půdy a spodních vod atd. Z těchto odpadů vznikají pyrolýzním zpracováním na zmíněné lince kromě tepelné energie jako druhotné suroviny hlavně pyrolýzní plyn, olej a tuhý uhlíkový zbytek. Po nastartování reakce pomocí ohřevu zemním plynem se vyrobený vlastní plyn z pyrolýzy pryžové drti (pneumatik) bez problémů dále spotřebovává v zařízení k ohřevu retort, jelikož jeho výhřevnost je  $47,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ , což je o  $10 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$  více než výhřevnost zemního plynu. Získaný pyrolýzní olej má výhřevnost  $43,3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  a to je pro srovnání o  $2 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  více než má motorová nafta, takže jde o lukrativní surovinu, která je určen k okamžitému použití jako palivo, jež je možno mísit s motorovou naftou pro použití v dieselových motorech, ale díky svému vysokému obsahu aromatických uhlovodíků je také výbornou surovinou pro chemický průmysl.

Navržená inovace stávající linky přidáním magnetického separátoru je z ekonomického hlediska dobrou volbou, která nám umožnila získat další materiálově a též ekonomicky využitelné suroviny, tj. pevný uhlíkový zbytek (saze, aktivní uhlí) a kvalitní uhlíkovou ocel z kordů pneumatik. Saze vyrobené vakuovou pyrolýzou pneumatik jsou vhodné pro aplikaci v gumárenském průmyslu a aktivní uhlí vyrobené z uhlíkového zbytku je vhodné např. při odstraňování rtuti z kouřových plynů z takových zdrojů, jako spalovny TKO a uhelné teplárny, nebo také dobře pracuje při čištění vod a to je dnes typická a velká oblast trhu s aktivním uhlím.

Z těchto důvodů jsem rád, že jsem mohl po krátký čas spolupracovat se společností AGMECO LT, s.r.o., která vlastní demonstrační jednotku pro pyrolýzní zpracování odpadů, určenou zejména pro propagaci a zkoušení tohoto procesu. Zároveň pevně věřím, že se v blízké budoucnosti tento způsob nakládání s odpady, především pneumatikami, neroztříděnými směsnými plasty a přetříděným komunálním odpadem více rozšíří,

a to nejen v České republice, a tak umožní efektivnější, ekonomičtější a ekologičtější nakládání s některými druhy odpadů.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

[1] VÁŇA, Jaroslav., HANČ, Aleš., HABART, Jan.: *Pevné odpady*. 3. vyd., 2009. Praha: ČZU v Praze, ISBN 978-80-213-1992-9, 190 s.

[2] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů. [cit. 2014-02-15]. Dostupný z WWW: <[www.mzp.cz](http://www.mzp.cz)>.

[3] HNILO, Václav. *Právní režim skládek odpadů*. Brno: Masarykova univerzita v Brně, Právnická fakulta, Katedra práva životního prostředí a pozemkového práva, 2011. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. JUDr. Ilona Jančářová, Ph.D.

[4] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic. [cit. 2014-02-15]. Dostupný z WWW:

<<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:CS:PDF>>.

[5] Energetické využití odpadů - KIC Odpady: *Odpad je nevyčerpatelný zdroj energie. Energetické využití odpadů*. [online]. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z WWW: <<http://kicodpady.cz/dokumenty/energeticke-vyuziti-odpadu-2011.pdf>>.

[6] OBROUČKA, Karel.: *Termické zneškodňování odpadů*. 1. vyd., 1997. Ostrava: VŠB Ostrava, ISBN 80-7078-505-5, 140 s.

[7] MALAŤÁK, Jan. Učební text pro předmět: *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství I.*, 2013, ČZU v Praze, Technická fakulta.

[8] VOŠTOVÁ, Věra., FRIES, Jiří.: *Zpracování pevných odpadů*. 1. vyd., 2005. Praha: ČVUT, ISBN 80-01-02672-8, 157 s.

[9] SVOBODA, Tomáš. *Energetické využití komunálního odpadu*. Praha: ČZU v Praze, Technická fakulta, 2009. 47 s., Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

[10] RYBÍN, Miroslav.: *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 1985, SNT Praha, 418 s.

[11] KURAŠ, Měčislav.: *Odpady, jejich využití a zneškodňování*. 1994, Praha: Český ekologický ústav, ISBN 80-85087-32-4, 241 s.

[12] ŠEJVL, Radovan: *Energie z odpadů II*. Biom.cz [online]. 2013-04-01 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energie-z-odpadu-ii>>. ISSN: 1801-2655.

[13] STAF, Marek.: *Výzkum termické konverze odpadní biomasy na plynná a kapalná paliva*. Biom.cz [online]. 2005-01-12 [cit. 2014-03-21]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyzkum-termicke-konverze-odpadni-biomasy-na-plynna-a-kapalna-paliva>>. ISSN: 1801-2655.

[14] OPERAČNÍ PROGRAM ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, Ministerstvo životního prostředí ČR.: *Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů I*. FITE a.s. a VŠB Ostrava, Technická univerzita, Fakulta strojní [online]. Ostrava, květen 2010. [cit. 2014-03-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.opzp.cz/ke-stazeni/252/10821/detail/studie-zarizeni-na-pyrolyticky-rozklad-odpadu-i/>>.

[15] JEVIČ, Petr a kol.: *Termolýzní zpracování zbytkové biomasy, separovaných plastových a celulózových podílů tuhého komunálního odpadu pro energetické a surovinové využití – certifikovaná metodika*. 2012, Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i., Praha, ISBN: 978-80-86884-67-7, 51 s.

[16] DRUŽSTVO ENVICRACK.: *Pyrolyzní technologie*. [online]. [cit. 2014-03-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.envicrack.cz/pyrolyza.html>>.

[17] STROJÍRNY BOHDALICE.: *Zařízení na pyrolyzní zpracování odpadů PYROMATIC*. [online]. [cit. 2014-03-26]. Dostupný z WWW: <[http://www.strobo.cz/img/down\\_soubor1091.pdf](http://www.strobo.cz/img/down_soubor1091.pdf)>.



- [18] KOHOUT, Přemysl.: *Výzkum a vývoj kotle pro spalování tříděného komunálního odpadu*. První brněnská strojírna, a.s. [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z WWW: <[www.pbs.cz/cze/getfile.php?FileID=83](http://www.pbs.cz/cze/getfile.php?FileID=83)>.
- [19] Interní materiály společnosti AGMECO LT, s.r.o.
- [20] MAGNETY.EU, katalog produktů. [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.magnety.eu/magneticke-separatory/separatory-pro-prumysl/>>.
- [21] Obrázek - získáno 31.3.2014. Dostupné z WWW: <[http://www.sroty.cz/editor/burza/img/burza\\_1910.gif](http://www.sroty.cz/editor/burza/img/burza_1910.gif)>.
- [22] Obrázek - získáno 31.3.2014. Dostupné z WWW: <<http://www.magsy.sk/25170-magneticke-separatory-magnet-nad-dopravnik>>.
- [23] PROKEŠ, Karel: *Vakuová pyrolýza a její realizace v ČR*. Biom.cz [online]. 2012-04-02 [cit. 2014-03-29]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vakuova-pyrolyza-a-jeji-realizace-v-cr>>. ISSN: 1801-2655.
- [24] Metodika laboratorních měření České asociace pro pyrolýzu a zplyňování o.s. [online]. [cit. 2014-03-31]. Dostupné z WWW: <<http://www.cpga.cz/veda-a-vyzkum/zarizeni-vscht/>>.
- [25] *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. strana naposledy edit. 2013-03-10 [cit. 2014-04-02]. Česká verze. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Pen%C4%9B%C5%BEen%C3%AD\\_tok](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pen%C4%9B%C5%BEen%C3%AD_tok)>.

## SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1: Skupiny odpadů [2]
- Tabulka 2: Způsoby využívání odpadů [2]
- Tabulka 3: Srovnání charakteristických vlastností nejběžnějších spalovacích pecí: [9]
- Tabulka 4: Pyrolýzní technologie [7]
- Tabulka 5: Pomalá pyrolýza [7]
- Tabulka 6: Rychá pyrolýza [7]
- Tabulka 7: Seznam pyrolýzních postupů použitých pro zpracování odpadů - pilotní zařízení [14]
- Tabulka 8: Pyrolýzní plyn - vlastnosti: [19]
- Tabulka 9: Složení a vlastnosti pyrolytického plynu vyrobeného z pryžové drti (pneumatik) [23]
- Tabulka 10: Některé příklady analýz složení pyrolytických plynů [19]
- Tabulka 11: Pyrolýzní olej - vlastnosti [19]
- Tabulka 12: Složení oleje když je vsázkou pryž a pneumatiky je podle výrobce [23]
- Tabulka 13: Základní fyzikální a chemické vlastnosti pyrolytických sazí [19]
- Tabulka 14: Hodnocení fyzikálně-mechanických a elektrických vlastností sazí [19]
- Tabulka 15: Hodnocení zpracovatelnosti vytlačováním na přístroji BRABENDER [19]
- Tabulka 16: Hodnocení sazí po extruzi [19]
- Tabulka 17: Orientační srovnání typických vlastností sazí ve směsi SBR [19]
- Tabulka 18: Orientační srovnání olejového a jodového čísla různých sazí [19]
- Tabulka 19: Aktivní uhlí - vlastnosti [19]
- Tabulka 20: Investiční náklady [19]
- Tabulka 21: Nákladové položky [19]
- Tabulka 22: Odpisy [19]
- Tabulka 23: Příjmy a náklady -rekapitulace [19]
- Tabulka 24: Výkupní ceny - pyrolýzní olej [19]
- Tabulka 25: Výkupní ceny - saze pro gumárenství [19]
- Tabulka 26: Výkupní ceny - aktivní uhlí [19]
- Tabulka 27: Výkupní ceny - ocel z kordů pneumatik [19]
- Tabulka 28: Financování vlastními zdroji
- Tabulka 29: Financování úvěrem

# SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1: Tannerův (trojný) diagram [6]
- Obrázek 2: Fáze termického procesu u roštové pece [9]
- Obrázek 3: Rotační spalovací zařízení s dohořivací komorou: [10]
- Obrázek 4: Fáze termického procesu u rotační pece [9]
- Obrázek 5: Fáze termického procesu u šachtové pece [9]
- Obrázek 6: Fluidní pec [11]
- Obrázek 7: Etážová pec: [11]
- Obrázek 8: Produkty pyrolýzy [7]
- Obrázek 9: Hmotnostní a energetická bilance pyrolýzy [14]
- Obrázek 10: Schéma pyrolýzní jednotky PYROMATIC [16]
- Obrázek 11: Chemické procesy a schéma pyrolýzní jednotky PYROMATIC [17]
- Obrázek 12: Schéma pyrolýzního zplyňovacího systému M3RP [19]
- Obrázek 13: Schéma pyrolýzní jednotky Babcock: [13]
- Obrázek 14: Schéma jednotky RCP: [13]
- Obrázek 15: Schéma jednotky S-B-V: [13]
- Obrázek 16: Schéma pyrolýzní jednotky Vortex-SERI: [13]
- Obrázek 17: Schéma pyrolytické jednotky [19]
- Obrázek 18: Fotka pyrolytické jednotky
- Obrázek 19: Fotka retortové části
- Obrázek 20: Hořák ABG-4 [19]
- Obrázek 21: Schéma bezpečnostní fláry [19]
- Obrázek 22: Zařízení pro filtraci [19]
- Obrázek 23: Kondenzace dehtů a těžkých olejů (II. stupeň) [19]
- Obrázek 24: Sloupová výplňová pračka plynů (III. stupeň) [19]
- Obrázek 25: Centrifuga Alfa Laval [19]
- Obrázek 26: Schéma dopravy uhlíku (sazí) [19]
- Obrázek 27: Schéma bubnové magnetické separace [21]
- Obrázek 28: Příčná (nahore) a podélná (dole) pásová magnetická separace [22]
- Obrázek 29: Schéma linky před inovací
- Obrázek 30: Schéma linky po inovaci
- Obrázek 31: Plynový chromatograf HP 6890 [24]
- Obrázek 32: Elementární analyzátor Flash 1112 [24]
- Obrázek 33: Kalorimetr C200 IKA [24]