



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# VYUŽITÍ PYROLÝZY PRO ZÍSKÁNÍ KAPALNÝCH PALIV

UTILIZATION OF PYROLYSIS FOR LIQUID FUELS PRODUCTION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Hruška

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Igor Hudák, Ph.D.

BRNO 2018



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Daniel Hruška**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Igor Hudák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

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

### Využití pyrolýzy pro získání kapalných paliv

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je zpracovat rešerši se zaměřením na pyrolýzní jednotky. Úkolem studenta je vyhledat a zanalyzovat dostupná data pro různé vstupní materiály s důrazem na výstupní produkt – vlastnosti získaného paliva (výhřevnost, spalné teplo a další chemicko-fyzikální vlastnosti). V dalším kroku by mělo dojít ke srovnání tohoto typu paliva s relevantním vzorkem jiných běžně dostupných paliv. Součástí práce je také výpočet bilance v simulačním programu pro vybraný typ paliva. Současně by mělo dojít ke zhodnocení zpracování materiálů pomocí pyrolýzy z pohledu dlouhodobé udržitelnosti technologie.

#### Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešeršní práce v oblasti pyrolýzních jednotek.
- 2) Analýza složení paliva získaného pyrolýzou.
- 3) Porovnat vlastností paliva získaných pyrolýzou se standardizovanými
- 4) Spočítat bilanci pro pyrolýzní jednotku pomocí simulačního software, získaná data pak popsat a vyhodnotit.

#### Seznam doporučené literatury:

BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis - Practical Design and Theory. B.m.: Elsevier, 2010. 364 s. ISBN 978-0-12-374988-8.

OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. "Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy": studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy". 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007, 228 s. ISBN 978-80-248-1426-1.

Nesvadba, Jindřich. Pyrolýza a odpady: Část 1 – 5. Praha : Inkoteka, 1997.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 10.10. 2017

L. S.

---

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

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

## Abstrakt

Hlavní náplní předkládané bakalářské práce je rešerše problematiky pyrolýzních jednotek. Důraz je přitom kladen na zjednodušený popis jejich funkce, procesů a chemických dějů, které při zpracování odpadu a biomasy v pyrolýzních jednotkách probíhají, porovnání výhod a nevýhod daných typů pyrolýzních reaktorů a analýza produktů získaných pyrolýzou. Práce se také věnuje kvalitativnímu porovnání výsledného produktu získaného pyrolýzou, který se používá pro energetické účely s běžně užívanými palivy. Poslední část práce je věnována zjednodušenému matematicko-chemickému modelu výpočtu energetické bilance a porovnání vlastností paliva získané pyrolýzou a některých běžně užívaných paliv.

## Klíčová slova

pyrolýza, termický rozklad, nakládání s odpady, využití biomasy, pyrolýzní reaktor, pyrolýzní jednotka, pyrolýzní produkt, pyrolýzní plyn, pyrolýzní olej, bio-olej

## Abstract

The main content of this bachelor thesis is description of matters of the pyrolysis units. Whereas there is an emphasize on basic description of the function, methods and the chemical processes during pyrolysis reaction in the pyrolysis unit for waste treatment a biomass, comparisons of the advantages and disadvantages selected types of the pyrolysis unit and analyzing of the product gaining during pyrolysis. Thesis also present qualitative comparison of the pyrolysis products and the commonly used fuels. The last part of the thesis is deals with to a simplyficated mathematical and chemical calculation for energetic efficiency of pyrolysis products and comonly used fuels.

## Key words

pyrolysis, thermal degradation, waste treatment, use of biomass, pyrolysis reactor, pyrolysis unit, product of pyrolysis, pyrolysis gas, pyrolysis oil, bio-oil

## Bibliografická citace

HRUŠKA, D. *Využití pyrolýzy pro získání kapalných paliv*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Igor Hudák, Ph.D.

## Prohlášení o původnosti

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne: 24.5.2018

-----  
Daniel Hruška

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Igoru Hudákovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a vždy ochotný, vstřícný a trpělivý přístup. Poděkování také náleží celé mé rodině za podporu během mého studia.



# Obsah

Úvod.....	11
1. Odpadové hospodářství.....	12
2. Pyrolýza.....	14
2.1. Základní charakteristiky pyrolýzy.....	14
2.2. Historie pyrolýzy.....	15
2.3. Rozdělení způsobu přívodu tepla.....	16
2.4. Fáze a chemické procesy během pyrolýzy.....	17
2.4.1. Fáze pyrolýzy biomasy.....	18
2.5. Pyrolýzní postupy.....	18
2.5.1. Pomalá pyrolýza.....	19
2.5.2. Rychlá pyrolýza.....	19
2.5.3. Ultra rychlá pyrolýza.....	19
2.5.4. Blesková pyrolýza.....	20
2.6. Speciální metody pyrolýzy.....	20
2.6.1. Plazmová pyrolýza.....	20
2.6.2. Mikrovlnná pyrolýza.....	20
2.6.3. Kombinované spalování a pyrolýza.....	21
2.7. Produkty pyrolýzy.....	22
2.7.1. Pevné produkty.....	23
2.7.2. Kapalné produkty.....	23
2.7.3. Plynné produkty.....	23
3. Pyrolýzní reaktory.....	25
3.1. Vertikální (šachtové) reaktory.....	25
3.2. Reaktory s rotačním bubnem.....	27
3.3. Reaktory s fluidním ložem.....	28
3.4. Autoklávy.....	30
3.5. Retorta.....	31
3.6. Porovnání pyrolýzních reaktorů.....	31
3.7. Pyrolýzní zařízení v ČR.....	37
3.7.1. Pyromatic.....	37
4. Analýza složení paliva získaného pyrolýzou.....	39
5. Energetická bilance pro paliva získaná pyrolýzní jednotkou.....	41

5.1. Popis simulačního modelu.....	41
5.2. Výsledky.....	43
5.3. Zhodnocení výsledků.....	46
Závěr.....	48
Seznam použité literatury.....	49
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	52

# Úvod

Jedním ze symbolů moderní doby je snaha o energetické využívání odpadů. Na skládkách v ČR každoročně přibývá odpad o energetickém potenciálu 3 milion tun hnědého uhlí ve formě vysoce výhřevných plastů, papíru, starého nábytku a jiných spalitelných odpadů [1], což rozhodně není zanedbatelné číslo.

*„V naší zemi aktuálně schází kapacita pro energetické využití několika milionů tun odpadů ročně. Z těžko pochopitelných důvodů se preferuje třídění odpadů, i když většina z vytríděných frakcí stejně skončí na skládce, ovšem za cenu vyšší energetické náročnosti.“* [1] Tento stav může být také způsoben nedostatečnými znalostmi problematiky ze strany mnohých ekologických aktivistů a taktéž mnohých ústavních činitelů. V současnosti energetický potenciál ukrytý v odpadech převyšuje ten v biomase. Pyrolýzou a zplyňováním lze energeticky využít mimo již zmíněnou biomasu také odpadní plasty, staré pneumatiky a během těchto procesů probíhá mimo oxidační reakci, jako je tomu u spalování, celá řada druhotných redukčních reakcí, při kterých jsou odbourávány mnohé řetězce nebezpečných škodlivých látek. [1]

V současné době se vývoj pyrolýzních zařízení ubírá směrem pokročilých fyzikálních metod, výsledkem čehož je například mikrovlnná pyrolýza, plazmová pyrolýza, nebo kombinované zpracování odpadů spalováním a pyrolýzou. [2] Do budoucna může pyrolýza nabídnout potenciál ekonomické, energetické a ekologické likvidace odpadu a výroby druhotných surovin.

# 1. Odpadové hospodářství

V průběhu několika minulých desetiletí se odpad stal druhotnou surovinou, a proto se také nabízí myšlenka, která je v současné době stále aktuálnější. A to uvažovat o odpadu a biomase jako o potenciálních zdrojích energie.

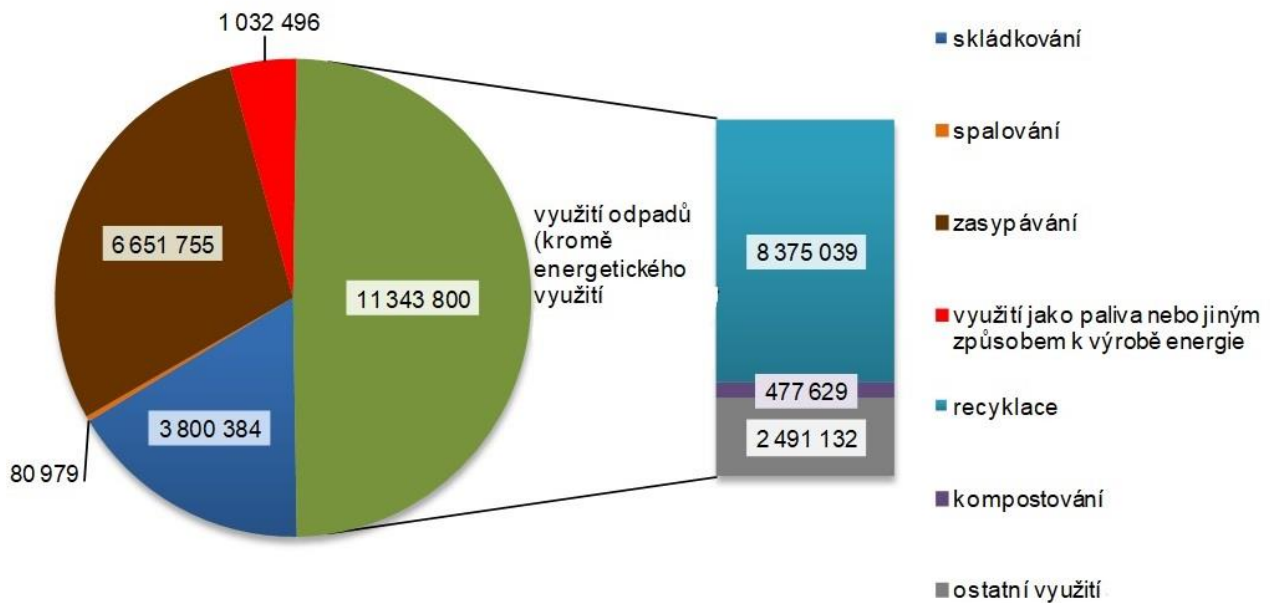
Při nakládání s odpadem se jsou uvažovány dva stavy. Buď je známo, jak jej dále použít nebo ne. V případě druhého stavu nezbyvá než odpad skládkovat. Údaje o produkci a nakládání s odpady v ČR udává Tabulka 1.1 [3] a Obrázek 1.1. [4]

Tabulka 1.1 – Produkce odpadů v ČR [3]

	<b>celkem [t]</b>	<b>nebezpečné [t]</b>	<b>ostatní [t]</b>
<b>Produkce odpadů celkem</b>	<b>25 757 793</b>	<b>1 094 749</b>	<b>24 663 043</b>
<b>z podniků</b>	<b>21 081 816</b>	<b>1 081 842</b>	<b>20 719 974</b>
zemědělství, lesnictví a rybnářství	114 577	8 815	105 762
těžba a dobývání	143 876	15 486	128 390
zpracovatelský průmysl	4 670 646	550 976	4 119 670
výroba a rozvod elektřiny, plynu, tepla	889 248	12 440	876 808
činnosti související s odpadními vodami	3 632 098	278 868	3 353 230
stavebnictví	10 141 986	105 499	10 036 487
doprava a skladování	252 794	22 493	230 301
<b>z obcí</b>	<b>3 955 977</b>	<b>12 907</b>	<b>3 943 069</b>
komunální odpad	<b>3 579 614</b>	<b>6 878</b>	<b>3 572 736</b>

Již od 20. století byly vyvíjeny technologie a průmyslová zařízení na tepelné využití tuhého domácího odpadu a biomasy. V minulosti byla zkoumána řada biochemických a termochemických procesů. Pro dnešní energetické infrastruktury jsou nejvhodnější následující procesy, které se rozdělují do skupin podle typu reakce:

- spalování (kompletní oxidace)
- zplyňování (částečná oxidace)
- pyrolýza (tepelné štěpení bez přístupu, nebo s omezeným přístupem kyslíku)



Obrázek 1.1 – Nakládání s odpady v ČR v roce 2016 [4]

Stále nejrozšířenějším způsobem nakládání s odpady k výrobě energie je spalování. Nicméně tímto procesem nelze z odpadu získávat žádné další produkty vyjma nežádoucích a těch, které již nelze dále zužitkovat, nebo jen v omezené míře, jako jsou oxidy uhlíku (CO, CO<sub>2</sub>), síry, dusíku, produkty chloru (dioxiny a furany), těkavé organické sloučeniny, polycyklické aromatické uhlovodíky, prach, popel atd. [5] Naopak zplyňování a pyrolýza nabízejí potenciál mnohem větší efektivity při výrobě energie a paliv. Především jejich výhody v oblasti ekologie a efektivního využití odpadů a biomasy jsou nezanedbatelné. Nutno však podotknout, že pyrolýza je stále ještě ve fázi vývoje a experimentálního používání, nikoliv hojně užívaný proces tak jako je tomu například u spalování, přestože se ukazuje, že pyrolýza je procesem energeticky soběstačnějším, čímž lze dosáhnout také snížení provozních nákladů. [5]

V souladu s charakterem, druhem a složením jednotlivých průmyslových a jiných odpadů, nebo biomasy je třeba rozhodnout, mají-li být spalovány, nebo pyrolyzovány. [5]

## 2. Pyrolýza

Slovo pyrolýza vychází z řeckého jazyka a je to spojení slova pyros (oheň nebo žár) a lýsis (uvolňovat). Tento název je trochu zavádějící, jelikož se nabízí domněnka, že se jedná o proces, jehož základem je spalování (uvolňování tepla). U pyrolýzy tomu tak není. Slovo lýsis (uvolňovat) je zde ve smyslu rozdělení dílčích složek vstupního produktu. Definice: Pyrolýza je termický rozklad látek bez přístupu kyslíku, nebo s jeho sníženou koncentrací, tedy v atmosféře, ve které nedochází ke spalování. Proces pyrolýzy je také v některých starších literaturách nazýván jako odplyňování. [6]

### 2.1. Základní charakteristiky pyrolýzy

Pyrolýza je tepelně-chemický rozklad biomasy a odpadu s vysokým podílem organických sloučenin na širokou škálu dále využitelných produktů. Během pyrolýzy dochází k rozkladu velkých uhlovodíkových řetězců na jednodušší řetězce uhlovodíků. [6] Podrobně je na Obrázku 2.1 [6] znázorněn rozklad celulózy během pyrolýzy. Produkty můžeme rozdělit na plynné, kapalné a pevné. Pyrolýza probíhá za relativně nízkých teplot od 300–800 °C nejčastěji se však provádí při teplotě 300–650 °C a jako taková se v některých aspektech podobá procesu krakování ropy a je tvořena několika po sobě jdoucími dílčími procesy. [6]

Na náročnost tepelného štěpení má významný podíl vlivu disociační (vazební) energie vazby, viz. Tabulka 2.1 [7] a Tabulka 2.2 [7]. Štěpení se uskutečňuje u tuhých látek, kapalných i plynných i za nízkých teplot okolo 400 °C. Tak jak je tomu u některých dalších chemických reakcí, se zvyšováním teploty se zvyšuje rychlost reakce. Během pyrolýzy můžeme pozorovat také rozklad až na prvky jako je uhlík ve formě koksu nebo sazí a na vodík. [7]

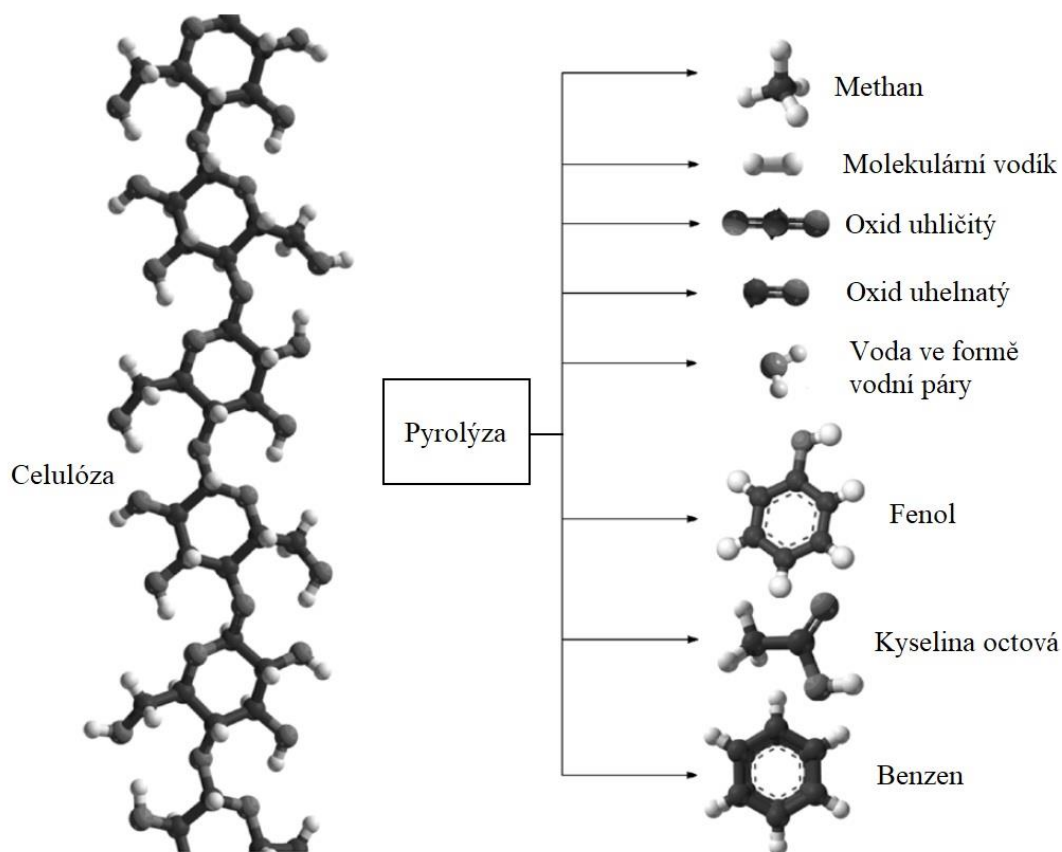
Tabulka 2.1 – Disociační energie jednoduchých vazeb [7]

Vazba	C–S	C–N	C–C	C–O	C–H
Energie vazby (kJ×mol <sup>-1</sup> )	270	300	350	360	400

Tabulka 2.2 – Disociační energie násobných vazeb [7]

Vazba	C=S	C=N	C=C (alkeny)	C=C (aromáty)	C≡C
Energie vazby (kJ×mol <sup>-1</sup> )	530	620	470	620	700

Hodnoty disociační energie v tabulkách jsou jen experimentální, mohou být tedy považovány za střední hodnoty. Přesné hodnoty jsou prakticky nezměřitelné, protože jsou ovlivněny dalšími faktory jako je složení a uspořádání molekul, přítomnost skupin atd. Rozkladem během pyrolýzy dochází převážně k vytváření násobných vazeb, z čehož vyplívá výrazně endotermní charakter procesu pyrolýzy. [7]



Obrázek 2.1 – Rozklad velkých uhlovodíkových molekul na menší během pyrolýzy [6]

## 2.2. Historie pyrolýzy

Ač se to může zdát těžko uvěřitelné, proces pyrolýzy byl objeven již mnoho století před Kristem. Jednalo se tehdy o prostou takzvanou pomalou pyrolýzu dřeva v milířích nebo jámách. Aby byl omezen přístup kyslíku, milíř se jednoduše zasypal hlínou. Proces probíhal několik desítek hodin za minimálního přístupu kyslíku při vysoké teplotě. Produktem bylo dřevěné uhlí, které bylo používáno k extrakci železa ze železné rudy. Ze 100 kg dřeva je tímto procesem možno získat okolo 20 kg dřevěného uhlí. [6,8]

Ve 40. letech 19. století započal výzkum nového minerálního oleje, který by nahradil velrybí olej coby nejpoužívanější palivo pro olejové lampy. Vedoucím výzkumného týmu byl tehdy Abraham Gesner, kanadský fyzik, jehož portrét je na Obrázku 2.2 [6], jemuž se podařilo procesem, který je níže popsán, získat kapalinu s energetickým potenciálem. Produkt pojmenoval kerosene (petrolej) původem z řeckého slova pro výraz vosk a znamenal obrovský průlom pro průmysl, ekonomiku a ekologii na celém světě. Zapříčinil taktéž úpadek velrybářského průmyslu, což možná odvrátilo globální katastrofu, ve které by lidstvo vymýtilo velryby z oceánů. Proces extrakce petroleje z uhlí probíhal následovně: [6]

- nejprve ohřevem malých kousků uhlí při teplotě 427 °C a s omezeným přístupem kyslíku
- následně čištění pomocí kyseliny sírové a vápna
- a poté opětovný ohřev při teplotě 427 °C

Významným úspěchem tohoto objevu byl také fakt, že během spalování v olejové lampě petrolej hoří intenzivním jasným plamenem za vzniku mnohem menšího množství dýmu než během hoření velrybího oleje. Později Dr. Gesner prokázal použitelnost tohoto procesu pro extrakci petroleje i z ropy. [6]



Obrázek 2.2 – Portrét Dr. Abrahama Gesnera [6]

Významný milník v historii pyrolýzy znamenala také druhá světová válka, během níž Německo vyrábělo pohonné hmoty převážně z hnědého uhlí dvojestupňovým procesem. V prvním stupni probíhalo sušení proudem spalin o teplotě 200 °C. V druhém stupni bylo uhlí zahříváno přímým kontaktem se spalinami na teplotu 600 °C. Odváděný horký plyn byl ochlazován a čištěn. Následnou separací byl získán těžký a lehký dehet a pyrolýzní olej. [8]

Po druhé světové válce se stala ropa hlavní surovinou pro výrobu paliv, čímž se na několik desetiletí staly ostatní způsoby výroby paliv druhořadými a neperspektivními, stejně tak jako pyrolýza. V posledních zhruba třiceti letech zažívá pyrolýza obrození, především díky celosvětové snaze snížit využívání fosilních paliv jako je ropa, uhlí, zemní plyn a další a jejich nahrazení obnovitelnými zdroji. [6,8]

### 2.3. Rozdělení způsobu přívodu tepla

Zásadním otázkou pyrolýzy je způsob přívodu tepla. Reakční teplota má ze všech vlivů nejzásadnější dopad na finální produkt pyrolýzy. Nejvýhodnější z hlediska provozu pyrolýzního zařízení je, aby produkce pyrolýzních plynů, případně olejů a jiných spalitelných složek, viz. kapitola 2.7. plně postačovala k výrobě tepla potřebného pro pyrolýzní proces. Pokud pyrolýzní zařízení splňuje tuto podmínku, mluvíme o procesu jako o autotermním.

Při pyrolýze je do reakčního prostoru dodáváno teplo pro ohřev reaktoru a kompenzaci tepelných ztrát. Teplo je přenášeno kondukcí neboli vedením, které je výsledkem vzájemného



energetického působení všech elementárních částic látky, nebo konvekcí neboli prouděním. Přenos tepla konvekcí je způsoben rozdílem teplot proudící kapaliny, či plynu. Tento způsob přenosu tepla je silně závislý na rychlosti proudící kapaliny, nebo plynu. Čím větší je rychlost, tím menší je přenos tepla. V pyrolýzních reaktorech je také realizován přenos tepla radiací neboli sáláním. Fyzikálním principem této tepelné výměny je podle teorie o vlnově-částicovém dualismu, pohyb fotonů s množstvím energie, které se pohybují rychlostí světla a jsou emitovány všemi směry a předávají energii hmotě, do které narazí. [8]

Dnes se v praxi používají nejčastěji tyto postupy ohřevů: [7,8]

- Přímý ohřev vsázky horkými spalinami plynů nebo olejů přiváděných do reakčního prostoru
- Přímý ohřev teplem v prostoru probíhající reakce pomocí spalování koksu (používá se při pyrolýze nebezpečných odpadů, nebo vsázky s vysokým podílem anorganických složek)
- Nepřímé zahřívání spalnými plyny, které jsou produktem hoření plynných nebo kapalných paliv ve spalovací komoře [7,8]

Dalšími možnými způsoby jsou:

- Přivádění tepla pomocí spálení části pyrolyzované vsázky s přidáním přesně stanoveného množství kyslíku. Jedná se o tzv. oxidační pyrolýzu uhlovodíků
- Ohřev pomocí medií, která nijak neovlivní reakci (přehřátá sytá vodní pára, inertní plyny, pevné přenašeče tepla) [2,7,8]

Nepřímým ohřevem je přenos tepla většinou realizovaný pomocí kovové stěny nebo trubkami v loži reaktoru. Toto umožňuje snadnější odvádění pyrolýzního plynu, který může sloužit jako palivo pro ohřev, jakmile započne proces pyrolýzy a uvolňování vhodného plynu. Tento postup je ideální pro získávání velkého množství pyrolýzních produktů. [7,8]

Přenos tepla do většinou špatně vodivé vsázky bývá mnohdy energeticky náročný, proto je kladen důraz na to, aby byly dostatečně dimenzovány plochy vyměňování tepla.

## 2.4. Fáze a chemické procesy během pyrolýzy

Pyrolýzu, jakožto chemicko-fyzikální proces lze rozdělit do několika po sobě jdoucích fází, jimž přísluší chemické reakce. Tyto fáze se nejčastěji rozlišují dle teploty, za kterých příslušné reakce probíhají. [8]

Fáze lze rozdělit:

- Sušení, odpařování vody a uvolňování plynů, nejčastěji  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  – při teplotě 100–200 °C,
- Dezoxidace, desulfurace, odštěpení oxidu uhličitého a vázané vody, začátek depolymerace a odštěpování  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  – při teplotě cca 250 °C
- Vznik metanu a jiných alifatických uhlovodíků\* – při teplotě cca 340 °C
- Karbonizační fáze – při teplotě cca 380 °C
- Štěpení vazeb uhlíku – při teplotě cca 400 °C
- Tvorba pyrolýzního oleje a dehtu – při teplotě 400–600 °C

- Krakování, vznik plynů s krátkým uhlovodíkovým řetězcem, vznik aromatů – při teplotě cca 600 °C
- Dehydrogenace uhlovodíků a termická aromatizace – při teplotě 600–1000 °C [7,9]

\*Alifatické uhlovodíky jsou uhlovodíky nearomatické a tvořené pouze atomy uhlíku a vodíku (alkany, alky, alkeny)

### 2.4.1. Fáze pyrolýzy biomasy

Sušení (100–200 °C) je primární fáze ohřevu při této relativně nízké teplotě dochází k uvolňování volné vlhkosti a části vázané vody a jejímu vypařování. Vodní pára je odváděna do kondenzačního zařízení, kde kondenzuje. Počáteční fáze (100–300 °C) zahrnuje fázi sušení a odtah plynů CO a CO<sub>2</sub>. [6,8]

Fáze primární pyrolýzy (200–600 °C) v této fázi se vytváří většina par a většina složek pyrolýzních olejů, některé velké uhlovodíkové řetězce organických sloučenin se rozkládají na menší řetězce, zkapalnitelné plyny (předchůdci kapalných produktů), nezkapalnitelné plyny a tuhé zbytky. [6]

Konečná fáze (300–900 °C) zahrnuje primární krakování, při teplotě zhruba 300 °C. Produktem jsou zkapalnitelné plyny a odpadní plyny. Zkapalnitelné plyny jsou zpravidla rychle odvedeny z pyrolýzního reaktoru a kondenzují jako dehet nebo pyrolýzní olej (bio-olej). Toto rychlé odvádění je velmi důležité pro celkové zvýšení produkce kapalného výtěžku. Je jím totiž snížena teplota plynů, což se jeví jako nevýhodné, protože se zvyšující se teplotou dochází k uvolňování plynů rychleji a ve větším množství, avšak také k takzvanému sekundárnímu krakování, které je nežádoucí. Produkt sekundárního krakování, k němuž by docházelo, kdyby plyny nebyly odtahovány z reaktoru, v současné době nelze nijak zužitkovat. [2,6,7]

## 2.5. Pyrolýzní postupy

Ovlivněním hlavních parametrů jako je teplota a reakční doba je možné přímo ovlivnit jednotlivé výtěžky reakcí a to plynné, kapalné, nebo pevné. Jak už bylo v předchozí kapitole zmíněno, reakční teplota má nejzásadnější vliv na produkty pyrolýzy. [2,6,7] Dle kritéria teplotního rozsahu můžeme pyrolýzu rozdělit na:

- Nízkoteplotní – probíhá při teplotě do 500 °C
- Středněteplotní – probíhá při teplotě 500–800 °C
- Vysokoteplotní – probíhá při teplotě nad 800 °C [6,7,9]

Druhým nejzásadnějším faktorem ovlivňující produkt pyrolýzy je reakční doba. Jinými slovy čas, během něhož je vsázka v pyrolýzním reaktoru aktivně zpracovávána. [6] Dle reakční doby pyrolýzu dělíme na:

- Pomalá pyrolýza
- Rychlá pyrolýza

Zda se jedná o pomalou nebo rychlou pyrolýzu rozhodují dva parametry. Čas ohřevu a takzvaný charakteristický reakční čas. Jestli-že platí, že čas ohřevu je významně větší než

charakteristický reakční čas, pak se jedná o pomalou pyrolýzu. Jestliže čas ohřevu je významně menší než charakteristický reakční čas, pak hovoříme o rychlé pyrolýze. [6]

Přibližné procentuální zastoupení jednotlivých skupenských fází výtěžků udává Tabulka 2.3. [7]

*Tabulka 2.3 – Procentuální zastoupení produktů dle skupenských fází ve výtěžku u základních typů pyrolýzy [7]*

Produkty	Rychlá pyrolýza	Pomalá pyrolýza
Kapalné	60–80 %	30–35 %
Plynné	12–20 %	25–30 %
Tuhé	5–15 %	25–35 %

### 2.5.1. Pomalá pyrolýza

Nejjednodušší a energeticky nejméně náročná pomalá pyrolýza běžně nazývána jako karbonizace jejímž hlavním produktem je dřevěné uhlí. Probíhá při teplotě přibližně 450 °C. Jedná se o nejstarší, ale stále používanou metodu zpracování biomasy. Rychlost zahřívání je velmi nízká a fáze sušení probíhá relativně dlouho. Vsázka setrvává v pyrolýzním reaktoru v řádu minut až hodin. Moderní aplikace této metody poskytují přibližně vyrovnaný podíl pevného, kapalného a plynného produktu. [6,10]

V současnosti se dřevěné uhlí vyrábí v takzvaných karbonizačních pecích, nebo retortách, které zajišťují kromě efektivnější výroby také stálou kvalitu produktu. V retortách i karbonizačních pecích probíhá řízený karbonizační proces. Řízení je zajištěno řídicí jednotkou, z čehož vyplývá, že tento proces je snadno automatizovatelný. [10]

### 2.5.2. Rychlá pyrolýza

Principem rychlé pyrolýzy je rychlý přívod tepla do vsázky, která setrvává v reaktoru v řádu sekund. Produkty jsou zpravidla kapalné a plynné. Rychlá pyrolýza se dále dělí na ultra rychlou takzvanou „ultra rapid“ a bleskovou takzvanou „flash pyrolýzu“. Teplotní rozsah závisí na požadovaném produktu. Pro získání kapalných produktů to bývá okolo 450–650 °C s krátkou dobou setrvání vsázky v reakční zóně (v řádu jednotek sekund). Primárními produkty jsou zkapalnitelné plyny, aerosoly, tuhé zbytky a nezkapalnitelné plyny. Po rychlém ochlazení a zkapalnění zkapalnitelných plynů je produktem pyrolýzní olej o nízké viskozitě. Pro získání plynných produktů je vsázka rychle zahřívána až na teplotu 1000 °C. Po odtahu zkapalnitelných plynů se provádí jejich ochlazení a dochází ke kondenzaci. Ve větší míře jsou však zastoupeny nezkapalnitelné plyny. [6,7,10]

Jedná se o moderní a perspektivní proces, na jehož vývoji se stále pracuje. Tímto způsobem je možné zpracovávat biomasu, bioodpady, ale i tuhé domácí odpady s vysokým podílem organických látek. [10]

### 2.5.3. Ultra rychlá pyrolýza

Ultra rychlá pyrolýza požaduje kromě rychlého přívodu tepla také rychlé promíchávání vsázky. Dosahuje se tak snížení času sušení a uvolňování zkapalnitelných i nezkapalnitelných plynů,

kteře jsou separátorem oddělovány od pevných částic. Výhodou této metody oproti normální rychlé pyrolýze je vyšší výnosnost produktů. Nevýhodou je nutnost speciálního pyrolýzního zařízení se separátorem pevných částic a míchačem, nebo obračecem vsázky. [6,7]

#### 2.5.4. Blesková pyrolýza

Takzvaná blesková pyrolýza se používá pro získání kapalných produktů. Sušení a odtah nekapalnitelných plynů probíhá v řádu milisekund. Zastoupení kapalného produktu je v celkovém výtěžku 70 až 75 %. [6]

### 2.6. Speciální metody pyrolýzy

Stejně tak jako většina technologií v průmyslu, i pyrolýza od svého vzniku prošla mnohými zlepšeními. Doménou dnešní doby v oblasti zpracování odpadů jsou ekologické a efektivní metody využívající sofistikovaných způsobů. Pořizovací cena zařízení, která pracují se speciálními metodami pyrolýzy bývá zpravidla velmi vysoká, stejně tak jako jsou finančně náročné jejich provozy. Některé speciální metody se užívají ke zpracování nebezpečných odpadů. [8]

#### 2.6.1. Plazmová pyrolýza

Principem plazmové pyrolýzy, jak už tomu název napovídá je užití plazmatu. Tato metoda je jednou z nejnovějších, které se v současnosti používají. Plazmat je ionizovaný plyn o vysoké teplotě (5 000 – 10 000 °C), vzniká v zařízení pomocí žhavené wolframové elektrody, která emituje elektrony. Zdrojem energie je elektrický proud nebo elektromagnetické záření. Vysoká teplota je však pouze v místě proudu plazmatu, nikoli však v celém zařízení. Tento jev probíhá v atmosféře argonu, helia, nebo vodní páry. Pro technologie zpracování odpadů se z ekologických důvodů používá upravený vzduch s obsahem argonu. [8]

Odpad se z důvodu vysoké energetické hustoty působící v účinném místě rozkládá na molekulové struktury, z nichž vznikají jednoduché sloučeniny. Proces je velmi ekologický, rychlý, efektivní a nabízí možnosti automatizace. Je však také energeticky náročný a drahý. Velkou výhodou této technologie je její možnost použití pro odpady s nízkou nebo velmi nízkou výhřevností. [8,11]

Plazmovou technologii pyrolýzy můžeme rozdělit na:

- Vysokoteplotní
- Nízkoteplotní

Plazmová pyrolýza je v největší míře používána ke zpracování nebezpečných plynů a kapalin. Ve světě funguje 10 závodů na zpracování odpadů plazmovou pyrolýzní technologií, a to především v ekonomicky vyspělých zemích jako je Japonsko, USA, Austrálie. [11]

#### 2.6.2. Mikrovlnná pyrolýza

Mikrovlnné technologie jsou stejně tak v průmyslu i domácnostech již dobře zaběhnuté. Používání mikrovln jako zdroje záření, kterým je možné ohřívat vsázku pyrolýzního reaktoru

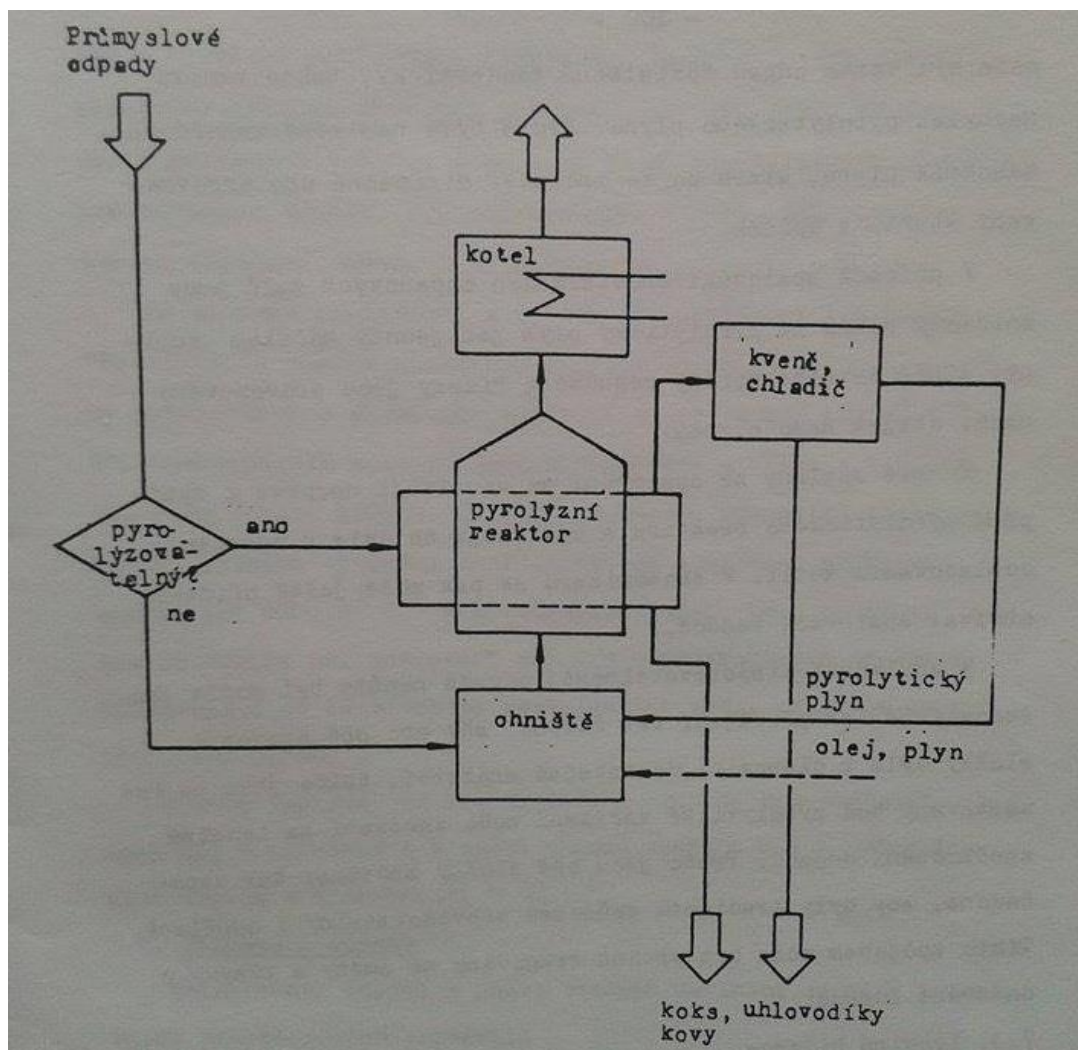
je nejen velmi výhodné, ale i ekologické. Tato technologie nabízí podobně jako plazmová pyrolýza možnost energetického zpracování nebezpečných odpadů, ale i běžných tuhých domácích odpadů. Tato technologie se vyznačuje vysokou relativní efektivností a rychlostí v porovnání s běžnými pyrolyzními metodami, kdy je pro termický rozklad vsázky spalováno palivo pod roštem reaktoru. [6]

Principem je ohřev vsázky pomocí mikrovlnného záření generovaného zdrojem elektromagnetického záření. Teplota v reaktoru je snadno ovladatelná s téměř okamžitou odezvou na změnu nastavení, což umožňuje zvýšení výtěžku konečných produktů a taktéž ovlivňovat procentuální zastoupení jednotlivých skupenských fází výtěžku. Běžné pyrolyzní metody (pomalá, rychlá, blesková atd.) používají k ohřevu vsázky vedení, proudění nebo sálání tepla. Mikrovlnným ohřevem je převáděna elektromagnetická energie na tepelnou. Vysoká efektivnost této metody je mimo jiné zajištěna minimálním ohřevem stěn reaktoru. [11]

### 2.6.3. Kombinované spalování a pyrolýza

Již v 80. letech minulého století bylo prokázána energetická výhodnost spojení dvou samostatně realizovatelných postupů likvidace odpadu. V této kapitole se jedná o spojení pyrolyzního procesu a spalování odpadu. Pyrolýza jako taková je proces samostatně relativně energeticky náročný, protože vyžaduje energii ve formě tepla na ohřev vsázky. Je sice možné některé produkty pyrolýzy hned po jejich získání spalovat, ale z hlediska prvotního záměru získávání alternativních paliv pro různá průmyslová odvětví je tento postup nevýhodný, protože finální množství produktů by bylo menší o podíl využitý právě na ohřev vsázky. Proto je kombinované spalování a pyrolýza výhodnější vzhledem k celkovému množství získávaného produktu z pyrolýzy. Tento koncept představuje pružné řešení regionálního odstraňování průmyslového ale i komunálního odpadu a nachází také uplatnění jako mobilní stavebnicový systém při asanaci starých skládek. [2,6]

V průmyslovém i komunálním odpadu vždy najdeme část, která je vhodná k pyrolýze a část, která nikoliv. V souladu s charakterem, druhem a složením jednotlivých odpadů, je třeba rozhodnout, mají-li být spalovány, nebo pyrolyzovány. Přívod tepla do pyrolyzního reaktoru je zajištěn spalováním právě té části odpadu, která k pyrolýze není vhodná. Vynášený pyrolyzní plyn se chladí a zkapalnitelné složky kondenzují za vzniku pyrolyzního oleje. Nezkapalnitelné složky po zásaditém praní tvoří pyrolyzní plyn. Z důvodu nehomogenity spalovaného odpadu je vždy potřeba počítat pouze s přibližnou výhřevností, a proto se vzniklý pyrolyzní plyn používá jako podpůrné palivo pro případ vyrovnání teplotního deficitu. A právě zmíněná nehomogenita odpadu může dokonce způsobit, že nebude dostatečně zásobena pyrolyzní, nebo spalovací část zařízení. Proto jsou obě části uspořádány tak, aby bylo možné je provozovat i nezávisle a pružně tak reagovat na výkyvy ve složení odpadu. Schematické znázornění zařízení využívající kombinace spalování a pyrolýzy je na Obrázku 2.3. [2,7]



Obrázek 2.3 – Schéma zařízení kombinované pyrolýzy a spalování [2]

## 2.7. Produkty pyrolýzy

Jak už bylo zmíněno v kapitolách 2.1., 2.4. a 2.5. během procesu pyrolýzy dochází k v průběhu mnoha chemických reakcích k rozkladu velkých uhlovodíkových řetězců na jednodušší uhlovodíkové sloučeniny. Tyto produkty pyrolýzy mohou být pevné, plynné nebo kapalné. Přičemž všechny tyto produkty nabízí potenciál využitelnosti jako paliva. Vlastnosti jednotlivých produktů pyrolýzy se od sebe významně liší v závislosti na zvolené pyrolyzní technologii, i způsobu přívodu tepla do pyrolyzního reaktoru. Energetické kvality produktů se navzájem významně liší v závislosti na podmínkách v reaktoru. [2,6,8,11]

Přibližné hodnoty výhřevnosti některých paliv pro srovnání udává Tabulka 2.4. [6]

Tabulka 2.4 – Hodnoty výhřevnosti některých paliv [6]

Palivo	pyrolytický koks	uhlí	dřevěné piliny	bio-olej	pyrolyzní plyn
Jednotka	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/m <sup>3</sup>
Výhřevnost	~ 28	~ 25	~ 20	~ 13–18	~ 11–20

### 2.7.1. Pevné produkty

Mezi pevnými produkty jsou v největší míře zastoupeny sloučeniny s vysokým obsahem uhlíku ve formě popela, pyrolytického koksu a uhelných zbytků, většinou tvořených elementárním uhlíkem nebo vázaných s kyslíkem nebo vodíkem. Byť se uhelné zbytky mohou jevit jako nepoužitelné, není tomu tak. V procesu pyrolýzy hrají velmi významnou úlohu jako elementy vstupující do chemických reakcí, které buď přímo umožňují, nebo se jich účastní. Například pevné produkty pyrolyzované biomasy mohou mít spodní hladinu výhřevnosti okolo 32MJ/kg. [2,6,8,11]

V průmyslu mají pevné produkty následující využití:

- jako pevné palivo ve formě pelet nebo briket po smíchání s dalšími organickými látkami jako je dřevní štěpka, piliny, hobliny atd.
- jako suroviny pro syntézu aktivního uhlí a uhlíkových nanovláken
- jako vstupní materiál pro proces zplyňování k získání plynu bohatého na vodík [6,11]

### 2.7.2. Kapalné produkty

Kapalný produkt pyrolýzy znám jako pyrolýzní olej, nebo také bio olej je tekutina, některými vlastnostmi podobná dehtu, obsahující až 20 % vody, která je nežádoucí a je nutné ji extrahovat. Pyrolýzní, nebo též pyrolytický olej je komplexní uhlovodíková sloučenina tvořená převážně organickými i anorganickými sloučeninami. V případě pyrolýzy biomasy je kapalina nebo olejová frakce pyrolýzního oleje vysoce zoxidovaná a složitá, tmavo-hnědé až černé barvy. Je chemicky nestálá a její mísitelnost s konvenčními palivy je velmi nízká. Proto je nutné kapalné produkty zušlechtit snížením obsahu kyslíku a odstraněním usazenin a vody. Takto získaný a zpracovaný produkt je snadno transportovatelný a nenáročný na skladování, proto nemusí být použit v místě výroby a má v průmyslu mnohé využití. Složitost sloučeniny pochází z rozkladu různorodých primárních sloučenin obsažených ve výchozí surovině, přičemž, během pyrolýzy dochází k nekontrolovatelným rozkladům a slučováním převážně uhlovodíkových sloučenin. Kvalita produktu je přímo ovlivněna zvolenou pyrolýzní technologií, ale také vlastnostmi výchozích surovin. [2,6,7,11]

Zpracovaný kapalný produkt může mít v průmyslu například tato využití:

- jako palivo na spalování pro výrobu tepla, elektřiny, nebo kogenerační výrobu tepla a elektřiny
- výrobu chemikálií a pryskyřic
- konzervační látka pro konzervaci dřeva a jiných materiálů
- surovina pro výrobu bionafty po smíchání s motorovou naftou
- surovina pro výrobu lepidel [11]

### 2.7.3. Plynné produkty

Během procesu pyrolýzy se tvoří plyny zkapalnitelné a nezkapalnitelné. Zkapalnitelné kondenzují po ochlazení a podílí se na tvorbě kapalných produktů. Během primárního krakování dochází zpravidla k uvolňování plynů s nízkou molekulární hmotností jako jsou CO, CO<sub>2</sub>, methan, ethan a ethen. Tyto plyny jsou nazývány primárními plyny a jejich spalitelné

složky se vyznačují spodní hladinou výhřevnosti od 11 MJ/m<sup>3</sup>. [6] Sekundární plyny jsou takové nezkapalnitelné plyny, které se uvolňují během sekundárního krakování zpravidla jsou to oxidy síry, oxidy dusíku, vodík a acetylen se spodní hladinou výhřevnosti spalitelných složek od 20 MJ/m<sup>3</sup>. [5] Konečný nezkapalnitelný výtěžek, tedy pyrolýzní plyn je tvořen kombinací primárních a sekundárních plynů. [6,7,8,11]

Vedle jmenovaných povětšinou užitečných složek plynného výtěžku obsahuje pyrolýzní nebo též pyrolytický plyn také vedlejší složky jako amoniak, sirovodík, chlorovodík a fluorovodík. Po zásaditém praní pyrolýzního plynu k odstranění těchto škodlivin je pak k dispozici pyrolýzní plyn, který může mít dokonce kvalitu zemního plynu. [2]

Plyny produkované pyrolýzou se v průmyslu většinou užívají přímo jako palivo v mnoha energetických aplikacích, jedná-li se o spalitelné plyny, mohou mít tato využití:

- palivo pro přímé spalování
- v plynových turbínách /motorech pro výrobu elektřiny
- pro výrobu syntetického plynu (H<sub>2</sub> + CO) [11]

Pyrolýzní plyn je také vhodný pro výrobu vodíku a syntézu amoniaku. Vodík nabízí do budoucna perspektivní možnost nahrazení fosilních paliv s téměř neomezenou zásobou suroviny pro jeho syntézu, nebo výrobu. Touto surovinou je voda. Nicméně získávání vodíku je v současné době zatím velmi energeticky náročné. [7,11]

Pyrolýzní technologie však není pro získávání plynných produktů příliš výhodná. Mnohem výhodnější technologií je takzvané zplyňování, kdy se na plynný produkt přemění až 95 % výchozí suroviny. [7]



## 3. Pyrolýzní reaktory

Tato kapitola velmi úzce souvisí s kapitolou 2.5. a stejně tak s kapitolou 2.7., jelikož zvolený pyrolýzní postup rozhoduje vedle druhu, množství a složení vsázky o kvalitě a kvantitě vyskytujících se produktů. Pojmem pyrolýzní reaktor rozumíme zařízení na zpracování odpadu, biomasy atd. při použití principu pyrolýzního postupu. Obecně můžeme reaktory rozdělovat podle konstrukce a provozních podmínek, za kterých reaktor pracuje.

Podle konstrukce můžeme reaktory rozdělovat na: [2]

- vertikální (šachtové) reaktory
- horizontální reaktory
- reaktory s fluidním ložem [2]

U reaktorů patřících do skupiny „vertikální“ zajišťuje posuv vsázky tíhová síla, u „horizontálních“ je pohyb zajištěn mechanicky například rotačním bubnem, nebo šnekovým podavačem. Posuv vsázky v reaktorech s fluidním ložem je zajištěn pohybem plynu. Reaktory s fluidním ložem se v některých aspektech ukázaly být jako nejvýhodnější, a to zejména díky jednoduché konstrukci pece, odolnosti proti kolísání ve složení odpadu a krátké době ohřevu vsázky. Nicméně na úkor některých méně prospěšných vlastností, viz kapitola 3.3 [2,12,13]

Pyrolýzní technologie v dnešní době nabízí řešení, jak ekologicky nakládat s odpadem, nikoliv jako s konečným produktem, ale jako druhotnou surovinou. Proto je při jejich provozu dbáno na jejich soběstačnost z hlediska výroby paliva pro ohřev reaktoru. Aby pyrolýzní jednotka splňovala podmínky šetrnosti vůči životnímu prostředí, měla by splňovat tyto podmínky: [14]

- k ohřevu reaktoru používat výhradně paliva vzešlá z obnovitelných zdrojů
- pokud možno omezit závislost provozu na fosilních palivech
- šetrně nakládat s vodou, k chlazení používat dešťovou vodu
- zvážit krátkodobé i dlouhodobé účinky provozu zařízení na životní prostředí
- vytvářet větší množství výstupních produktů
- koncepční parametry omezit jen na takové množství přírodních zdrojů, které by nijak významně nezatížily okolní krajinu [14]

### 3.1. Vertikální (šachtové) reaktory

Tato technologie se pro pyrolýzu používá velmi zřídka z důvodu velmi pomalého přenosu tepla od stěny reaktoru na materiál. Jak už bylo zmíněno, pohyb vsázky je realizován primárně účinkem gravitační síly. Efektivní pyrolýza však vyžaduje, aby bylo teplotní působení na vsázku homogenní a v co možná nejkratší době. Proto jsou šachtové reaktory užívány spíše pro zplyňovací technologie, u nichž se do reaktoru přivádí vzduch nebo kyslík. V šachtových topeništích projde vsázka sušící zónou a několika reakčními zónami. Uvážíme-li fakt, že vsázka obvykle obsahuje velké množství vázané nebo volné vlhkosti, musí být zóna sušení poměrně velká, někdy větší než polovina celkové výšky reaktoru. [2,13]

Vertikální (šachtové) reaktory byly vyvinuty pro pyrolýzu odpadů v sedmdesátých letech minulého století. Konstrukce a funkce je velmi podobná vysokým pecím běžně užívaným

v hutním průmyslu. Pyrolyzovatelný vstupní materiál je do šachty dávkován spolu s koksem a vápencem, coby struskotvornou přísadou. Vháněním vzduchu, kyslíku nebo vzduchu obohaceného o kyslík předehřátého na zhruba 1000 °C se taví koks. Plyny, které vznikají při tavení koksu stoupají šachtou vzhůru a suší, ohřívají a termicky rozkládají vsázku. Koks, a také zbytky vsázky s vysokým obsahem uhlíku reagují s vháněným plynem a vyrábí se tak struska, popílek a plyn, který se spaluje v parním kotli. Tavenina vzniklá z příměsových prvků obsažených v koksu, jako jsou příměsi železa a jiných kovů, je odváděna do vodní lázně, kde probíhá takzvaná vitrifikace. [2,12]

Výhody vertikálních (šachtových) reaktorů jsou:

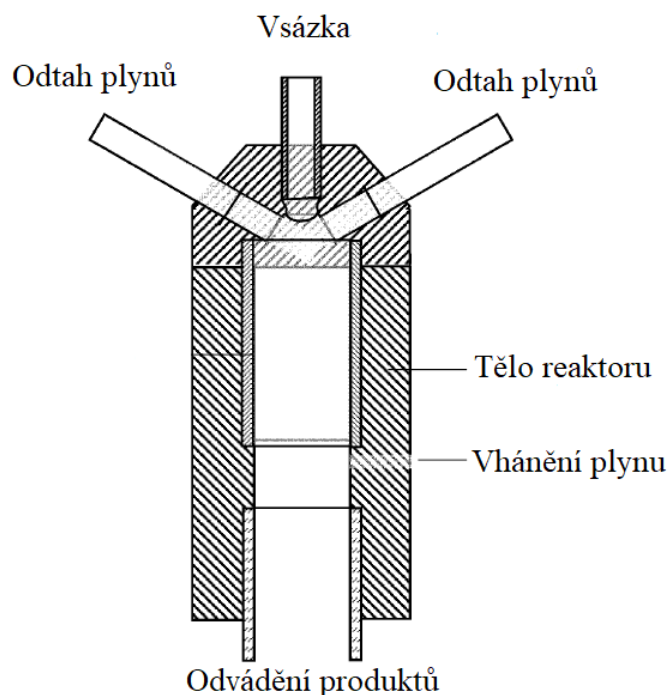
- jednoduchá konstrukce
- minimální požadavky na předúpravu vsázky [2]

Nevýhody vertikálních (šachtových) reaktorů jsou:

- dlouhá doba po kterou je vsázka v reaktoru
- malá kapacita reaktoru ve srovnání s velikostí zařízení
- pomalá odezva regulace teploty
- dlouhé náběhové a vyprazdňovací časy reaktoru [2]

Mezi vertikální reaktory patří také ty nejstarší, tedy milíře na výrobu dřevěného uhlí, viz kapitola 2.2. V současné době se dřevěné uhlí vyrábí v karbonizačních pecích a retortách. Rozdílem těchto dvou zařízení je, že karbonizační pece využívají část vsázky k produkci tepla, naproti tomu v retortách je teplo dodáváno zvenčí. Takto získané dřevěné uhlí se spíše, než pro energetické účely užívá v průmyslu například jako filtrační médium pro filtraci kapalin a plynů, nebo při procesech chemicko-tepelného zpracování oceli, jako je ku příkladu cementace, kdy je povrch oceli za pomoci dřevěného uhlí sycen uhlíkem. Jelikož je spalování části dřeva v karbonizačních pecích nedokonalé, je dřevěné uhlí vyráběné v retortách výrazně čistší [6,7]

Vertikální reaktory jsou provozovány především v Japonsku. V roce 2008 bylo na světě v provozu 21 zařízení a 3 ve výstavbě s kapacitou 100–450 t/den. [12] Jednoduché schéma šachtového reaktoru je na Obrázku 3.1. [6]



Obrázek 3.1 – Šachtový reaktor [6]

### 3.2. Reaktory s rotačním bubnem

Reaktory s rotačním bubnem jsou užívány převážně při nízko-teplotních pyrolýzních postupech a procesech zplyňování. Maximální teplotní rozsahy použití tohoto typu reaktoru se pohybují okolo 450–500 °C. Fakt, že jsou užívány pro nízkoteplotní postupy ovlivňuje některé výhody reaktoru. Především z hlediska životnosti jsou nízkoteplotní postupy zvláště příznivé, jelikož dochází k malému tepelnému ovlivnění stěn reaktoru a jejich korozi. Teplo je do vsázky většinou nepřímo přiváděno sáláním přes buben. Přívod tepla může však být realizován také kondukcí pomocí horkého plynu případně keramickými kuličkami. Vnější stěna reaktoru bývá zpravidla vyzděna šamotem. [2,12]

V reaktorech tohoto typu se mohou současně zpracovávat různé pyrolyzovatelné materiály. Reaktor je umístěn v horizontální poloze. Vsázka kontinuálně prochází bubnem, který se otáčí, zatímco probíhá proces pyrolýzy. Schématické znázornění takzvaného švelovacího bubnu využívajícího technologii rotačního bubnu je na Obrázku 3.2. [2]

Výhody reaktoru s rotačním bubnem jsou:

- krátká doba, po kterou je vsázka v reaktoru
- nutné jen hrubé rozdrcení před zavedením vsázky
- malá koroze stěn reaktoru
- malé tepelné ztráty [2,8]

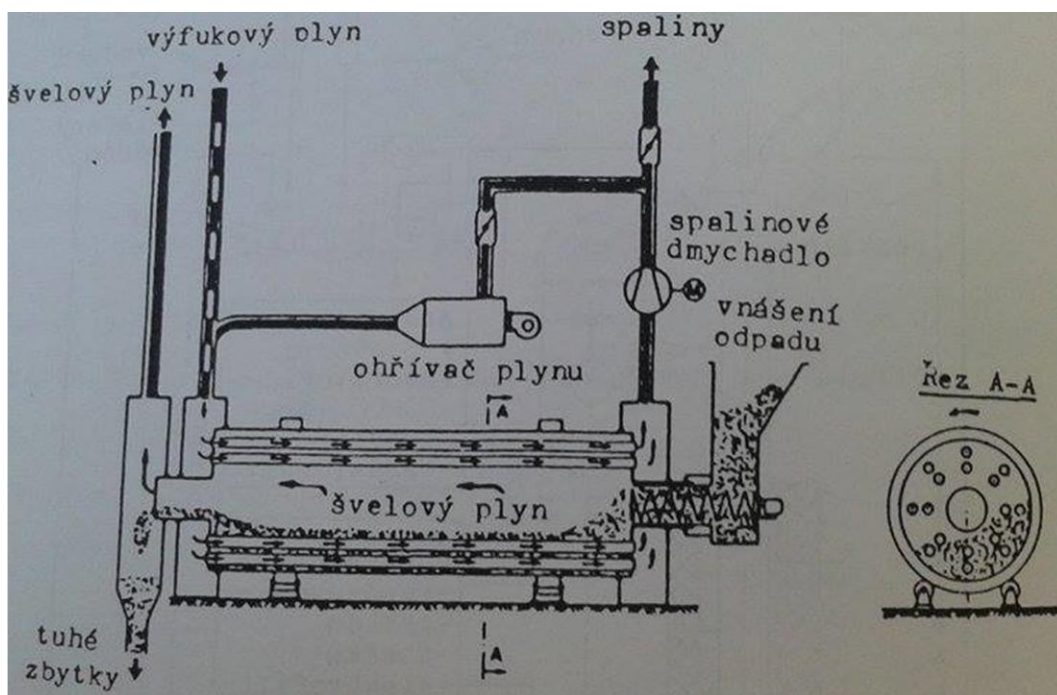
Nevýhody reaktoru s rotačním bubnem jsou:

- malý styk mezi plynem a tuhými látkami

- napětí ve stěně reaktoru vznikající nepravidelným stykem se zahřátými a dosud studenými částmi vsázky [2,8]

Během ohřívání vsázky se zpočátku uvolňují nevýhřevné plyny jako je  $\text{CO}_2$ , případně oxidy síry. Také se odlučuje vlhkost ve formě páry. Jelikož tyto plyny odcházejí poměrně rychle z reaktoru, neúčastní se dalších reakcí, jejichž výsledkem by byly z energetického hlediska hodnotnější plyny  $\text{CO}$  a  $\text{H}_2$ . Odtahovaný plyn navíc bývá znečištěn dehtem vznikajícím při pyrolýze, proto je nutné plyn vézt přes rozžhavené koksové lože, kde se dehet štěpí. Poté se plyny chladí a čistí v pračce, a nakonec mohou být buď odtahovány z reaktoru, nebo spáleny v plynovém hořáku. Některé technologie však využívají místo plynového hořáku plynový motor, který je spojen s generátorem. Hořením plynů, následným převodem tepelné energie na mechanickou a poté na elektrickou je zajištěna kogenerační výroba tepla a elektrické energie. [2,8,12]

Reaktory s rotačním bubnem se v zahraničí často používají k pyrolýze směsných komunálních odpadů, ale i průmyslových odpadů známých pod obchodními názvy jako technologie Kiener, BKMI Deutsche kommunal Anlagen a další. [12]



Obrázek 3.2 – Schéma švelovacího bubnu [2]

### 3.3. Reaktory s fluidním ložem

Reaktory s fluidní vrstvou pracují v tepelném rozmezí 400–900 °C, nejčastěji mezi 550–600 °C. Touto technologií lze zpravidla docílit vyváženého poměru pevného a kapalného produktu. Promíchávání materiálu se díky fluidnímu loži děje velmi rychle, a tak lze docílit homogenního rozdělení teploty ve vsázce. Stejně jako u reaktorů s rotačním bubnem je možný přívod tepla z vnějšku přes stěnu reaktoru. Přidáním aditiv a katalyzátorů lze vázat, nebo rozkládat některé škodlivé komponenty odtahovaného plynu. Technologie reaktoru s fluidní vrstvou, jak je také v některých literaturách nazývána, je vhodná pro odplyňovací a pyrolýzní

procesy tuhých, pastovitých i plyných odpadních látek. Jedná se většinou o kombinovanou technologii s přímým spalováním vyrobeného plynu. [2,12]

Výhody reaktoru s fluidní vrstvou jsou:

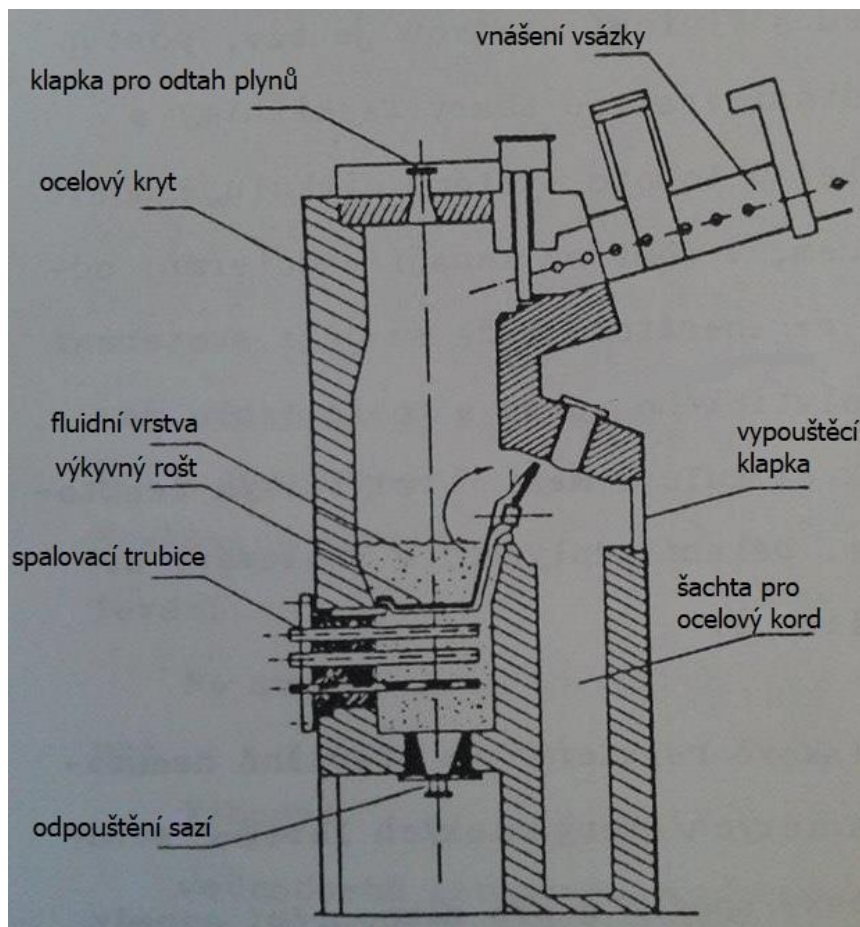
- relativně jednoduchá konstrukce pece
- umožňují zpracovávat odpady s různým složením vsázky
- doba setrvání vsázky v reaktoru je krátká [2,8,12]

Nevýhody reaktoru s rotačním bubnem jsou:

- vysoké požadavky na předúpravu vsázky
- v plynu bývá vysoký obsah popela
- nutná přesná regulace teploty, aby nedošlo k poškození fluidního lože [2,8]

Fluidní lože musí být vybaveno přídavným zařízením pro odvod sazí. To je většinou realizováno přepadem. Významnou nevýhodou jsou také vysoké nároky na předúpravu vsázky a to vytrídění těžkých složek, zejména však rozdrčení. Na Obrázku 3.3 [2], je zobrazen reaktor s fluidním ložem vyvinutý na univerzitě v Hamburku. [2,13]

Nejvíce užívaná je tato technologie v Japonsku, kde je typ reaktoru s fluidním ložem nasazen hned v několika provozech. Příkladem mohou být postupy známé jako technologie Ebara, Kobe Steel a Hitachi. [2,12]



Obrázek 3.3 – Reaktor s fluidním ložem pro pyrolýzu starých pneumatik a plastů [2]



### 3.4. Autoklávy

Autoklávy neboli uzavřené tlakové reaktory. Mohou být provedeny jako pyrolytické, tak i zplyňovací jednotky. U pyrolytické jednotky je ohřev vsázky realizován zavedením inertních spalin zvláštního vyvíječe tepla do reaktoru, což je označováno jako tzv. systém PPT. Vzhledem k velmi nízkému pohybu vzduchu v reaktoru je v uvolňovaných plynech malý obsah prachu a popela. [2]

Autoklávy se používají k pyrolýze organických i anorganických látek, kabelů, vodičových desek a pro nemocniční odpady. Z důvodu provozu po šaržích není možné během provozu upravovat vsázku. Autoklávy nejsou vhodné pro zpětné získávání tepla. [2]

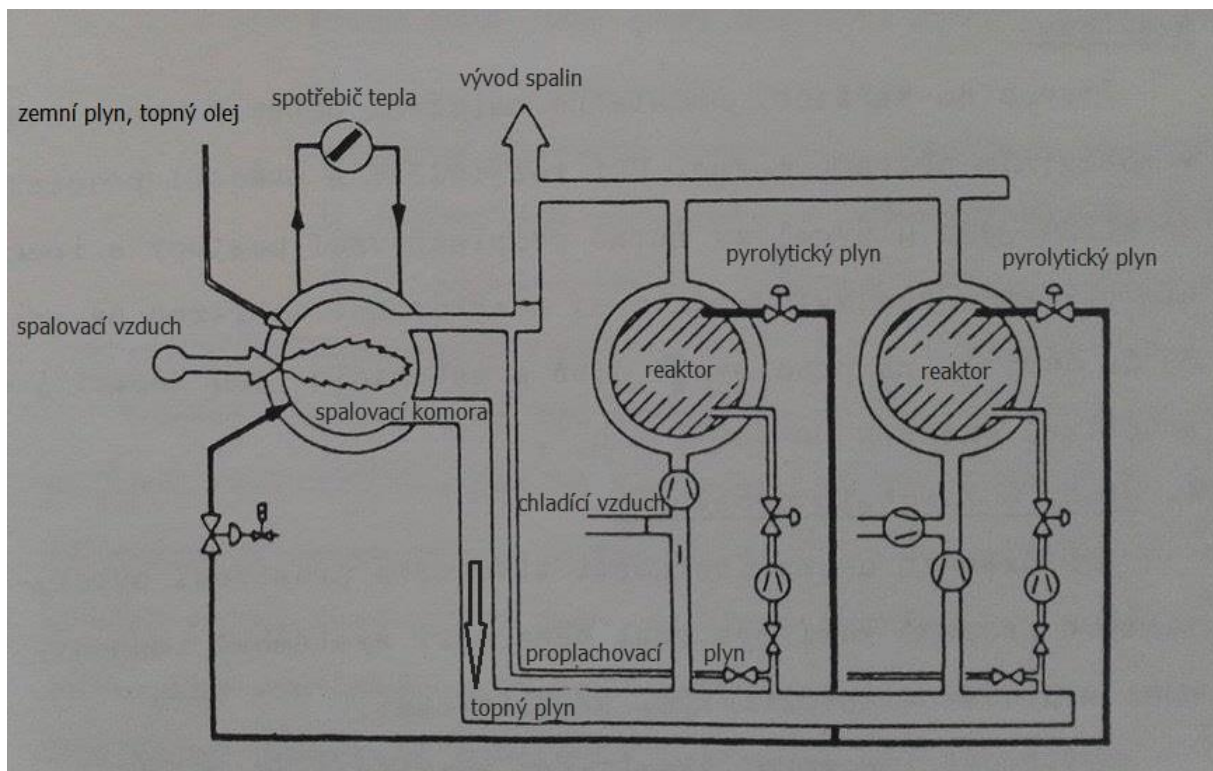
Výhody autoklávu jsou:

- jednoduchá konstrukce topeniště
- malý obsah prachu a popela v odtahovaných plynech [2]

Nevýhody autoklávu jsou:

- provoz po šaržích
- dodatečné úpravy vsázky nejsou během provozu možné
- nízká relativní kapacita vzhledem k době zpracování jedné šarže [2]

Autoklávy se ve světě příliš nepoužívají. Jejich nasazení je omezeno na malé výzkumné reaktory. Pyrolýzní proces v autoklávu zachycuje Obrázek 3.4. [2]



Obrázek 3.4 – Schéma pyrolýzního postupu PPT v autoklávu [2]

### 3.5. Retorta

Princip retorty je podobný jako u šachtové pece. Vsázka je vkládána do horní části zařízení průběžně, nebo pravidelně v intervalech. V horní části retorty je stejně jako u šachtové pece odebírán pyrolýzní plyn, který může být spalován a být tak zdrojem tepla, které je předáváno přes stěny retorty do reakční zóny, kde probíhá pyrolýza. Vnější plášť retorty bývá izolován, aby nedocházelo k nežádoucím únikům tepla do okolního prostředí. Samotný bývá vyráběn z korozivzdorného materiálu, aby byla maximalizovaná doba jeho životnosti.

Tato technologie je velmi nenáročná na obsluhu a údržbu, takže je velmi vhodná pro automatizování v celém rozsahu procesu. Využívá se především k výrobě dřevěného uhlí. [7,15]

### 3.6. Porovnání pyrolýzních reaktorů

Pyrolýzní technologie od svého vzniku procházejí mnohými změnami, většinou jde o zlepšení, ale nezdědky nové nápady končí jen na rýsovacím prkně, nebo jako koncepty. Od prvního pyrolýzního reaktoru, jestli je možné jej takto nazvat, kterým byl milíř na výrobu dřevěného uhlí se reaktory značně změnily. Každý typ reaktoru má svá specifika a liší se jak konstrukcí, tak principem funkce, což mu poskytuje některé výhody, ale i nevýhody. [2.7] Výběr některých pyrolýzních technologií fungujících ve světě je v Tabulce 3.1 [12].

V zahraničí jsou v současné době provozována mnohá zařízení na zpracování odpadu, mezi něž řadíme i ty pyrolýzní. Přestože od jejich prvního zkušební nasazení uběhlo již několik desítek let, tyto technologie jsou nadále poměrně drahé jak svými pořizovacími náklady, tak i těmi na provoz a údržbu. Proto mnohé země světa stále volí levnější varianty jako je skládkování a spalování odpadů, navzdory společenskému a mediálnímu tlaku. Nicméně jejich přínosy především v oblasti ekologického zpracování odpadu jsou nezanedbatelné.

Některé země světa tuto technologii využívají více než jiné jako například Německo, USA, nebo Japonsko [12], o kterém by se dalo s nadsázkou říci, že patří mezi „pyrolýzní velmoci“ vzhledem k počtu nasazených pyrolýzních jednotek v průmyslu a odpadovém hospodářství, ale také vzhledem k úsilí věnovanému jejich dalšímu vývoji a snaze začlenit je plnohodnotně do výrobního a zpracovatelského procesu. V Tabulce 3.1 a následně v textu jsou popsány některé pyrolýzní postupy užívané ve světě podle jejich průmyslových názvů.

Tabulka 3.1 – Některé pyrolýzní technologie [12]

Označení technologie	Typ reaktoru	Další informace	Druh odpadu	Produkt	Kapacita	Umístění
KWU proces Schwel-Brenn-Verfahren	rotační buben	nepřímý ohřev, až 700 °C	SKO*	energie	200 kg/h	Ulm, Wieblingen, Německo
Thermoselect	rotační buben	vnější ohřev	SKO*	energie	-**	Verbanie, Itálie
Mitsubishi	fluidní lože	nepřímý ohřev, až 500 °C	odpadní plasty	olej, plyn	100 kg/h	Tokio, Japonsko
Union carbide	extruder	nepřímý ohřev, zkušební provoz	-**	vosky	-**	USA
Voest Alpine	šachtový reaktor	přímý ohřev, 500–700 °C, zkušební provoz	vybrané druhy odpadů	plyn	65 kg/h	Linec, Rakousko
Waterloo University	-**	krátkodobá pyrolýza 500–700 °C, výzkumné zařízení	plasty	olej, plyn	-**	Waterloo, Kanada
West Virginia Univerzity	dvě fluidní jednotky, jedna oxidační	výzkumné zařízení	vybrané druhy odpadů	energie	-**	West Virginia Univerzity, USA
BASF postup	rotační buben	400 °C, zkušební provoz	vybrané druhy odpadu	pyrolýzní olej, plyn	1700 kg/h	Ludwigshafen, Německo
Hamburg university	fluidní lože	600–900 °C, nepřímý ohřev	odpadní plasty	pyrolýzní olej, plyn, saze	až 500 kg/h	Univerzita Hamburg, Ebenhausen Ingolstadt, Německo
DAL	rotační buben	-**	SKO*, pneumatiky, drcené kabely	pyrolýzní plyn, energie	2000 kg/h	Plaidt, Německo
MVU	rotační buben	Experimentální reaktor	odpadní plasty, pneumatiky, kabely	-**	200 kg/h	-**
Destrugas	šachtový reaktor	až 900 °C	SKO*	pyrolýzní plyn, energie	250 kg/h	Kalundborg, Dánsko
VŠB – TU Pyromatic	šneková retorta	výzkumné zařízení	plasty, pneumatiky	pyrolýzní plyn, olej, koks, energie	100 kg/h	Ostrava, ČR



Poznámka k Tabulce 3.1:

\* směsný komunální odpad

\*\* informace není k dispozici

### **KWU – Siemens Schwel-Brenn-Verfahren**

Technologie KWU je zkušební zařízení vyvinuté firmou Siemens v Německu o kapacitě 200 kg/h. Vsázkou je směsný komunální odpad. Motivací pro výzkum tohoto zařízení bylo získávání syntetického plynu, viz. kapitola 2.7.3., který je následně spalován spalovacím motorem pohánějícím generátor elektrické energie, nebo k výrobě tepla. Pro použití této technologie je nutná předúprava vsázky a to rozdrcením. Poté se dopravuje šnekovým dopravníkem do rotační pece, která je nepřímo ohřívána přes stěnu reaktoru. Šnekový dopravník plní jednak transportní funkci, ale také zabraňuje kontaktu vzduchu z atmosféry s reakční zónou. [8,12]

Ohřev vsázky v rotační peci zajišťují trubky plnicí funkci výměníku tepla. Pevný výstupní produkt je nutné třídít. Obsahuje totiž spolu s pyrolýzním koksem také nepyrolyzovatelné látky jako je sklo, kovy, kameny a další. Pyrolýzní koks se rozemílá na jemný prášek a společně s pyrolýzním plynem se spaluje ve spalovacím motoru nebo spalovací komoře. Při spalování se dosahuje teploty až 1300 °C, přičemž se tavitelné složky pyrolýzního koksu roztaví. Tavenina se vnaší do vodní lázně. Spaliny je nutné upravit tzv. čištěním spalin, aby bylo možné je vypustit do atmosféry. [12]

V roce 1994 bylo uvedeno do provozu první komerční zařízení tohoto typu na žádost německého svazu pro nakládání s odpady. Přičemž testovací jednotka byla uvedena do provozu již v roce 1988. [16] Kvůli mnohým problémům ve zkušební době převážně se zpracováním tuhých zbytků byl provoz komerčního zařízení pozastaven. [8,12]

### **Thermoselect**

Proces Thermoselect je založený na reaktoru s rotačním bubnem s vnějším ohřevem. Vsázka směsného komunálního odpadu se před vnašením do reaktoru slisuje. Tento postup kombinuje pyrolýzu a zplyňování. Vsázka se nejprve v první části reaktoru ohřeje a pyrolyzuje, poté ve druhé části reaktoru zplyňují při teplotě až 1200 °C. Produktem je syntetický plyn a některé další plyny jako CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, oxidy síry a oxidy dusíku. Pyrolýzní plyn je vícestupňově čištěn, přičemž jeho část je používána na ohřev reaktoru. S ohledem na mnohé problémy se správnou funkcí zařízení využívající postup Thermoselect bylo mnoho připravovaných projektů zastaveno, nebo odstaveno. [12]

### **Mitsubishi**

Pyrolýzní postup pod názvem Mitsubishi je provozován v zařízení například v Tokiu. Tento postup byl navržen firmou Mitsubishi jako reakce na zvětšující se procentuální zastoupení plastů v odpadu. Vsázkou je rozdrcený třízený plastový odpad. Pyrolýzní proces probíhá v pískovém fluidním loži o celkové kapacitě až 100 kg/h. Speciálně upraveným pyrolýzním postupem je v tomto zařízení dokonce možné získávat z některých polymerů například z polystyrenu, nebo polymetakrylátu monomery. [12]

## Hamburg University

Pyrolýzní postup Hamburg University, jak už název napovídá byl navržen na Hamburské univerzitě, konkrétně na institutu anorganické a použité chemie. Byl zde testován jako možný postup pro pyrolýzu plastů. Jednalo se o reaktor s fluidním pískovým ložem pracujícím při teplotě 650–850 °C. Jako dávkovací systém drčených plastů sloužila kombinace dávkovacího podavače a vodou chlazeného šneku. [12]

Reaktor tvořily tři prstence o průměru 500 mm. V prostředním prstenci byl napojen na přírubě dávkovací systém. Ohřev byl realizován za pomoci hořáku vespod a nahoře dávkovacího šneku. Vyrobený pyrolýzní plyn byl odtahován z reaktoru, čištěn v cyklonu a následně ochlazen na 30–80 °C. Propíráním získávaných plynů v pyrolýzním oleji se z kondenzované uhlovodíky rozpouštěly. Zkapalnitelné složky produktu byly shromažďovány ve frakční nádobě. Pyrolýzní plyn byl stlačován na tlak 2–3 bary a skladován v tlakové nádobě. Přebytečný plyn byl spalován k ohřevu reaktoru. Výhřevnost plynu byla až 45 MJ/m<sup>3</sup> díky vysokému obsahu vodíku. [12]

## MVU

Pyrolýzní postup známý pod názvem MVU byl vyvinut pro výrobu produktů uplatnitelných na trhu. Především pyrolýzní olej v závislosti na charakteru odpadu a recyklované neželezné kovy, především měď. Jako surovina pro vsázku byl použit plastový odpad, pneumatiky, staré kabely, nebo kyselinové pryskyřice z regenerace olejů, nebo kombinace. Pro tyto odpady je společný vysoký podíl organických látek. [8,12]

Technologie MVU využívá principu reaktoru s vně ohříváním rotačním bubnem s ohledem na již zmíněný druh odpadu, pro který je tento typ reaktoru nejvýhodnější. Teplota v reaktoru dosahuje hranice až 650 °C, což klade vysoké nároky především pro volbu konstrukčního materiálu a výroba reaktoru pro tuto technologii je tedy velmi drahá. Celková kapacita reaktoru může být až 200 kg/h, přičemž vsázka se dávkuje přes uzávěr dávkovacím šnekovým podavačem do rotačního bubnu pyrolýzního reaktoru. Pevné nepyrolyzovatelné zbytky, jako kovy, nečistoty, a spaliny jsou přes přepad vedeny do vodní kapsy. Pyrolýzní produkty se systémem tlakových nádob a kompresorů umístěných za rotačním bubnem reaktoru separují a odvádí k dalšímu zpracování. Například pyrolýzní plyn je po výstupu z reaktoru veden do rotační pračky, následně ochlazen na cca 50 °C, přičemž saze a některé uhlovodíky, které mají teplotu varu výrazně výše než teplota, na kterou byl pyrolýzní plyn ochlazován, se usazují na dně pračky. Zbytkové teplo, které nese pyrolýzní plyn je užíváno k ohřevu reaktoru. Toho je realizováno průchodem plynu přes výměník, kde dochází při ochlazení k dalšímu kondenzování některých uhlovodíků. Takto získaný surový plyn je následně ještě čištěn ve vodní a alkalické lázni a propírán pyrolýzním olejem. Stejně jako u většiny ostatních technologií je čistý pyrolýzní plyn užíván k ohřevu reaktoru. Voda, která se používá k čištění pyrolýzních produktů se filtruje a destiluje, aby byla zbavena škodlivin. [8,12,14]

## Destrugas

Zařízení využívající postup Destrugas instalovala již v roce 1971 Dánská firma Pollution Control Ltd. v Kalundborgu. Kapacita zařízení byla 250 kg/h směsného komunálního odpadu. Toto zařízení užívalo princip šachtové pece. [12]

Odpad byl nejprve rozdrčen a dopravníkem podáván do reaktoru. Šachtová pec byla tvořena pravoúhlu, keramickou vyloženou rourou eliptického průřezu. V místě vnášení vsázky, tedy na vrcholu pece byl reaktor chráněn proti atmosférickému vzduchu vrstvou odpadu. Doba zdržení v reaktoru byla 24 hodin. Teplota ve spodní části reakčního prostoru byla až 900 °C. Pyrolýzní plyn jakožto produkt byl po procesu čištění a praní používán k ohřevu reaktoru. [12]

### **Kobe Steel**

Dalo by se říci, že Japonsko zaujímá prvenství, co se týče vývoje a využívání pyrolýzních technologií a mohlo by mnohým zemím sloužit za příklad v oblasti ekologického nakládání s odpady. Technologie známá jako Kobe Steel byla poprvé testována stejnojmennou firmou právě v Japonsku. Jedná se o zařízení na pyrolýzu pneumatik o kapacitě 200 kg/h. Pneumatiky se nejprve drtí na průměrnou velikost 30 mm a následně jsou šnekovým podavačem dávkovány trojnásobným klapkovým uzávěrem do reaktoru s fluidním ložem s vnějším ohřevem. Speciální atmosféra je v reaktoru vytvářena dusíkem. Doba zdržení vsázky je 20 minut při teplotě až 800 °C. Tato technologie se oproti ostatním, které umožňují pyrolýzu pneumatik vyznačuje přítomností speciálního seškrabovacího zařízení, kterým bylo nalezeno jednoduché, ale účinné řešení zásadního problému napékání sazí. Saze se totiž tvoří ve velké míře právě při pyrolýze pneumatik. K odvádění pevných produktů do zásobníku slouží vodou chlazený šnekový podavač a přepadové zařízení. V další části zařízení při 80 °C kondenzují některé uhlovodíky. Později během chlazení kondenzují také nízkovroucí uhlovodíky. Plynné produkty se stejně jako u jiných technologií nejprve čistí k oddělení sazí a některých nežádoucích příměsí a poté se prohánějí pyrolýzním olejem. Čistý plyn je spalován a teplo použito k ohřevu reaktoru. [8,12]

### **Proces Ebara**

Další z Japonských pyrolýzních technologií je proces pod názvem Ebara, který je současně nejčastěji aplikovanou pyrolýzní technologií v této ekonomicky a hospodářsky velmi vyspělé zemi. V roce 2008 bylo v Japonsku v provozu devět zařízení s celkovým součtem šestnácti pyrolýzních jednotek na komunální odpad a čtyřmi jednotkami na různé druhy odpadů. První zařízení bylo uvedeno do provozu v roce 2000. [12,14]

Proces Ebara, někdy označovaný též jako TwinRec, je kombinací dvou starších, ale osvědčených technologií. Jedná se o spojení technologie s fluidní vrstvou s vnitřní cirkulací a technologií tavení popílku označovanou (Meltox). Vsázkový odpad je nejprve hrubě rozdrčen a podavačem zanesen do fluidního pískového lože, kde je pyrolýzován při teplotě 500–600 °C. Kameny, kovy a ostatní nepyrolyzovatelné těžké zbytky propadávají účinkem tíhové síly a jsou společně s pískem fluidního lože odváděny z reaktoru. Díky relativně nízké pyrolýzní teplotě lze získávat poměrně velké množství kovů z odpadu v pevném skupenství, což je výhodné pro jejich třídění a další využití. Jedná se zde především o výtěžek hliníku, který bývá v odpadu zpravidla hojně zastoupený. Následně je písek regenerován a zbaven kamenů a kovů a vrací se zpět do fluidního lože. Pyrolýzou získaný nízkovýhřevný pyrolýzní plyn je stejně jako u ostatních technologií s fluidním ložem odváděn z reaktorového prostoru, čištěn v pračkách a poté je za vysokých teplot spalován ve spalovací komoře. Po pyrolýzním procesu ve fluidním loži následuje oddělení popílku v cyklonové komoře, kde se popílek zachytí na stěnách, taví a je unášen jako tekutá struska do spodní části reaktoru a do vodního uzávěru, kde dochází k jeho

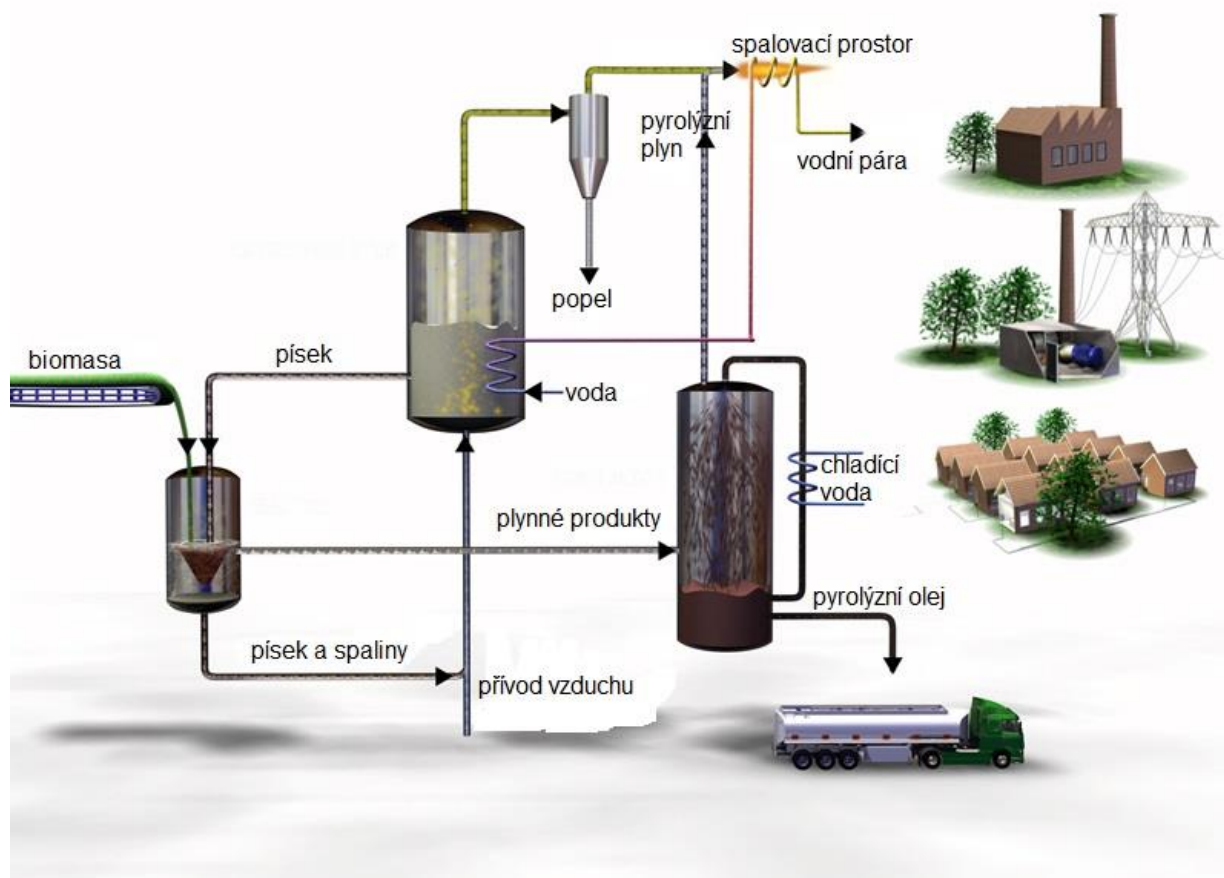
vitrifikaci ve vodní lázni. Při tomto procesu se část vody odpařuje. Pára je pak přes systém kompresorů a separátorů hnána na malou turbínu, která slouží k výrobě elektrické energie. [12]

### Proces BTG

Jedním z mnoha dalších příkladů pyrolýzních technologií ve světě je pyrolýzní technologie společnosti Biomass Technology Group. Tato technologie využívá principu rychlé pyrolýzy a snaží se o co možná největší výtěžek pyrolýzního oleje z biomasy, tzv. bio-oleje. Touto technologií je možné vsázku, kterou může být dřevní štěpka, dřevo, sláma, kompost, energetické plodiny, drůbeží trus a podobné produkty zemědělského průmyslu s vysokým obsahem organických látek, přeměňovat na 60–75 % bio-oleje. [8,16] Schéma tohoto zařízení je na Obrázku 3.5. [16]

Samotný reaktor je modifikací reaktoru s pískovým fluidním ložem a rotačního reaktoru. Byl vyvinut Univerzitou v Twente. Ohřev vsázky probíhá metodou přímého vyměňování tepla pomocí horkého písku jako teplosměnného média. [8,16]

V Holandsku jsou provozovány dvě pilotní jednotky o kapacitě biomasy 2–3 kg/h a 200 kg/h. Menší ze dvou těchto jednotek je využíváno jen pro výzkumné účely a měření kvalitativního a kvantitativního složení produktů z jednotlivých druhů, či kombinací vsázky. Větší z těchto jednotek slouží k porovnání teoretických výpočtů a laboratorních výsledků získaných měřeními na menší jednotce se skutečnými dosahovanými výsledky během pyrolýzy. [16]



Obrázek 3.5 – Schéma pyrolýzního zařízení BTG [16]

## Proces ENSYN

Tuto technologii uvedla do provozu stejnojmenná kanadská firma. V roce 2012 měla registrováno šest zařízení převážně na zpracování biomasy. K jejímu zpracování používá fluidní reaktory pracující na principu rychlé pyrolýzy. Jako vsázka se používají podobné odpady a materiály jako u technologie BTG. [8]

Největší zařízení disponuje kapacitou 200 kg/den biomasy. Nachází se v Renfrewu ve Skotsku. Touto technologií lze dokonce vyrábět syntetické kouřové aroma v kapalném skupenství, které se přidává například do uzenin. [8]

### 3.7. Pyrolýzní zařízení v ČR

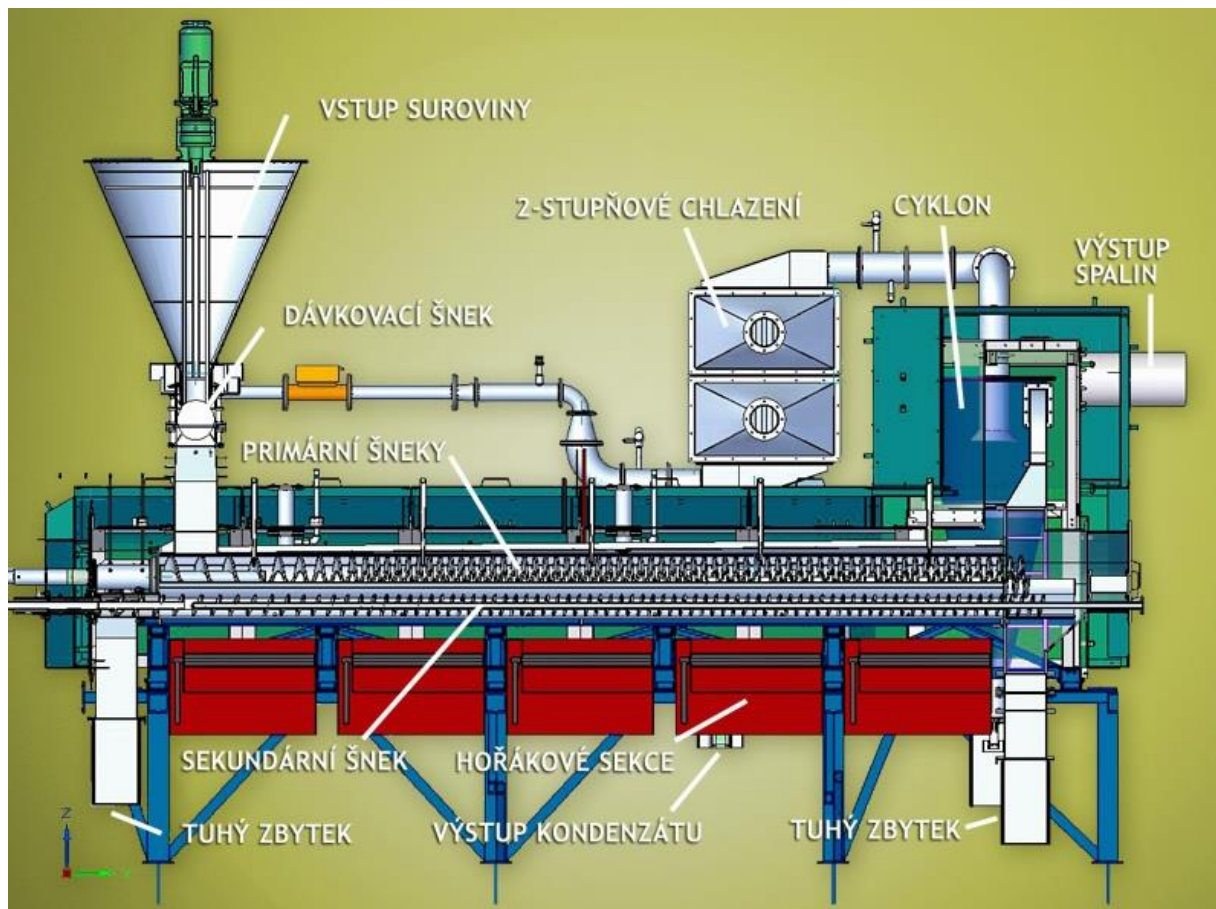
Přestože, v České republice je pyrolýza zatím jen málo využívanou technologií na termické zpracování odpadů, je nutné podotknout, že není úplně neznámou. Některé veřejné i státní organizace se této problematice věnují již řadu let. Na akademické půdě především Vysoké školy chemicko technologické, Ústavu chemických procesů akademie věd ČR a Výzkumném ústavu zemědělské techniky jsou pyrolýzní technologie zkoumány, rovněž je zkoumán jejich potenciál a zařazení do odpadového hospodářství. Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování se věnuje osvětové činnosti v oblasti termického zpracování odpadů pyrolýzou a zplyňováním a snaží se přispět k rozšíření jejich aplikace pro energetické využití odpadu a biomasy. [17]

#### 3.7.1. Pyromatic

Výzkumné pyrolýzní zařízení Pyromatic umístěné na Vysoké škole báňské v Ostravě je zaměřeno na produkci alternativních zdrojů energie z odpadu jako jsou pneumatiky, tříděné minerální oleje, tříděný komunální odpad, odpadní kaly (z žump, septiků a čističek odpadních vod) a nebezpečné odpadní kaly (z čističek odpadních vod, dna nádrží na ropné produkty, barev a laků, brusné kaly). [8]

Postup Pyromatic využívá 4 m dlouhého vně ohřívaného reaktoru s rotačním šnekovou retortou vyrobeného z velmi drahé austenitické žáruvzdorné oceli, která odolá teplotám až 1100 °C. Ohřev je realizován pomocí pěti hořákových sekcí, z nichž některé je možné dočasně odstavovat, podle požadavků na tepelný příkon do reaktoru. Například uhlí bylo během pokusů ohříváno třemi hořákovými sekcemi a dohříváno čtvrtou a pátou sekcí, naopak během pyrolýzy polyetyleny nebyly naplno využity ani tři hořákové sekce. Teplota v reaktoru je měřena termočlánky. V pravidelných časových intervalech je také měřeno složení spalovaného plynu i jeho spotřeba. Vsázka je do reaktoru dopravována pásovým dopravníkem přes násypku a dvěma šnekovými podavači je zajištěn posuv vsázky v reaktoru a rovnoměrný ohřev. Násypka plní také funkci zásobníku. Přístup kyslíku do reaktoru je omezený, avšak je nutné zbytkový kyslík vytěšňovat pomocí inertního plynu. Pyrolýzní plyn je z reaktoru odtahován a přiváděn do tzv. cyklónu, kde je ochlazován vzduchovým a vodním chladičem. Po praní a očištění je plyn využíván k ohřevu vsázky, nebo uskladněn v plynojemu. Pomocí infračerveného spektrometru se měří kvalitativní složení plynu. K zachycení pevného produktu slouží speciální nádoba ve spodní části reaktoru. Přepad do této nádoby je vzduchotěsně uzavíratelný, aby při vyprazdňování nádoby nedošlo k přísátí vzduchu do reaktoru. [8,9]

Provoz tohoto zařízení je kontinuální. Výhodou zařízení je možnost plně automatizovaného provozu. Zařízení využívající tuto technologii je schopné zpracovávat až 500 kg/h třízeného komunálního odpadu. [8]



Obrázek 3.6 – Schéma pyrolýzního zařízení [18]

## 4. Analýza složení paliva získaného pyrolýzou

V závislosti na charakteru složení pyrolýzní vsázky vzniká celá řada produktů pyrolýzy. Některé z nich jsou určeny k okamžitému zpracování a použití, jiné vyžadují složité procesy úpravy a některé jsou nevyužitelné, nebo zatím neznáme způsob, jak je využít, viz kapitola 2.7.

Nejperspektivnější surovinou pro možnosti aplikace pyrolýzních technologií s energetickým potenciálem je biomasa a komunální odpad. Z hlediska energetického využití produktů pyrolýzy jsou nejzajímavější produkty kapalné a plynné. Například při pyrolýze biomasy tvoří kapalné produkty téměř většinu produktů. V současné době převládá snaha o získání co možná největšího procentuálního zastoupení plynných a kapalných pyrolýzních produktů ve výtěžku. Nicméně i tuhá pyrolýzní paliva mají využití. [19]

Běžný tuhý pyrolýzní zbytek například při pomalé pyrolýze se vyznačuje malou výhřevností, protože mimo spalitelné uhlíkaté složky (80–85 %), obsahuje spoustu nečistot a popel (0–2 %), jako je tomu například při pyrolýze komunálních odpadů. [6,7]

Kapalné produkty pyrolýzy, pyrolýzní oleje, nebo také bio-oleje se svými vlastnostmi navzájem také velmi liší, podle druhu pyrolýzní technologie a vsázky. Vlastnosti a chemické složení pyrolýzních olejů jako produktů pyrolýzy biomasy některých technologií ve srovnání s běžně užívanými palivy udává Tabulka 4.1. [7,20,21,22]

Tabulka 4.1 – Vlastnosti olejů získaných pyrolýzou a některých běžně užívaných paliv [7,20,21,22]

	BTG	Ensyn	pomalá pyrolýza	meřo*	lehký topný olej	motorová nafta
vlhkost (%)	18,6	26,4	14,6	-	0,1	0,7
pH	2,7	2,8	-	-	-	-
hustota (kg/dm <sup>3</sup> )	1,3	1,2	1,2	0,9	0,9	0,8
C (%)	54,8	59,6	61,9	77,2	85	85,9
H (%)	6,6	6,0	6,0	12,0	11	13,3
N (%)	0,4	0,3	1,1	-	0,3	0,3
S (%)	0,1	-	0,03	<0,1	<2,0	0,3
popel (%)	0,0	-	1,5	-	0,1	-
O (%)	38,3	33,8	29,5	10,8	1	-
výhřevnost MJ/kg	16,6	16,8	-	34,0	40,0	41,9
viskozita (mm <sup>2</sup> /s) při 40 °C	105,7	175,6	300,0	4,0	3,2 - 18	7,5

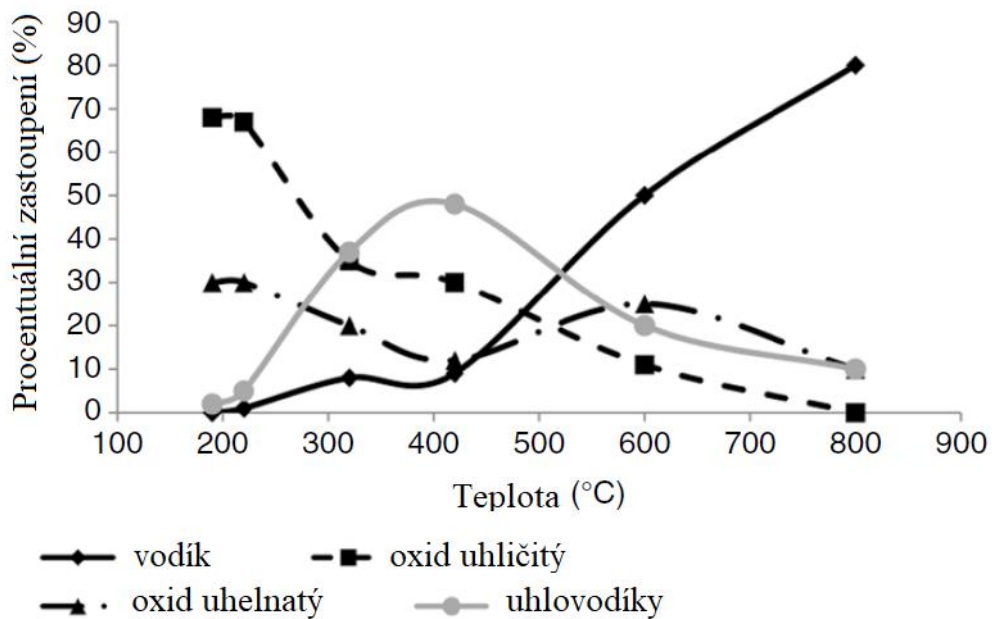
Poznámka k tabulce:

\* methyl-ester řepkového oleje

- informace není k dispozici

Jak už bylo zmíněno v předcházejících kapitolách, pyrolýzní plyn je možné po vyčištění použít jako palivo pro ohřev vsázky pyrolýzního reaktoru, nebo je možné jej vézt na kogenerační jednotku a prostřednictvím energie uvolňované během jeho spalování vyrábět elektrickou energii, viz Obrázek 3.5. Pyrolýzní plyny jsou nejspíše využitelné a nejméně

náročné produkty pyrolýzy co se týče procesů, které musí předcházet jejich použití, jako například několika stupňové čištění a praní. [19] Závislost množství uvolňovaných plynů na teplotě zachycuje Obrázek 4.1. [6]



Obrázek 4.1 – Závislost složení uvolňovaného plynu na teplotě [6]

\* graf platí pro pyrolýzu biomasy

Největší využitelnost mají pyrolýzní plyny jako palivo pro přímé spalování, a proto se při hodnocení jejich kvality uvažuje nejčastěji jejich výhřevnost, spalné teplo a emise, nejčastěji emise oxidů síry a oxidů dusíku. [7,19]

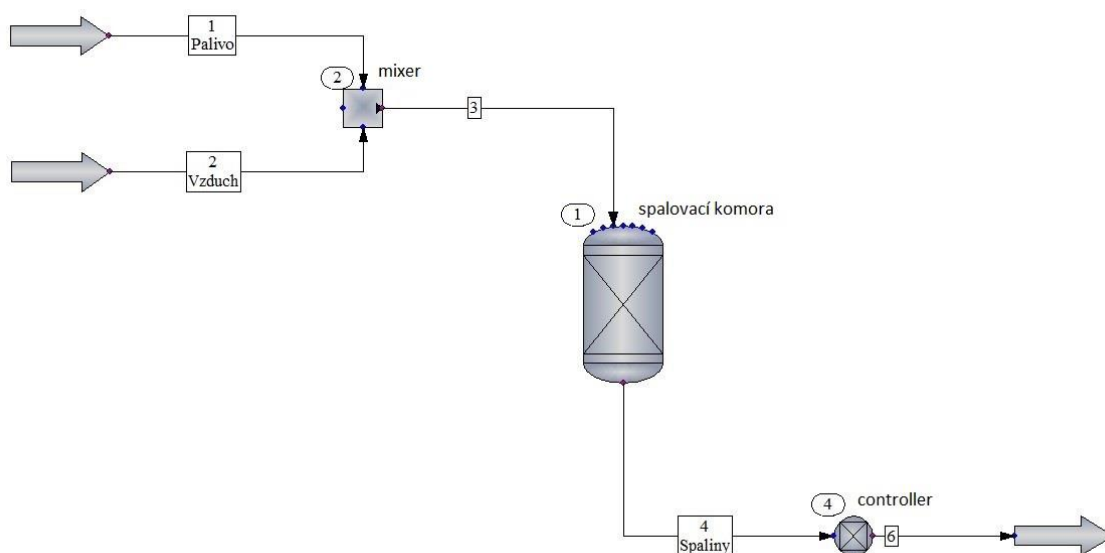


## 5. Energetická bilance pro paliva získaná pyrolýzní jednotkou

Pro výpočet energetických vlastností vybraných paliv byl zvolen program Chemcad 7 [23], v němž bylo nejen možné sestavit zjednodušený model spalovací komory, libovolně měnit palivo na základě zastoupení jednotlivých prvků ve směsi vstupující do reaktoru, ale i zjistit energetické vlastnosti těchto paliv. Program jako takový je schopen pracovat s mnoha matematicko-fyzikálními výpočty na základě nichž je možné simulovat chemické reakce, spalovací procesy a mnohé další.

### 5.1. Popis simulačního modelu

Na Obrázku 5.1 je simulační model spalovacího zařízení v prostředí pracovní plochy softwaru Chemcad 7 [23], v němž probíhaly veškeré simulace. Sestává ze dvou vstupujících složek na Obrázku 5.1 označených v obdélníku čísly 1 a 2, slučovacího zařízení, v tomto programu označovaného jako „mixer“, spalovací komory a vývodem spalin, jehož součástí je také řídicí jednotka tzv. „controller“, který reguluje množství vzduchu tak, aby oxidační reakce vykazovaly malý přebytek kyslíku (3%). Tento přebytek je controllerem měřený v proudu spalin (označen v obdélníku číslem 4). Jako médium pro oxidační reakce probíhající během spalování paliva byl použit vzduch ve složení 21 % kyslíku a 79 % dusíku. Všechna ostatní stopová množství dalších plynů ve vzduchu byla pro zjednodušení modelu zanedbána s přihlédnutím k faktu, že by na výsledky simulace měla jen malý vliv. V modelu bylo použito rovnovážného reaktoru pracujícího s adiabatickým spalováním. Všechny tepelné ztráty byly v tomto modelu tedy zanedbány a všechny složky směsi vstupující do reaktoru zreagovaly.



Obrázek 5.1 – schéma simulačního modelu

Mezi energeticky nejzajímavější veličiny, podle kterých je možné posuzovat účinnost paliv je výhřevnost a spalné teplo. Spalné teplo je definováno jako množství tepla, které lze získat dokonalým spálením určitého množství paliva se vzduchem tak, že tlak  $p_1$ , při kterém probíhá

reakce zůstává konstantní a všechny produkty spalování jsou vráceny při stejné určité teplotě  $t_1$  jakou měly reaktanty a všechny tyto produkty jsou v plynném stavu s výjimkou vody, která vzniká při spalování, a která zkondenzuje do kapalného stavu při teplotě  $t_1$ . Výhřevnost je definována jako množství tepla, které lze získat dokonalým spálením určitého množství plynu se vzduchem tak, že tlak  $p_1$ , při kterém probíhá reakce zůstává konstantní a všechny produkty spalování jsou vráceny při stejné teplotě  $t_1$  jakou měly reaktanty, všechny tyto produkty jsou v plynném stavu. Proto je hodnota spalného tepla vždy větší nebo rovna hodnotě výhřevnosti. Rovnost nastává, když spalováním nevzniká voda. Výhřevnost je v některých literaturách označována také jako LHV neboli lower heating value, v překladu spodní hodnota výhřevnosti. Také bývá označována jako inferior calorific value, v doslovném překladu spodní energetická hodnota. [24,25]

K bilanci byl pro porovnání vlastností zvolen zemní plyn, bioplyn, generátorový plyn a pyrolýzní plyn z pyrolýzy biomasy. Složení zemního plynu udává Tabulka 5.1 [26], přičemž síra nebyla do výpočtů zahrnuta a její molární zastoupení bylo pro výpočet rozděleno do ostatních komponent, stejně tak pro vyšší uhlovodíkové řetězce označené  $C_{6+}$ . Chemické složení bioplynu udává Tabulka 5.2 [27]. Sulfan nebyl do výpočtu zahrnut. Chemické složení generátorového plynu je v Tabulce 5.3 [28]. Vyšší uhlovodíkové řetězce označené  $C_nH_m$  byly v bilančním modelu připočteny k metanu ( $CH_4$ ). Chemické složení pyrolýzního plynu jako produktu pyrolýzy dřevěné štěpky z borového dřeva udává Tabulka 5.4. [7] Pro všechna paliva byl v simulaci nastaven průtok  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Tabulka 5.1 – chemické složení zemního plynu [26]

složka	jednotka	zastoupení
$CH_4$	[mol %]	96,339
$C_2H_6$	[mol %]	2,224
$C_3H_8$	[mol %]	0,377
iso-butan	[mol %]	0,067
n-butan	[mol %]	0,058
iso-pentan	[mol %]	0,011
n-pentan	[mol %]	0,009
$C_{6+}$	[mol %]	0,013
$CO_2$	[mol %]	0,300
$N_2$	[mol %]	0,603
$C_6H_{14}$	[mol %]	0,012
celková síra	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 1

Tabulka 5.2 – chemické složení bioplynu ze skládky odpadů [27]

složka	jednotka	zastoupení
$CO_2$	[mol %]	46
$CH_4$	[mol %]	49
$O_2$	[mol %]	3
CO	[mol %]	1
$H_2$	[mol %]	1
$H_2S$	mg/m <sup>3</sup>	35

Poznámka k Tabulce 5.2: zdroj uvádí při 15 °C výhřevnost 16,9 MJ/m<sup>3</sup>

Tabulka 5.3 – chemické složení generátorového plynu z černého uhlí [28]

složka	jednotka	zastoupení
CO <sub>2</sub>	[mol %]	3,5
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	[mol %]	0,2
O <sub>2</sub>	[mol %]	0,1
CO	[mol %]	27
H <sub>2</sub>	[mol %]	12,5
CH <sub>4</sub>	[mol %]	2,7
N <sub>2</sub>	[mol %]	54

Poznámka k Tabulce 5.3: zdroj uvádí při 20 °C výhřevnost 6,5 MJ/m<sup>3</sup>

Tabulka 5.4 – chemické složení pyrolýzního plynu z pyrolýzy biomasy borového dřeva [7]

složka	jednotka	zastoupení
CH <sub>4</sub>	[mol %]	8,8
H <sub>2</sub>	[mol %]	0,1
CO	[mol %]	41,2
CO <sub>2</sub>	[mol %]	49,9

## 5.2. Výsledky

Ne všechny složky paliva se účastní hoření. Pro výpočet výhřevnosti v MJ/m<sup>3</sup> byly zahrnuty jen ty, které se hoření účastní. Jelikož norma neudává relativní výhřevnost některých sloučenin ve všech konfiguracích, byla použita výhřevnost, která je známa pro stejnou sloučeninu v jiné konfiguraci. Sloučeniny, pro které norma neudává výhřevnost jsou v tabulce označeny hvězdičkou. Například pro iso-butan byla použita výhřevnost n-butanu.

### Vzorový výpočet výhřevnosti v MJ/m<sup>3</sup>:

Výpočet výhřevnosti se skládá ze součtu dílčích výhřevností jednotlivých složek paliva vynásobených jejich objemovým zlomkem.

$$\text{výhřevnost} = \sum_{i=1}^n \text{relativní výhřevnost}_i \times \text{objemový zlomek}_i$$

kde výhřevnost LHV je v [MJ/m<sup>3</sup>]  
relativní výhřevnost je v [MJ/m<sup>3</sup>]  
objemový zlomek [-]

### Vzorový výpočet tepelného výkonu:

$$\text{tepelný výkon} = \frac{\text{hmotnostní tok} \times \text{výhřevnost}}{3600}$$

kde výkon je v [kW]  
hmotnostní tok je v [kg/h]  
výhřevnost je v [kJ/kg]

Parametry modelu spalování pro jednotlivá paliva udává Tabulka 5.5, Tabulka 5.7, Tabulka 5.9 a Tabulka 5.11. Objemové zlomky, vypočítané výhřevnosti a tepelný výkon jednotlivých paliv dle normy ČSN EN ISO 6976 [25] udává Tabulka 5.6, Tabulka 5.8, Tabulka 5.10 a Tabulka 5.12.

## Zemní plyn

Tabulka 5.5 – zemní plyn: podmínky a vypočítané parametry spalování v Chemcad 7 [23]

název toku		palivo	vzduch	spaliny
	jednotka			
teplota	°C	15,00	29,85	1818,05
tlak	bar	1,51	1,03	1,03
hmotnostní tok	kg/h	74,46	1476,82	1551,27
objemový tok	m <sup>3</sup> /h	100	1147,31	1249,05
průměrná mol. hmotnost	g/mol	16,69	28,85	27,84
spalné teplo	kJ/kg	54310		
výhřevnost	kJ/kg	<b>48940</b>		

Tabulka 5.6 – zemní plyn: složky paliva účastníci se hoření a vypočítané vlastnosti paliva

sloučenina	objemový zlomek	relativní výhřevnost ČSN EN ISO 6976 [MJ/m <sup>3</sup> ]	výhřevnost [MJ/m <sup>3</sup> ]	tepelný výkon [kW]
CH <sub>4</sub>	0,9639	35,812	34,501	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,02224	63,75	1,418	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,00377	91,16	0,343	
iso-butan*	0,00067	118,57	0,079	
n-butan	0,00058	118,57	0,069	
iso-pentan*	0,00011	145,98	0,016	
n-pentan	0,00009	145,98	0,013	
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> *	0,00012	200,84	0,024	
CO <sub>2</sub>	0,0030	0	0	
N <sub>2</sub>	0,00603	0	0	
celkem	1,00		<b>36,46</b>	<b>1012,24</b>

Poznámka k tabulce 5.6:

\* norma neudává relativní výhřevnost

pro iso-butan byla použita výhřevnost butanu

pro iso-pentan byla použita výhřevnost pentanu

pro C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> (hexan) byla použita výhřevnost n-hexanu

## Bioplyn ze skládky odpadu

Tabulka 5.7 - bioplyn: podmínky a vypočítané parametry spalování v Chemcad 7 [23]

název toku		palivo	vzduch	spaliny
	jednotka			
teplota	°C	15,00	29,85	1666,35
tlak	bar	1,51	1,03	1,03
hmotnostní tok	kg/h	131,02	707,62	838,63
objemový tok	m <sup>3</sup> /h	100	549,73	648,74
průměrná mol. hmotnost	g/mol	29,37	28,85	28,97
spalné teplo	kJ/kg	15060		
výhřevnost	kJ/kg	<b>13570</b>		

Tabulka 5.8 – bioplyn: složky paliva účastníci se hoření a vypočítané vlastnosti paliva

sloučenina	objemový zlomek	relativní výhřevnost ČSN EN ISO 6976 [MJ/m <sup>3</sup> ]	výhřevnost [MJ/m <sup>3</sup> ]	tepelný výkon [kW]
CH <sub>4</sub>	0,49	35,812	17,548	
CO	0,01	12,62	0,126	
H <sub>2</sub>	0,01	10,78	0,108	
CO <sub>2</sub>	0,46	0	0	
O <sub>2</sub>	0,03	0	0	
celkem	1,00		<b>17,78</b>	<b>493,87</b>

## Generátorový plyn z černého uhlí

Tabulka 5.9 – generátorový plyn: podmínky a vypočítané parametry spalování v Chemcad 7 [23]

název toku		palivo	vzduch	spaliny
	jednotka			
teplota	°C	20,00	29,85	1547,95
tlak	bar	1,51	1,03	1,03
hmotnostní tok	kg/h	111,45	199,19	310,64
objemový tok	m <sup>3</sup> /h	100	154,74	234,99
průměrná mol. hmotnost	g/mol	24,98	28,85	29,63
spalné teplo	kJ/kg	5526		
výhřevnost	kJ/kg	<b>5200</b>		

Tabulka 5.10 – generátorový plyn: složky paliva účastníci se hoření a vypočítané vlastnosti paliva

sloučenina	objemový zlomek	relativní výhřevnost ČSN EN ISO 6976 [MJ/m <sup>3</sup> ]	výhřevnost [MJ/m <sup>3</sup> ]	tepelný výkon [kW]
CO	0,27	12,62	3,407	
H <sub>2</sub>	0,125	10,78	1,348	
CH <sub>4</sub>	0,029	35,812	1,039	
CO <sub>2</sub>	0,035	0	0	
N <sub>2</sub>	0,54	0	0	
O <sub>2</sub>	0,001	0	0	
celkem	1,00		<b>5,79</b>	<b>160,98</b>

### Pyrolýzní plyn z pyrolýzy borového dřeva

Tabulka 5.11 – pyrolýzní plyn: podmínky a vypočítané parametry spalování v Chemcad 7 [23]

název toku		palivo	vzduch	spaliny
	jednotka			
teplota	°C	29,85	29,85	1565,41
tlak	bar	1,51	1,03	1,03
hmotnostní tok	kg/h	154,6	291,58	446,19
objemový tok	m <sup>3</sup> /h	100	226,54	305,9
průměrná mol. hmotnost	g/mol	34,65	28,85	32,69
spalné teplo	kJ/kg	5656		
výhřevnost	kJ/kg	<b>5415</b>		

Tabulka 5.12 – pyrolýzní plyn: složky paliva účastníci se hoření a vypočítané vlastnosti paliva

sloučenina	objemový zlomek	relativní výhřevnost ČSN EN ISO 6976 [MJ/m <sup>3</sup> ]	výhřevnost [MJ/m <sup>3</sup> ]	tepelný výkon [kW]
CO	0,412	12,62	5,199	
H <sub>2</sub>	0,001	10,78	0,011	
CH <sub>4</sub>	0,088	35,812	3,151	
CO <sub>2</sub>	0,499	0	0	
celkem	1,00		<b>8,36</b>	<b>232,54</b>

## 5.3. Zhodnocení výsledků

Z výsledků, pro něž byly použity vstupní hodnoty z matematicko-chemického modelu spalování v programu Chemcad 7 [23] pro zvolená čtyři paliva vyplývá, že nejvyššího tepelného výkonu při shodném objemovém toku všech paliv 100 m<sup>3</sup>/h lze dosáhnout spalováním zemního plynu. Tento výsledek byl také předpokládán a lze na něm tedy demonstrovat možný

důvod, proč by mohlo být v budoucnu těžké přecházet na alternativní zdroje energie především z plyných a kapalných paliv.

Zvolíme-li si tepelný výkon zemního plynu (1012,24 kW) jako referenční hodnotu je hodnota tepelného výkonu bioplynu (493,87 kW) méně jak poloviční a hodnota tepelného výkonu pyrolýzního plynu (232,54 kW) o něco menší jak čtvrtinová. Nejnižšího tepelného výkonu z analyzovaných paliv dosahuje generátorový plyn z černého uhlí (160,98 kW). Z těchto výsledků jasně vyplývá, že při požadavku stejného tepelného výkonu, jakého je dosahovaného při spalování zemního plynu je potřeba spálit větší množství paliva z alternativních zdrojů.

Konečné hodnoty ovšem nejsou takové, jaké by byly naměřeny při skutečném spalování, protože bilanční model byl zjednodušen. Model jednak uvažoval adiabatické spalování, čímž byly ovlivněny výsledky především spalného tepla, výhřevnosti a tepelného výkonu. Hodnoty jsou tedy pouze teoretické. Model také pracoval s rovnovážným reaktorem, kde všechny termomechanické děje probíhají ideálně, stejně tak pro oxidační chemické reakce byla uvažována reakce beze zbytku, a to všech sloučenin schopných se účastnit oxidační reakce.

## Závěr

Některé zdroje uvádějí, že pyrolýza může efektivně doplňovat trh nejen s průmyslově používanými palivy. Nespornou výhodou použití této technologie pro získávání alternativních paliv je získání částečné nebo úplné nezávislosti na fosilních palivech, především na ropě, co by hlavním energetickým zdrojem dnešní doby. Pyrolýzní technologie umožňuje využití obnovitelných zdrojů, jako jsou odpadní kaly, biomasa, nebo komunální a průmyslové odpady, což z ní činí technologii s prakticky nevyčerpatelným energetickým potenciálem a jako taková může figurovat jako nástroj trvale udržitelného energetického a odpadového hospodářství, i jako nástroj pro získávání druhotných surovin. Některá pyrolýzní zařízení vyvinutá v posledních dvaceti letech jsou schopna pyrolýzní postupy kombinovat například se spalováním, zplyňováním, nebo mohou dokonce pracovat jako kogenerační jednotky.

Teoretická část práce je věnována definování a historii pyrolýzy, nejběžnějším ale i speciálním metodám pyrolýzy, jejich výhodám i nevýhodám a získávaným produktům. Oproti některým dalším bakalářským pracím na toto téma je práce věnována také využitelnosti pyrolýzních produktů, podle jejich skupenské fáze. Další kapitola teoretické části je zaměřena na popis a objasnění funkce v praxi nejpoužívanějších typů reaktorů. Ve čtvrté kapitole jsou porovnány obecné vlastnosti vybraných paliv, tak jak je uvádějí dostupné zdroje.

Z analýzy prováděné na simulačním modelu vyplývá, že výhřevnost a spalné teplo pyrolýzního paliva a také biopaliv ve složení, které uvádějí zdroje nedosahují zdaleka takových hodnot jako vybraná fosilní paliva, nicméně je zde vhodné připomenout ekologický charakter zdrojů těchto paliv a jejich dlouhodobý vliv nejen na životní prostředí. Mnohé zdroje uvádí fakt, že většina biopaliv bez aditiv a přísad složek z fosilních paliv má významně nižší tepelný výkon než právě zmíněná paliva fosilní, jako například zemní plyn. To může být důvodem velmi pomalého přechodu z užívání fosilních paliv, přestože technologie pro výrobu a distribuci alternativních kapalných a plyných paliv jsou relativně dostupné.



## Seznam použité literatury

- [1] ŠEJVL, Radovan: Bez energetického využití odpadů se neobejdeme. *Biom.cz* [online]. 2013-06-24 [cit. 2017-11-21]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bez-energetickeho-vyuziti-odpadu-se-neobejdeme>>. ISSN: 1801-2655.
- [2] NESVATBA, Jindřich. *Pyrolýza a odpady: Část 4*. Praha : Inkoteka, 1997
- [3] Český statistický úřad. *Produkce, využití a odstranění odpadu a produkce druhotných surovin v roce 2016*. In: Český statistický úřad [online]. Praha: Český statistický úřad, 2017, poslední úprava 1.11.2017 [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/66641868/280029-17.pdf/c3c7a63e-9f68-40a9a147-5494067ea7d9?version=1.2>
- [4] Český statistický úřad. *Nakládání s odpady podle mezinárodní klasifikace v roce 2016*. In: Český statistický úřad [online]. Praha: Český statistický úřad, 2017, poslední úprava 1.11.2017, [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/46324992/280020-17g9.pdf/4ff0dfbe-b59c-4fe0-8f69-e5861509bbc6?version=1.2>
- [5] ŠEJVL, Radovan: *Energie z odpadů I*. *Biom.cz* [online]. 2013-03-18 [cit. 2017-11-21]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energie-z-odpadu-I>>. ISSN: 1801-2655.
- [6] BASU, Prabir. *Biomass Gasification and Pyrolysis – Practical Design and Theory*. B.m.: Elsevier, 2010, s. 65-96. ISBN 978-0-12-374988-8.
- [7] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. "Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy": studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy". 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 88-99. ISBN 978-80-248-1426-1.
- [8] HERALOVÁ, Kateřina. *Pyrolýzní zpracování odpadů*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav aplikované a krajinné ekologie. Vedoucí práce Ing. Bohdan Stejskal, Ph.D.
- [9] VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA FAKULTA STROJNÍ a FITE A.S. *Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů I*. [online]. 2010, [cit. 2017-12-19] Dostupné z: [http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003\\_pyrolyza\\_i.pdf](http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf)
- [10] BÍNEK, Ing. Lukáš. *Technika a technologie zpracování odpadní biomasy*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Bc. Ing. Zdeněk Konrád Ph.D.

- [11] Yolanda Fernandez, Ana Arenillas and J. Angel Menendez(2011). Microwave Heating Applied to Pyrolysis. Advances in Indusction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials, Prof. Stanislaw Grundas (Ed.), ISBN: 978-953-307-522-8, OnTech, [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-induction-and-microwave-heating-of-mineral-and-organic-materials/microwave-heating-applied-to-pyrolysis>
- [12] VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA FAKULTA STROJNÍ a FITE A.S. *Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů I.* [online]. 2010, [cit. 2018-02-13] Dostupné z: [http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003\\_pyrolyza\\_i.pdf](http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf)
- [13] BIALOŽYT, Michal. *Experimentální reaktory pro spalování biomasy a komunálního odpadu* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/13685>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí práce Milan Recman.
- [14] GARCIA-PEREZ, M., T. LEWIS a C.E. KRUGER. Methods for producing biochar and advanced biofuels in Washington state: Part 1: Literature review of pyrolysis reactors. First projet report. Department of biological systems engineering and the center for sustaining agriculture and natural resources, Washington State University, Pullman, WA, 2011. Akademická studie. Washington State University, Pullman, WA.
- [15] JÍLKOVÁ, Lenka, Karel CIAHOTNÝ a Radek ČERNÝ. *Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů.* Praha, 2012. Akademická studie. VŠCHT Praha, FTOP, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší.
- [16] Pyrolýza – princip, historie a současnost. O energetice [online]. Praha: Tomáš Molek, 2017 [cit. 2018-3-07]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost/>
- [17] Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování [online]. Praha: Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <http://www.cpga.cz/>
- [18] *Klastr Envicrack: Pyrolýza* [online]. Ostrava-Vítkovice: Harmony web, c2010 [cit. 2018- 3-22]. Dostupné z: <http://www.envicrack.cz/pyrolyza.html>
- [19] BIČÁKOVÁ, Olga, Michal JEREMIÁŠ, Michael POHOŘELÝ, Pavel STRAKA, Karel SVOBODA a Michal ŠYC. *Netradiční zdroje energie, čistá paliva a nové metody spalování* [online]. Praha: Serifa s.r.o, 2016 [cit. 2018-03-26]. ISBN 978-80-200-2665-1. Dostupné z: <http://www.academia.cz/uploads/media/preview/0001/04/89695660d8500227f0eeca345c4c027d93bc435f.pdf>
- [20] TUZA, Jakub a . *Biopaliva pro vozidlové spalovací motory* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:gTQBYTtH14J:is.mendelu.cz/zp/>

portal\_zp.pl%3F. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Sedlák, CSc.

[21] BLAŽEK, J. a V. RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy* [online]. 2. vyd. Praha: VŠCHT Praha, 2006 [cit. 2018-03-26]. ISBN 80-7080-619-2. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-619-2/pdf/197.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-619-2/pdf/197.pdf)

[22] ŽVAKOVÁ, Veronika. Detailní charakterizace pyrolýzního oleje pomocí separačních technik a hmotnostní spektrometrie. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, 2017, 102 stran

[23] Chemcad 7, verze 7.1.1.9597, Copyright 1998-2016, Chemstations Inc.

[24] Spalné teplo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 5.10.2017 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Spaln%C3%A9\\_teplo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Spaln%C3%A9_teplo)

[25] ČSN EN ISO 6976. Zemní plyn, výpočet spalného tepla, výhřevnosti, hustoty, relativní hustoty a Wobbého čísla. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[26] GasNet [online]. Ústí nad Labem: GasNet, c2018 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.gasnet.cz/cs/kvalita-plynu/>

[27] Vlastnosti BP. Bioprofit [online]. b.r. [cit. 2018-5-08]. Dostupné z: [http://www.bioplyn.cz/at\\_vlastnosti.htm](http://www.bioplyn.cz/at_vlastnosti.htm)

[28] RYBÍN, Miroslav. Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978, 414 s.

# Seznam použitých zkratek a symbolů

## Symboly

$E_{\text{dis}}$	[J/mol]	disociační energie chemické vazby
$\nu$	[mm <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita
$p_1$	[Pa]	tlak při kterém probíhá reakce během spalování
$t_1$	[°C]	výchozí teplota reaktantů
H	[J/kg, J/m <sup>3</sup> ]	výhřevnost
$\bar{H}^0$	[J/m <sup>3</sup> ]	relativní výhřevnost
$\varphi$	[-]	objemový zlomek
P	[W]	výkon
$Q_v$	[m <sup>3</sup> /s]	objemový tok
$Q_m$	[kg/s]	hmotnostní tok
p	[Pa]	tlak
t	[°C]	teplota
T	[K]	termodynamická teplota
M	[g/mol]	molární hmotnost
H	[J/kg, J/m <sup>3</sup> ]	spalné teplo

## Zkratky

ČR	Česká republika
Dr.	Doktor
USA	United States of America (Spojené Státy Americké)
SKO	směsný komunální odpad
měřo	methyl-ester řepkového oleje
LHV	lower heating value (výhřevnost)

## Chemické prvky a sloučeniny

C	vodík
S	síra
N	dusík
O	kyslík
H	vodík
CH <sub>4</sub>	metan
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	etan
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	propan
C <sub>6+</sub>	uhlovodíkový řetězec s více jak 6 uhlíky
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
CO	oxid uhelnatý
N <sub>2</sub>	molekula dusíku
O <sub>2</sub>	molekula kyslíku
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	hexan
H <sub>2</sub>	molekula vodíku
H <sub>2</sub> S	sulfan