

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2017

**KRISTÝNA
NĚMCOVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němcová** Jméno: **Kristýna** Osobní číslo: **397025**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Porovnání technologií pro energetické využití odpadů

Název diplomové práce anglicky:

Comparison of technologies for energy utilization of waste

Pokyny pro vypracování:

Porovnejte technologie pro energetické využití odpadů a doporučte jejich užití pro konkrétní aplikace.

Dílčí cíle:

1. Rešerše technologií pro energetické využití odpadů
2. Specifikace parametrů odpadů pro jednotlivé technologie a nároky na předúpravu odpadu
3. Porovnání technologií z hlediska technického, technologického a provozního
4. Ekonomické porovnání technologií
5. Doporučení technologií pro konkrétní aplikace

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Dlouhý CSc., ústav energetiky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **12.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.06.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a všechny použité informační zdroje jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

Anotační list

Jméno autora	Kristýna Němcová
Název BP/DP	Porovnání technologií pro energetické využití odpadů
Anglický název:	Comparison of Technologies for Energy Utilization of Waste
Akademický rok:	2016/2017
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Energetika
Vedoucí BP/DP:	doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 72 Počet obrázků: 16 Počet tabulek: 24 Počet grafů: 22 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Energetické využití odpadu, pyrolýza, zplyňování, spalování
Keyword:	Waste to energy, pyrolysis, gasification, incineration
Anotace:	Tato práce se věnuje způsobům energetického využití odpadů a popisuje pyrolýzu, zplyňování a spalování odpadů. Je zde uveden přehled významnějších zařízení pro energetické využití odpadu. Cílem práce je porovnat vybrané technologie z technického a ekonomického hlediska.
Abstract:	This thesis deals with the different means of waste to energy processes and describes pyrolysis, gasification and waste incineration. It introduces significant facilities for energy utilization of waste. The aim of this thesis is to create technical and economic comparison of selected technologies.

Obsah

Obsah.....	3
Seznam použitých zkratk.....	5
Úvod.....	6
1 Odpadové hospodářství.....	7
1.1 Definice odpadů.....	7
1.2 Složení odpadů.....	8
1.3 Nakládání s odpady.....	9
1.3.1 Způsoby využívání odpadů.....	11
1.3.2 Způsoby odstraňování odpadů.....	12
2 Legislativa pro nakládání s odpady.....	13
2.1 Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb.....	13
2.2 Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší.....	13
2.3 Vyhláška 415/2012 Sb.....	14
2.4 Plán odpadového hospodářství ČR.....	14
3 Energetické využití odpadu.....	15
3.1 Pyrolýza.....	16
3.1.1 Procesy pyrolýzy.....	16
3.1.2 Typy pyrolýzních reaktorů.....	17
3.1.3 Produkty pyrolýzy.....	17
3.1.4 Příklady pyrolýzní technologie.....	19
3.2 Zplyňování.....	22
3.2.1 Procesy při zplyňování.....	23
3.2.2 Typy zplyňovacích generátorů.....	24
3.2.3 Příklady zplyňovacích technologií.....	27
3.3 Spalování.....	30
3.3.1 Procesy spalování.....	31
3.3.2 Typy spalovacích zařízení.....	31
3.3.3 Příklady spalovacích zařízení.....	33
4 Syntézní plyn.....	35
4.1 Složení.....	35
4.2 Využití.....	36
5 Porovnání.....	38
5.1 Zkušenosti s provozem.....	38

5.2	Spolehlivost.....	41
5.3	Specifikace odpadů.....	42
5.4	Hmotnostní a energetická bilance.....	46
5.5	Vliv na životní prostředí.....	47
5.6	Produkce elektrické energie.....	48
5.7	Shrnutí.....	51
6	Ekonomické porovnání.....	52
6.1	Investiční náklady.....	53
6.2	Provozní náklady.....	55
6.3	Tržby.....	57
6.4	Cash Flow.....	59
6.5	Citlivostní analýza.....	60
7	Závěr.....	62
	Seznam použité literatury.....	64
	Seznam obrázků.....	70
	Seznam tabulek.....	71
	Seznam grafů.....	72

Seznam použitých zkratek

APCR	Zbytky z procesu čištění spalin (Air Pollution Control Residues)
BRO	Biologicky rozložitelný odpad
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad
ČOV	Čistička odpadních vod
EW	Elektroodpad (Electronic Waste)
IGCC	Integrované paroplynové zařízení
IW	Průmyslový odpad (Industrial Waste)
KO	Komunální odpad
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LTO	Lehký topný olej
MSW	Tuhý komunální odpad (Municipal Solid Waste)
NPV	Čistá současná hodnota (Net Present Value)
PCDD	Polychlorovaný dibenzodioxin
PCDF	Polychlorovaný dibenzofuran
RDF	Palivo z komunálního odpadu
SKO	Směsný komunální odpad
TAP	Tuhá alternativní paliva
WtE	Energetické využití odpadů (Waste-to-Energy)

Úvod

Problematika odpadového hospodářství není nikterak nové téma a možnosti nakládání s odpady se intenzivně řeší již několik let. V řadě zemí včetně České republiky je stále nejrozšířenějším způsobem nakládání s komunálním odpadem skládkování, které v současnosti představuje nejlevnější alternativu. Při skládkování není odpad využíván ani materiálově ani energeticky, jeho objem se nijak neredukuje a zabírá větší plochu půdy. Skládkování může být hrozbou pro životní prostředí, při nesprávném zabezpečení skládek může dojít ke znečištění půdy a podzemních vod. Jako hlavní impuls pro změnu způsobu nakládání s komunálním odpadem se jeví legislativní kroky k omezení skládkování využitelného odpadu.

Práce se věnuje procesům pyrolýzy, zplyňování a spalování odpadů a jejím cílem je porovnat tyto způsoby energetického zpracování odpadu z technického a ekonomického hlediska.

1 Odpadové hospodářství

Odpadové hospodářství se skládá z předcházení vzniku odpadů, nakládání s nimi, následné péče o místo, kde jsou odpady trvale uloženy, a kontroly těchto činností. Pravidla pro nakládání s odpady jsou nyní v České republice stanovena především zákonem č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých zákonů, který je popsán v kapitole 2.

1.1 Definice odpadů

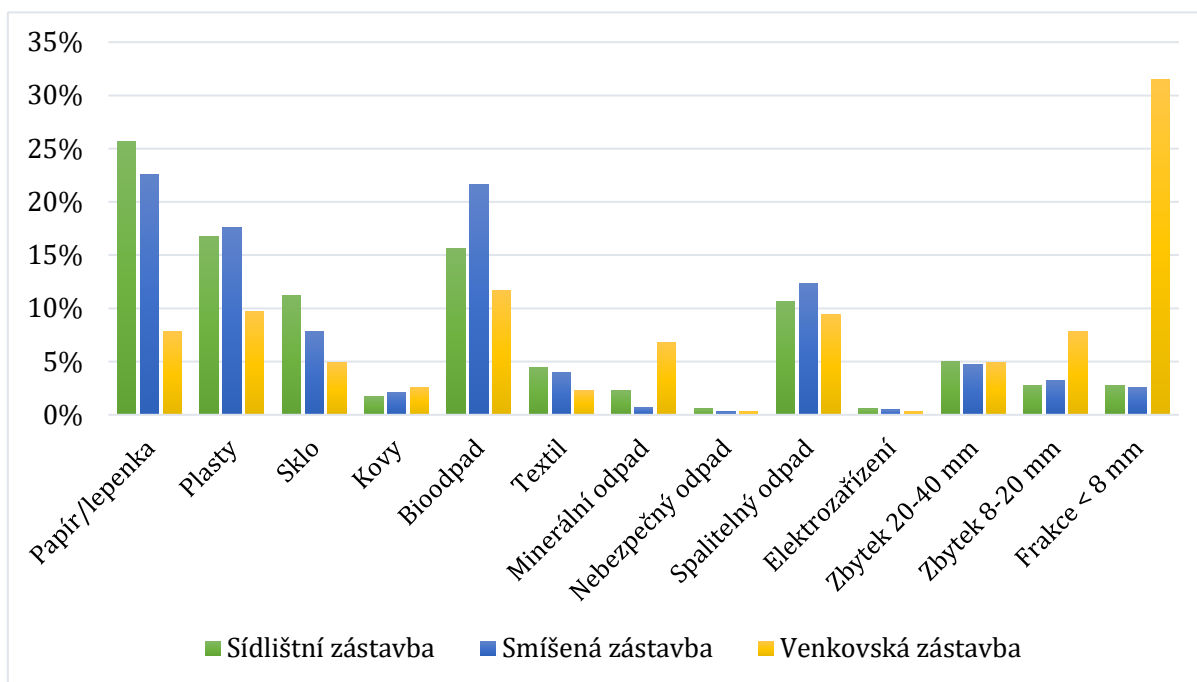
Zákon o odpadech 185/2001 Sb. definuje odpad jako každou movitou věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. Vyhláška č. 93/2016 Sb. rozděluje odpad do dvaceti skupin podle šestimístního kódu, přičemž první dvojčíslí udává skupinu odpadu, druhé podskupinu a třetí dvojčíslí určuje druh odpadu.

Tab. 1: Kategorie odpadu [1]

Skup.	Název
01	Odpady z geologického průzkumu, těžby, úpravy a dalšího fyzikálního a chemického zpracování nerostů a kamene
02	Odpady z prvovýroby v zemědělství, zahradnictví, myslivosti, rybářství a z výroby a zpracování potravin
03	Odpady ze zpracování dřeva a výroby desek, nábytku, celulózy, papíru a lepenky
04	Odpady z kožedělného, kožešnického a textilního průmyslu
05	Odpady ze zpracování ropy, čištění zemního plynu a z pyrolytického zpracování uhlí
06	Odpady z anorganických chemických procesů
07	Odpady z organických chemických procesů
08	Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání nátěrových hmot (barev, laků a smaltů), lepidel, těsnicích materiálů a tiskařských barev
09	Odpady z fotografického průmyslu
10	Odpady z tepelných procesů
11	Odpady z chemických povrchových úprav, z povrchových úprav kovů a jiných materiálů a z hydrometalurgie neželezných kovů
12	Odpady z tváření a z fyzikální a mechanické úpravy povrchu kovů a plastů
13	Odpady olejů a odpady kapalných paliv (kromě jedlých olejů a odpadů uvedených ve skupinách 05 a 12)
14	Odpady organických rozpouštědel, chladiv a hnacích médií (kromě odpadů uvedených ve skupinách 07 a 08)
15	Odpadní obaly, absorpční činidla, čisticí tkaniny, filtrační materiály a ochranné oděvy jinak neurčené
16	Odpady v tomto katalogu jinak neurčené
17	Stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst)
18	Odpady ze zdravotní nebo veterinární péče a/nebo z výzkumu s nimi souvisejícího (s výjimkou kuchyňských odpadů a odpadů ze stravovacích zařízení, které bezprostředně nesouvisejí se zdravotní péčí)
19	Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu, z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely
20	Komunální odpady (odpady z domácností a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů) včetně složek z odděleného sběru

1.2 Složení odpadů

Hlavní podíl odpadů, které jsou energeticky využívané, má odpad komunální. Ten se skládá z heterogenní směsi, jejíž vlastnosti se liší časově v průběhu roku. Vliv na složení komunálního odpadu má i velikost obce, způsob vytápění, typ zástavby apod., jak je patrné z grafu skladby komunálního odpadu. V grafu jsou použity průměrné hodnoty z analýzy prováděné v letech 2008 až 2009.



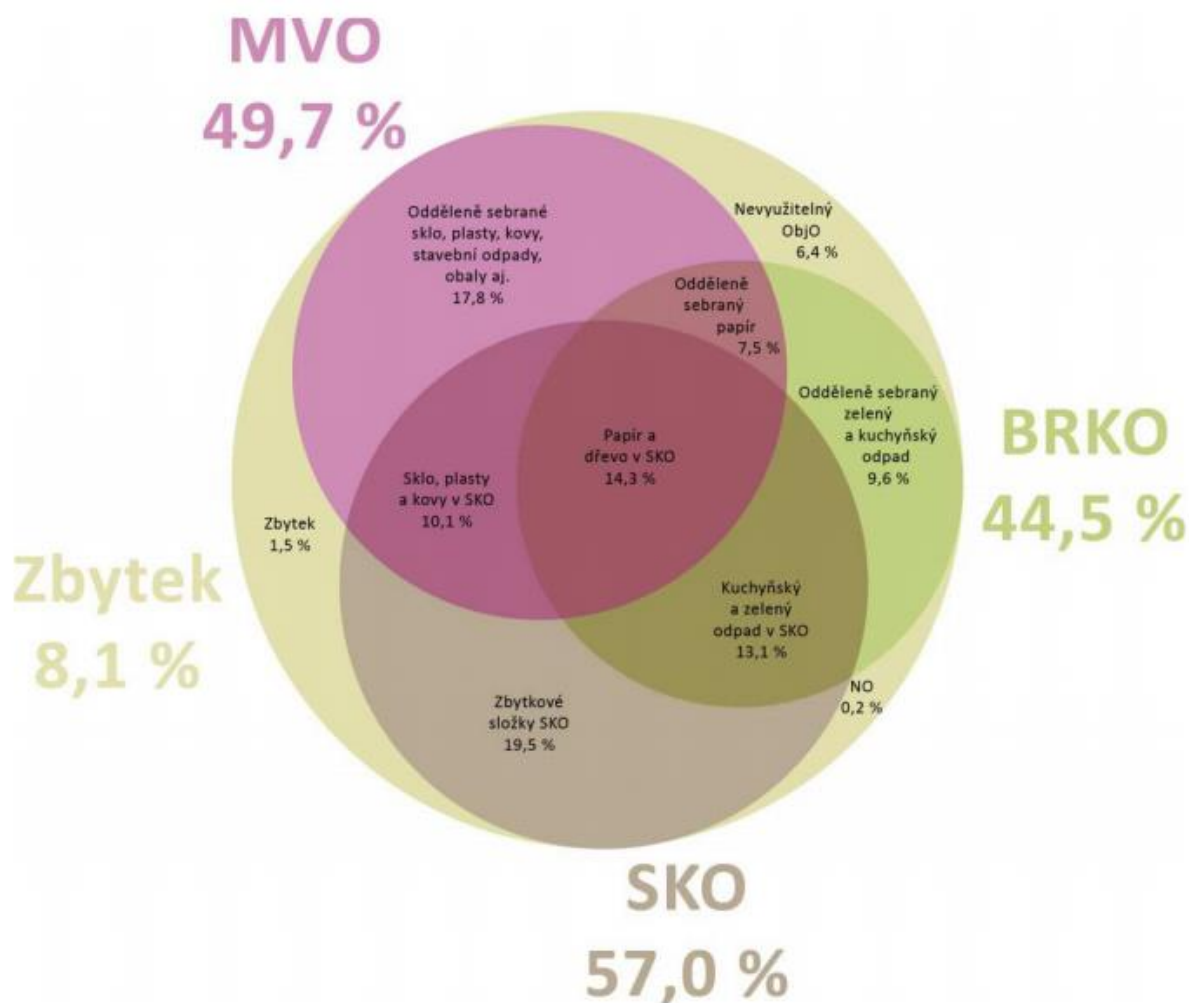
Graf 1: Skladba komunálního odpadu z domácností [3]

Komunální odpad z domácností je v sídlištní a smíšené zástavbě tvořen téměř ze čtvrtiny papírem či lepenkou, další často zastoupenou složku v těchto zástavbách tvoří plasty, které výrazně zvyšují výhřevnost celkového odpadu. Oproti tomu u venkovské zástavby tvoří papír pouze 8 % a množství plastů pokleslo ze 17 % u sídlištní zástavby na téměř 10 % hmotnostních. Nejčastější složku komunálních odpadů z domácností ve venkovské zástavbě tvoří s množstvím přibližně 32 % frakce pod 8 mm, ta se u sídlištní zástavby pohybuje na úrovni 3 %.

Tab. 2: Vlastnosti vybraných složek komunálního odpadu [4]

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Lepenka	30-80	4-10	16,5
Bioodpad	60-225	30-80	5-18,5
Papír	30-130	4-10	12-18,5
Plasty	30-156	1-4	32-43

Komunální odpad je tvořen směsným komunálním odpadem a vytríděnými materiály z odděleného sběru nebo třídících linek. KO obsahuje podíl materiálově využitelných odpadů, biologicky rozložitelných odpadů a směsného komunálního odpadu.



Graf 2: Složení KO v roce 2012 [54]

Kromě materiálově využitelných odpadů, BRKO a SKO je komunální odpad složen ještě ze zbytku, který obsahuje nevyužitelný objemný odpad, nebezpečný odpad, nevyužitelné složky SKO, uliční smetky atd.

1.3 Nakládání s odpady

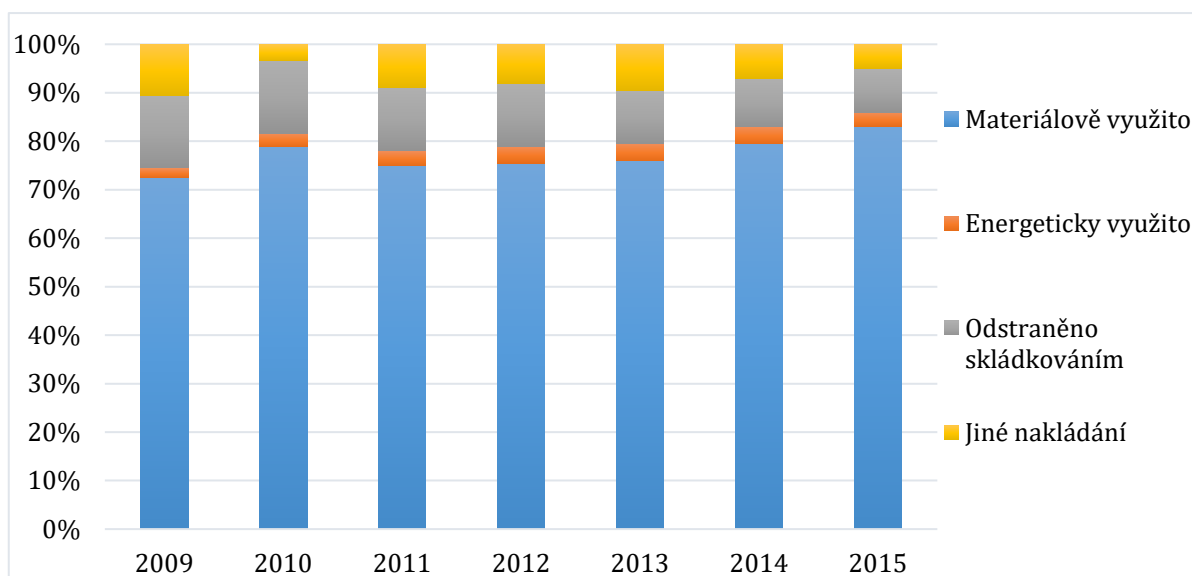
Až do poloviny 18. století byl veškerý odpad z domácností i z průmyslu z přírodních materiálů, a byl tedy biologicky rozložitelný. Po průmyslové revoluci ale vznikly i odpady, které nelze odstranit přírodními procesy. Na začátku 20. století se s vývojem syntetických látek začal objevovat i další odpad jako například pesticidy, polychlorované bifenylly a polymerní látky, které vedly ke znečištění povrchových i podzemních vod. Postupně se zavedla opatření pro zachyt těchto látek, která se vyskytují u všech zařízení pro nakládání s odpady. [11]

Odstraňování komunálních odpadů tvoří především tři technologie, a sice kompostování, spalování a skládkování odpadů. Porovnání výhod a nevýhod těchto základních technologií pro odstraňování odpadů je shrnuto v následující tabulce.

Tab. 3: Porovnání skládkování, kompostování a spalování odpadu [10]

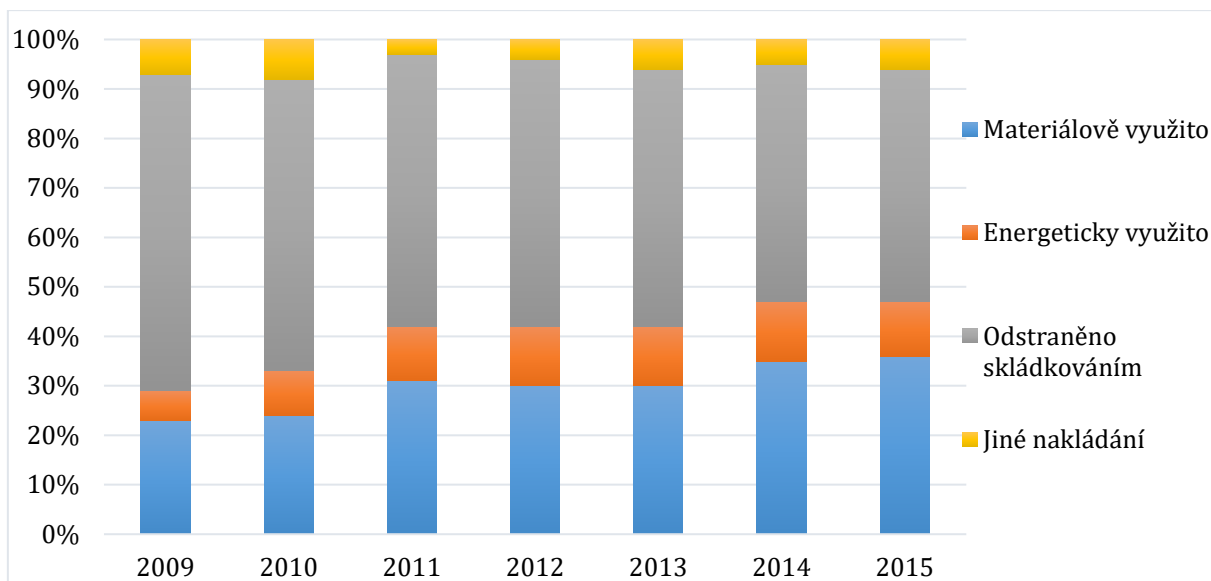
Technologie	Výhody	Nevýhody
Skládkování	Relativně nízké náklady	Potřeba větší plochy půdy
	Produkce skládkového plynu	Objem odpadu není redukován ani využíván jako surovina
	Univerzální	Nebezpečí znečištění (podzemní vody, ovzduší a kontaminace půdy)
		Umístění mimo obytné oblasti, což vede k delšímu transportu odpadu
Kompostování	Přeměna organického materiálu na hnojivo	Žádné ekonomické ani environmentální výhody ve srovnání se spalováním
	Snižuje množství odpadu ke skládkování	Potřeba předúpravy a třídění odpadu
Spalování	Redukce odpadu (až 90 % obj.)	Vysoké investiční a provozní náklady
	Minimální předúprava odpadu	Nutné zařízení pro čištění spalin
	Využití škváry při stavbě silnic	Popílek ukládán na skládky NO
	Výroba tepla a elektřiny	
	Umístění blíže obytným oblastem a tím snížení nákladů na dopravu	

V následujícím grafu je zachycena produkce a nakládání se všemi odpady v letech 2009 až 2015 v České republice. Z grafu je patrný růst materiálového i energetického využití odpadu a pokles skládkování.



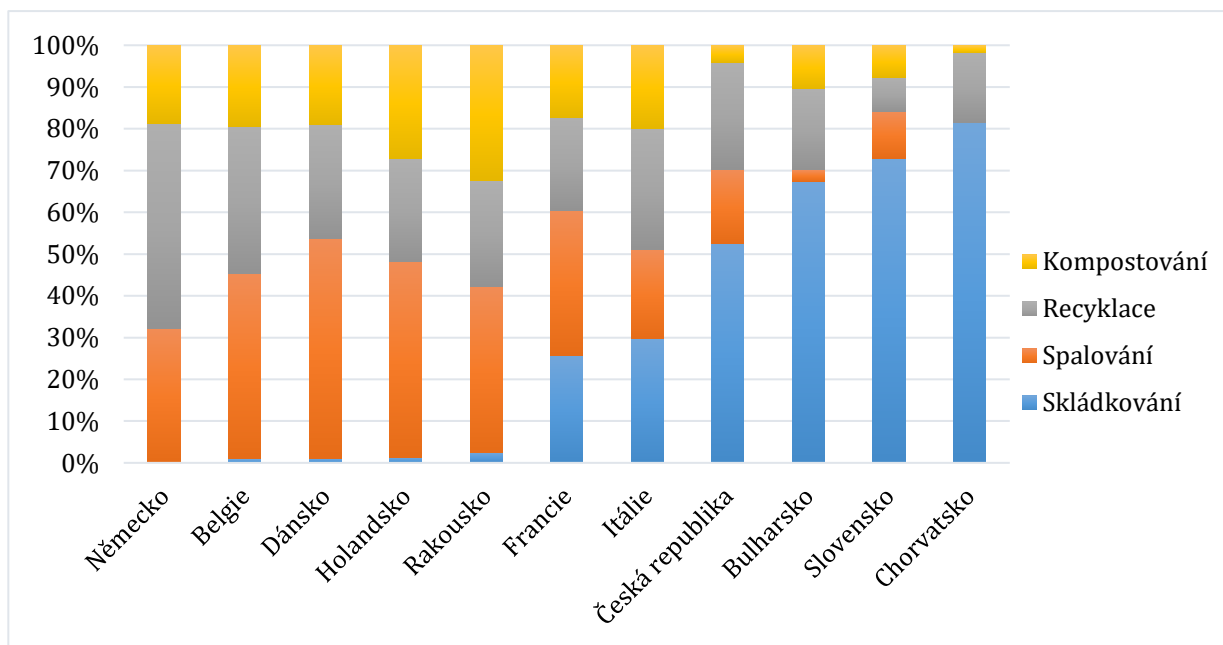
Graf 3: Produkce a nakládání s odpady v ČR v letech 2009-2015 [6]

Graf 4 zahrnuje produkci a nakládání pouze s odpady komunálními v letech 2009 až 2015. Oproti zvyšující se produkci všech odpadů je množství komunálního odpadu v průběhu let stabilní. Množství komunálních odpadů odstraněných skládkováním se také snižuje, ovšem v roce 2015 stále činilo 47 %.



Graf 4: Produkce a nakládání s komunálními odpady v ČR v letech 2009-2015 [6]

Nakládání s odpady se v různých lokalitách velmi liší. V Evropské unii je energeticky využito průměrně 25 % tuhého komunálního odpadu, v jednotlivých členských státech se podíl energeticky využitého odpadu pohybuje od nuly do 62 %. [12]



Graf 5: Nakládání se směsným komunálním odpadem ve vybraných státech EU [7]

1.3.1 Způsoby využívání odpadů

Využitím odpadu se podle zákona 185/2001 Sb. rozumí 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. [2]

V legislativě je definováno 13 způsobů využívání odpadu, z nichž tato práce se věnuje především R1 *využití odpadu způsobem obdobným jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie* a R3 *recyklace nebo zpětné získávání organických látek, které se nepoužívají jako rozpouštědla (včetně kompostování a dalších biologických transformačních procesů)*. Činnost R3 zahrnuje i pyrolýzu a zplyňování, pokud jsou jejich produkty využívány jako chemické látky. Využitím odpadu jako paliva (R1) je spalování komunálního odpadu s energetickou účinností nejméně 0,60 pro zařízení se souhlasem k provozu před 1.1.2009 a 0,65 pro zařízení se souhlasem k provozu po 31.12.2008. Pokud spalovna vykazuje účinnost nižší, jedná se o odstraňování odpadu a nikoli o jeho využívání. [2]

1.3.2 Způsoby odstraňování odpadů

Odstraněním odpadu se rozumí činnosti, které nejsou využitím odpadů, tyto činnosti jsou uvedeny v příloze č.4 zákona 185/2001 Sb. Ze způsobů odstranění odpadu je v České republice nejpoužívanější ukládání v úrovni nebo pod úrovní terénu (např. skládkování) pod kódem **D1** a spalování na pevnině označené kódem **D10**. [2]

2 Legislativa pro nakládání s odpady

Právní předpisy České republiky týkající se nakládání s odpady tvoří především

- zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů
- zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů
- nařízení vlády č. 352/2014 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024

2.1 Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb.

V zákoně jsou stanovena pravidla pro předcházení vzniku odpadů a nakládání s nimi, dále upravuje práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy.

Zákon o odpadech definuje hierarchie způsobu nakládání s odpady v pořadí:

- předcházení vzniku odpadů
- příprava k opětovnému použití
- recyklace odpadů
- jiné využití (například energetické)
- odstranění odpadů

Opětovné využití a recyklace jsou v odpadové hierarchii nadřazeny energetickému využívání odpadů, ale od tohoto pořadí je možné se odchýlit, pokud je to odůvodněné technickou proveditelností, ochranou životního prostředí aj.

Zákon stanovuje sazbu základního poplatku za ukládání odpadu na skládku. Ta je od roku 2009 pro nebezpečný odpad 1700 Kč/t, pro komunální a ostatní odpad pak poplatek činí 500 Kč/t. Vzhledem k plánovanému zákazu skládkování směšného komunálního odpadu od roku 2024 by navyšování těchto poplatků mohl být jeden z nástrojů k omezení množství odpadu ukládaného na skládky. Nárůst poplatku za skládkování obsahuje stále projednávaný návrh nového zákona o odpadech. Z původních 500 Kč/t by poplatek za skládkování využitelného odpadu vzrostl až na 2000 Kč/t, poplatek za zbytkový odpad by se ustálil roku 2030 na hodnotě 800 Kč/t. [2]

Tab. 4: Návrh poplatků za ukládání odpadu na skládku

		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
využitelný odpad	[Kč/t]	900	1150	1350	1550	1700	1850	2000
zbytkový odpad	[Kč/t]	500	500	500	500	500	500	500
nebezpečný odpad	[Kč/t]	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

2.2 Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší

Zákon o ochraně ovzduší se zabývá znečištěním a znečišťováním, jejich přípustnou úrovní a nástroji k snižování jejich úrovně. Definuje také některé důležité pojmy z oblasti nakládání s odpady, jako je například tepelné zpracování odpadů, které znamená oxidaci odpadu nebo jeho zpracování jiným termickým procesem, a to včetně spalování vzniklých látek. Spalovnou odpadu se podle zákona rozumí stacionární zdroj tepelného zpracování odpadu, kdy účelem tohoto zdroje není výroba energie ani jiných produktů. O spalovnu

odpadů se jedná i v případě, kdy více než 40 % tepla vzniká zpracováním nebezpečného odpadu nebo pokud se tepelně zpracovává neupravený smíšený komunální odpad. [50]

2.3 Vyhláška 415/2012 Sb.

Vyhláška stanovuje způsob a podmínky zjišťování úrovně znečišťování jednorázovým i kontinuálním měřením a vyhodnocení těchto měření. Ve vyhlášce jsou definované specifické emisní limity a technické podmínky provozu pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad. Podle nich musí být v zásobníku odpadu trvale udržován podtlak a odsávaný vzduch je přiváděn do ohniště. Spalovací zařízení musí být provozována tak, aby obsah celkového organického uhlíku ve strusce a zbytkovém popelu byl nižší než 3 % nebo aby ztráta žíháním byla nižší než 5 % hmotnosti suchého materiálu. [51]

2.4 Plán odpadového hospodářství ČR

Plán odpadového hospodářství České republiky v letech 2015-2024 udává jako strategické cíle:

1. Předcházení vzniku odpadů a snižování jejich měrné produkce.
2. Minimalizace nepříznivých účinků vzniku odpadů a nakládání s nimi na lidské zdraví a životní prostředí.
3. Udržitelný rozvoj společnosti a přiblížení se k evropské „recyklační společnosti“.
4. Maximální využívání odpadů jako náhrady primárních zdrojů a přechod na oběhové hospodářství.

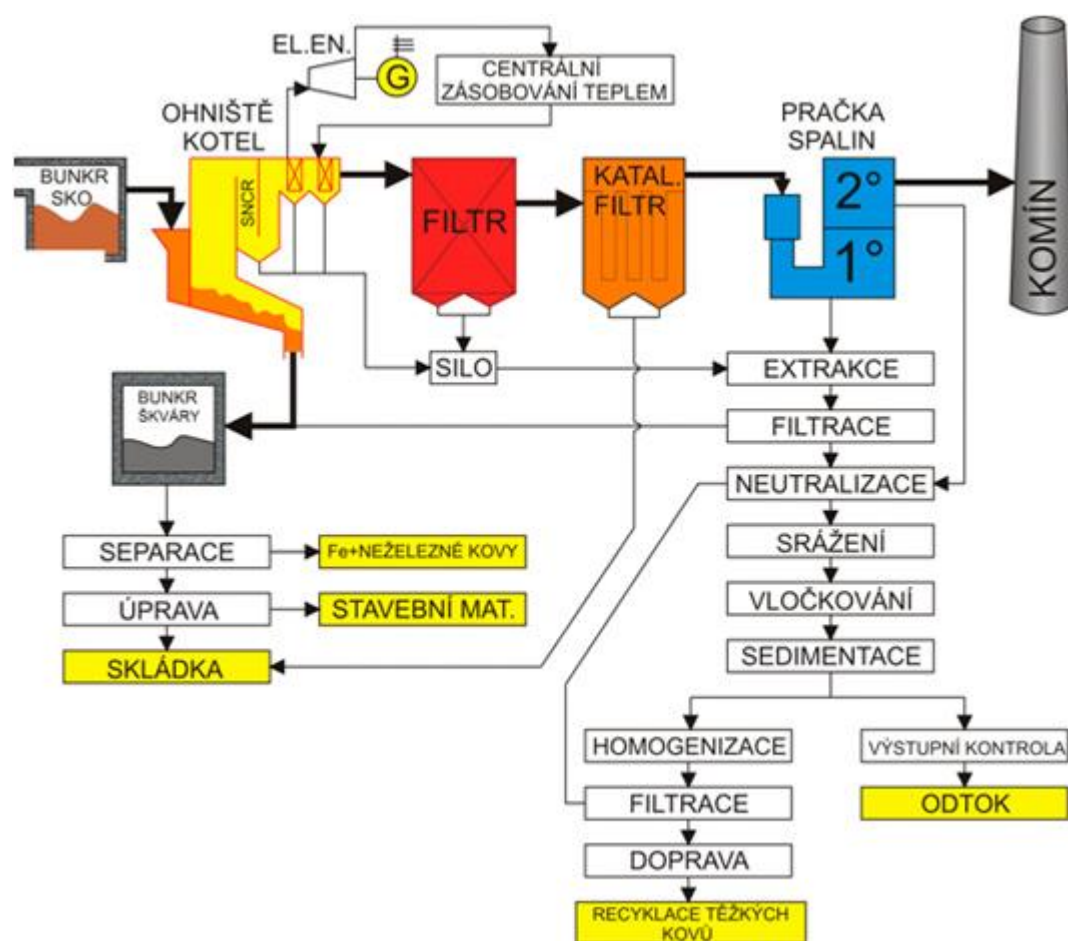
Jedním z cílů Plánu odpadového hospodářství je zvýšení energetického využívání směsného komunálního odpadu (po vytřídění biologicky rozložitelných odpadů, nebezpečných a materiálově využitelných složek), což je spojeno s postupným omezením skládkování a plánovaným zákazem ukládání směsného komunálního odpadu na skládky od roku 2024. Omezení postupného ukládání komunálního odpadu na skládky by mělo být realizováno např. zvyšováním poplatku za skládkování využitelných odpadů.

Dalším cílem je snižování množství skládkovaných biologicky rozložitelných komunálních odpadů tak, aby do roku 2020 byl podíl této složky maximálně 35 % hmotnostních z BRKO vyprodukovaných v roce 1995. [52]

3 Energetické využití odpadu

V současnosti se energetické využití odpadů nachází podle hierarchie nakládání s odpady na předposledním místě, předchází mu opětovné využití a recyklace. Význam energetického využití odpadu stále roste, zejména kvůli omezení skládkování využitelných materiálů a zpracování materiálů nevhodných k recyklaci. Tepelné využití odpadů tvoří procesy pyrolýzy, zplyňování a spalování.

Kromě speciálně navržených technologií pro zplyňování a pyrolýzu, mohou být i klasická spalovací zařízení (roštové, fluidní kotle, rotační pece atd.) upravena a provozována za pyrolytických nebo zplyňovacích podmínek, tzn. podstechiometricky a při nižší teplotě. Pyrolýza, zplyňování i spalování bývají často kombinovány, například částečnou pyrolýzu s navazujícím zplyňováním využívá proces Thermoselect. Pyrolýza a zplyňování mají za cíl stejně jako spalování především snížení objemu odpadů, ale využitím těchto procesů vzniká jako produkt syntézní plyn.

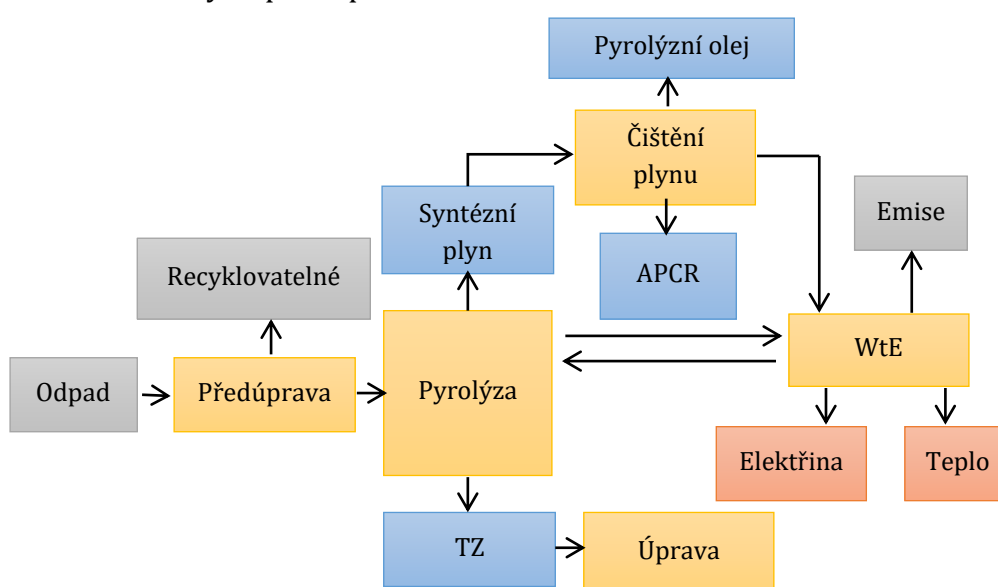


Obr. 1: Schéma zařízení na energetické využívání odpadů [14]

3.1 Pyrolýza

Pyrolýza je termický rozklad organických materiálů na jednotlivé prvky a jednoduché sloučeniny bez přístupu médií obsahující kyslík. Jako inertní plyn může být použit například dusík nebo argon. Během procesu dochází ke vzniku syntézního plynu, oleje a polokoksu. Syntézní plyn se skládá především z vodíku, methanu a dalších uhlovodíků, jeho složení je blíže popsáno v kapitole 4. Výhřevnost pyrolýzního plynu vzniklého pyrolýzou komunálního odpadu je obvykle 5 až 15 MJ/m³, pyrolýzou RDF vzniká plyn o výhřevnosti 15 až 30 MJ/m³. [12]

Nejčastěji se pyrolýzou zpracovávají homogenní materiály, jako jsou pneumatiky, plasty nebo biomasa. U použití pyrolýzy komunálních odpadů se setkáváme s problémem jejich nehomogenity a kvůli rozdílným fyzicko-chemickým vlastnostem odpadu se značně liší vlastnosti výstupních produktů.



Obr. 2: Energetické využití odpadu pyrolýzou [20]

3.1.1 Procesy pyrolýzy

Proces pyrolýzy probíhá ve třech navazujících fázích, jedná se o sušení, karbonizaci a samotnou tvorbu plynu.

Tab. 5: Chemické reakce pyrolýzy [5]

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

Během karbonizace se štěpí vysokomolekulární organické látky a vzniká plyn, kapalné uhlovodíky a uhlík. Tyto produkty karbonizace se při teplotě 500 °C dále štěpí a z kapalných organických látek a uhlíku vzniká vodík, metan, oxid uhelnatý a uhlíčitý.

Obecně se tedy teplota během pyrolýzy pohybuje v rozmezí 300 až 1000 °C, pro vyšší produkci kapalných produktů je většinou používán teplotní rozsah 500 až 550 °C. Při teplotách nad 700 °C je hlavním produktem syntézní plyn. [5]

Rychlá pyrolýza

Využívá se kvůli většímu výtěžku kapalných produktů – pyrolýzního oleje. Při procesu rychlé pyrolýzy dochází k rychlému ohřevu paliva v rozmezí 500 až 1000 °C a udržování teploty. Kvůli rychlému ohřevu je nutná předúprava paliva na jemnější frakci. U rychlé pyrolýzy je výtěžek pyrolýzního oleje až 70 %.

Pomalá pyrolýza

U pomalé pyrolýzy dochází k ohřevu vstupního paliva na 500 °C, a to v reaktoru zůstává po dobu půl hodiny a více. Ohřev paliva probíhá pomaleji, přibližně 7 °C za minutu. Díky delší době setrvání je proces méně náročný na velikost frakce paliva. Výtěžkem pomalé pyrolýzy je přibližně rovnoměrné zastoupení všech fází – plynné, kapalné i tuhé. [5]

3.1.2 Typy pyrolýzních reaktorů

Reaktor s pevným ložem

Jedná se o reaktor s nízkou rychlostí ohřevu. Při použití většího vzorku paliva dochází k nerovnoměrnému ohřevu a materiál se rozkládá současně za různých teplot. Kvůli své neefektivnosti se reaktory s pevným ložem ve větším měřítku nevyužívají.

Reaktor s rotační pecí

Rotační pec má vyšší účinnost než reaktor s pevným ložem díky lepšímu ohřevu vsázky a rotaci pece, což zaručuje dobré promíchání odpadů. Kvůli nízké rychlosti ohřevu jsou tyto reaktory používány pro pomalou pyrolýzu, kdy setrvání odpadu je až 1 hodina. K výhodám reaktorů s rotační pecí patří kromě promíchávání vstupní suroviny i nastavitelná doba zdržení a možnost použití heterogenního materiálu, což minimalizuje potřebu předúpravy odpadu. Rotační pece bývají vyhřívány externě například pomocí spalování pyrolýzního plynu.

Reaktor s fluidní vrstvou

Pro reaktory s fluidním ložem je charakteristická rychlá pyrolýza s vysokou rychlostí ohřevu a dobrým promícháním vstupního materiálu. Tyto reaktory jsou používány zejména pro pyrolýzu biomasy a plastových odpadů.

3.1.3 Produkty pyrolýzy

Během pyrolýzy vzniká jako vedlejší produkt kromě syntézního plynu i pyrolýzní olej, což je směs látek, jako jsou fenolové sloučeniny, organické kyseliny, furfural a jeho deriváty a další [34]. Pyrolýzní olej se využívá k výrobě tepla nebo elektřiny, případně může být dále zplyňován nebo přeměněn pomocí Fisher-Tropschovy syntézy na metanol. Chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolytického oleje vzniklého pyrolýzou směsného komunálního odpadu jsou uvedeny v následující tabulce.

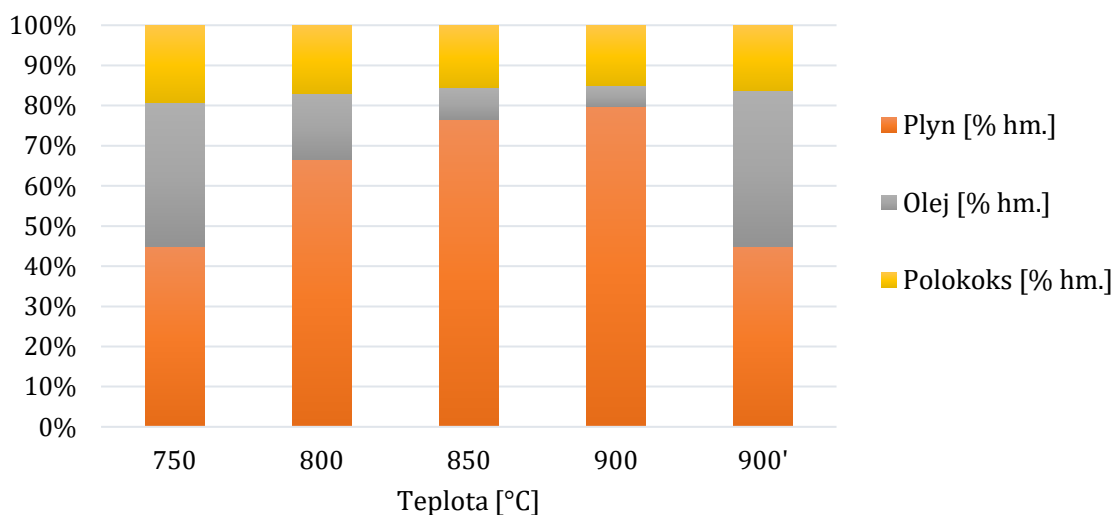
Tab. 6: Chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolytického oleje [5]

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

Výtěžnost produktů je závislá na teplotě a se zvyšující se teplotou a tlakem dochází k větší tvorbě plynných uhlovodíků a vodíku. Žádaná může být velká výtěžnost pyrolýzního plynu, která probíhá za vyšších teplot a delší doby setrvání odpadu v pyrolýzním reaktoru. Pro maximální výtěžnost kapalných produktů je vhodná rychlá pyrolýza, tzn. rychlý ohřev odpadu a krátká doba setrvání v reaktoru, výtěžek pyrolýzního oleje pak může činit až 70 %.

V pyrolýzních zařízeních vzniká tuhý zbytek (polokoks) obsahující značné množství uhlíku; při pyrolýze plastů tvoří obsah uhlíku 43 až 85 % hm. podle druhu použitých plastů. Některé procesy kombinující pyrolýzu a zplyňování využívají polokoks k získání tepla potřebného pro průběh endotermních reakcí.

V následujícím grafu je zachycen poměr produktů pyrolýzy MSW v závislosti na teplotě při použití dolomitu jako katalyzátoru. Pro teplotu 900 °C je k porovnání uvedena i výtěžnost produktů pyrolýzy bez použití katalyzátoru.



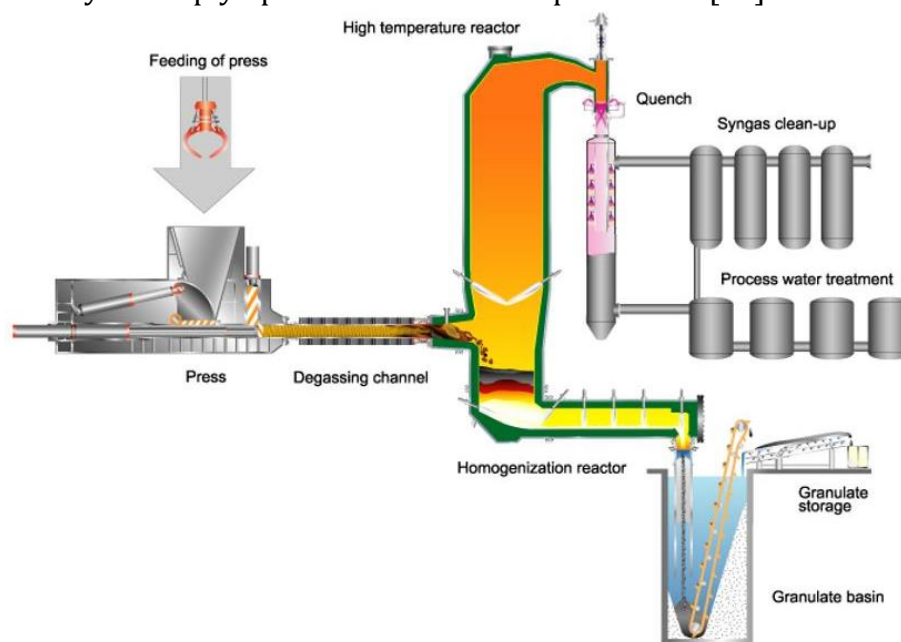
Graf 6: Výtěžnost produktů pyrolýzy v závislosti na teplotě [15]

1 Bez použití katalyzátoru

3.1.4 Příklady pyrolýzní technologie

Thermoselect

Technologie Thermoselect je kombinací pyrolýzy a zplyňování. Nejdříve dochází ke ztuhnutí neupraveného odpadu a dopravě do pyrolýzního reaktoru, který je tvořen rotačním válcem. Se zvyšující se teplotou se odpad vysušuje a organické složky se odplyňují. Směs dále vstupuje do vysokoteplotního reaktoru, kde je za přítomnosti kyslíku uhlíkatý zbytek zplyňován za teploty až 2000 °C a roztavená struska je odváděna přes vodní lázeň. Syntézní plyn prochází několika stupni čištění. [35]



Obr. 3: Proces Thermoselect [9]

Systém nevyžaduje předúpravu odpadu a zpracuje různé materiály s výhřevností 8 MJ/kg až 20 MJ/kg [36]. Je tedy možné použít tuhý komunální odpad, průmyslový odpad, odpad ze zdravotnictví, čistírenské kaly, pneumatiky nebo elektroodpad.

Roku 1992 vznikla ve Fondotoce v Itálii první demonstrační jednotka Thermoselect zpracovávající 110 tun tuhého komunálního odpadu za den. Od té doby vzniklo v Japonsku dalších sedm komerčních zařízení zpracovávajících komunální nebo průmyslový odpad, která jsou zmíněna v následující tabulce.

Tab. 7: Zařízení Thermoselect [36]

Lokalita	Kapacita [t/den]	Začátek provozu	Zpracovávaný odpad
Fondotoce, Itálie ¹	110	1992	MSW
Karlsruhe, Německo ¹	792	1999	MSW
Chiba, Japonsko ²	330	1999	MSW, IW
Mutsu, Japonsko ²	154	2003	MSW
Nagasaki, Japonsko ²	330	2005	MSW
Kurashiki, Japonsko ²	612	2005	MSW, IW
Yorii, Japonsko ²	495	2005	IW
Tokushima, Japonsko ²	132	2005	MSW
Izumi, Japonsko ²	105	2005	IW

¹ odstavená zařízení, Thermoselect-Südwest

² Thermoselect JFE

GLES

System pyrolýzy od společnosti Green Light Energy Solutions Corporation pracuje s kontinuálním přísunem paliva a přeměňuje odpad na 90-98 % hořlavého plynu a 2-10 % uhlíkového zbytku. Pyrolýzní jednotka je navržena na kapacitu přibližně 11 m³/h paliva s průměrnou vlhkostí 60 %.

Odpad je nutné před vlastním pyrolýzním procesem upravit. Na třídící lince se z odpadu vyseparují materiály, které nelze v procesu uplatnit: kovy, sklo a inertní materiály, jako jsou beton, keramika apod. Dále odpad putuje do drtiče, kde je zpracován na části do průměru 50 mm, které se pak dostávají do sušičky. V sušičce se snižuje vlhkost paliva na 20 % a palivo končí v bunkru upraveného odpadu.

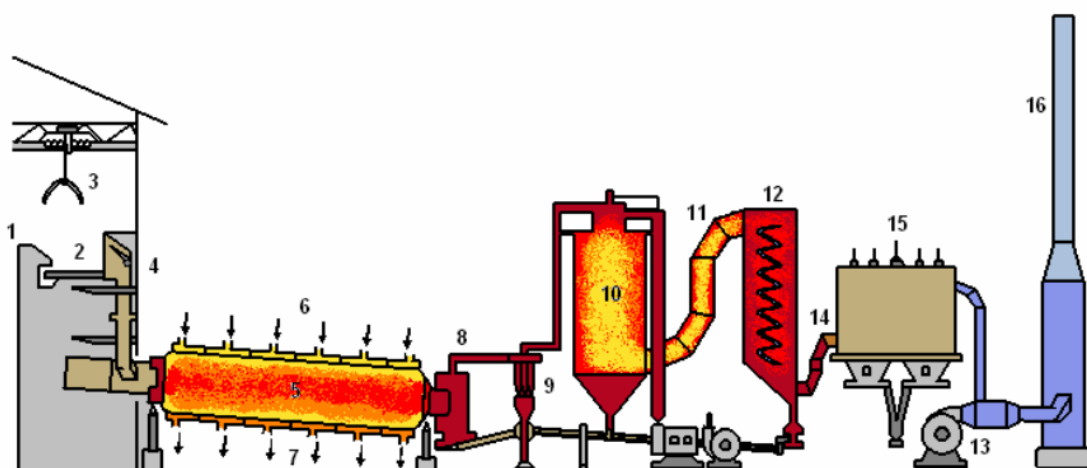
Přístup paliva do reaktoru je řešen speciálně navrženou jednotkou, aby bylo zamezeno vniknutí vzduchu do reaktoru. Reaktor má kapacitu okolo 5 m³/h paliva s vlhkostí 20 %, které je zde redukováno při teplotách 700-750 °C na uhlíkatý zbytek a pyrolýzní plyn.

Vyrobený plyn se dále spaluje při teplotách dosahujících až 1200 °C. Díky tomu dochází k molekulárnímu rozkladu dioxinů, furanů a jiných nebezpečných příměsí.

Do procesu je možné použít směsný komunální odpad, pneumatiky, biomasa, průmyslový a nebezpečný odpad, plasty a čistírenské kaly. [56]

Babcock

Proces Babcock kombinuje pyrolýzu a následné spalování vzniklého plynu v neupraveném stavu. Pyrolýza probíhá v nepřímě otápeném válci za teplot 500 až 600 °C. Plyn prochází přes cyklon, kde je odloučena většina tuhých částic, a pokračuje do spalovací komory. Ve spalovací komoře surový plyn shoří za teplot přibližně 1200 °C a vzniklé spaliny jsou využívány pro ohřev pyrolýzního reaktoru a v kotli na odpadní teplo. [5]



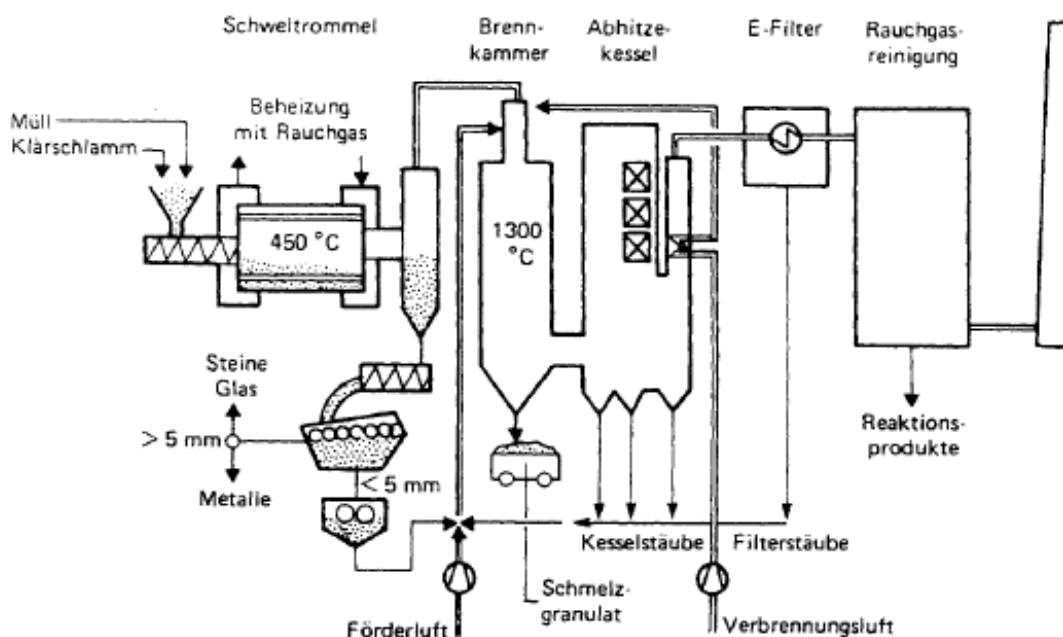
Obr. 4: Pyrolýzní jednotka Babcock [5]

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

Schwell-Brenn-Verfahren

Pilotní zařízení bylo instalováno roku 1988 v německém Ulm-Wieblingenu společností Siemens a v letech 1995-1998 byla provozována jednotka ve Fürthu, která byla nakonec kvůli provozním problémům odstavena. Celkové investiční náklady na pyrolýzní jednotku SBV ve Fürthu se vyšplhaly na 130 mil. euro. [41]

K nízkoteplotní pyrolýze se využívá rotační pec zahřívána na 450 °C s kapacitou 100 tisíc tun odpadu ročně. Zařízení je navrženo ke zpracovávání drceného směšného odpadu a čistírenských kalů až do 25 % hm. Z tuhého zbytku se oddělí sklo a kovy a vyčištěný zbytek je společně se syntézním plynem spalován ve spalovací komoře při teplotě okolo 1300 °C. Spaliny jsou vedeny do odlučovače popílku a dále čištěny. [47]



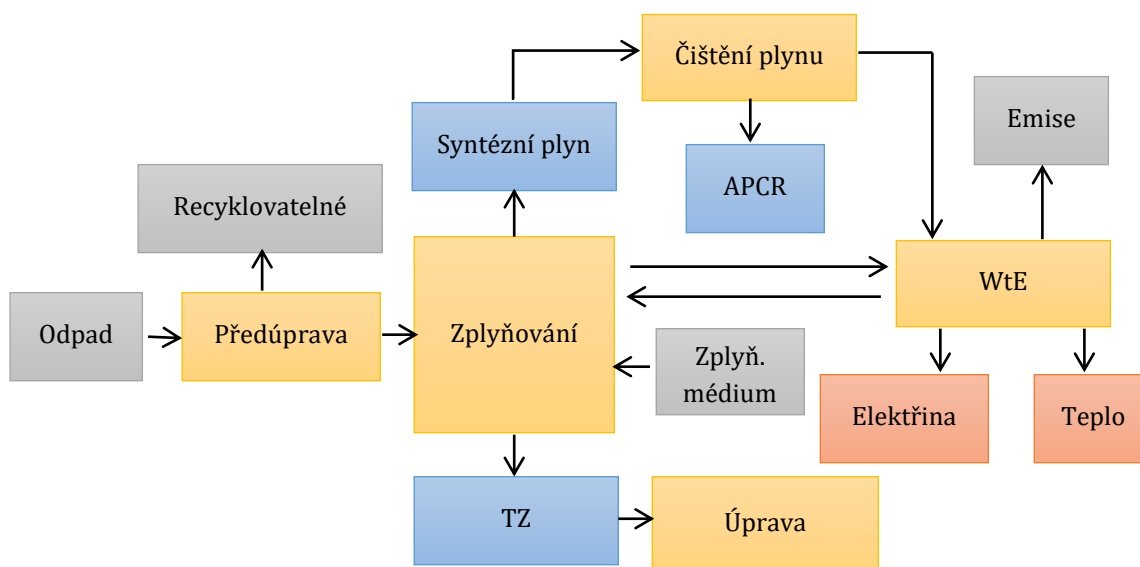
Obr. 5: Proces SBV [47]

3.2 Zplyňování

Zplyňování je v podstatě přeměna uhlíkatých materiálů na syntézní plyn a může být definována jako částečná oxidace, kdy přítomnost oxidačního činidla je nižší než pro stechiometrické spalování. Část paliva je tedy spalována a poskytuje energii potřebnou pro zplynění zbytku (autotermní zplyňování) nebo je potřebné teplo přiváděné externě (alotermní zplyňování), což se využívá u plazmového zplyňování. Během zplyňování nevznikají spaliny ale syntézní plyn – organické složky odpadu jsou přeměněny převážně na oxid uhelnatý, vodík a metan.

Zplyňování pevného odpadu probíhá při teplotách nad 600 °C, přesná teplota záleží na typu reaktoru a vlastnostech odpadu. Různé typy zplyňování odpadu se mohou rozlišovat podle zplyňovacího média – proces může probíhat částečnou oxidací se vzduchem, vzduchem obohaceným o kyslík nebo čistým kyslíkem, dále se může jednat o zplyňování parou nebo o plazmové zplyňování. Částečnou oxidací se vzduchem vzniká plyn s vysokým podílem dusíku (až 60%), který má výhřevnost 4 až 7 MJ/m³. Při použití směsi vzduchu a kyslíku jako zplyňovacího média se využívá obsah kyslíku větší než 21 až 50 %. Vzniklý plyn má nižší obsah dusíku a díky tomu vyšší výhřevnost. Při částečné oxidaci čistým kyslíkem je syntézní plyn téměř bez dusíku a výhřevnost se pohybuje mezi 10 a 15 MJ/m³. Dodatečné náklady na výrobu kyslíku jsou ale značné a mohou tvořit více než 20 % z celkové výroby elektřiny [39]. Zplyňováním parou má za následek vyšší obsah vodíku a nízký podíl dusíku v syntézním plynu, čímž se jeho výhřevnost zvýší na 15 až 20 MJ/m³. V takovém případě zplyňování nezahrnuje exotermní reakce a proces vyžaduje externí zdroj energie. [13]

V případě plazmového zplyňování je zdrojem tepla jeden nebo více plazmových hořáků, který vytváří elektrický oblouk a produkuje plazmový plyn s velmi vysokou teplotou. Plazmové zplyňování je proto vhodné pro různé druhy odpadu s minimální potřebou jeho předúpravy. [13]



Obr. 6: Energetické využití odpadu zplyňováním [20]

3.2.1 Procesy při zplyňování

Během zplyňování dochází k několika termochemickým procesům, které na sebe navazují časově i prostorově. U reaktorů s pevným ložem je možné tyto fáze rozlišit, u fluidních reaktorů ale probíhají současně všechny fáze zplyňování.

Tab. 8: Reakce probíhající při zplyňování [13]

Oxidační reakce		
1	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	-111 MJ/kmol
2	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	-283 MJ/kmol
3	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394 MJ/kmol
4	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	-242 MJ/kmol
5	$C_nH_m + \frac{n}{2} O_2 \leftrightarrow n CO + \frac{m}{2} H_2$	Exotermická
Zplyňovací reakce s vodní parou		
6	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131 MJ/kmol
7	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41 MJ/kmol
8	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2$	+206 MJ/kmol
9	$C_nH_m + n H_2O \leftrightarrow n CO + (n + \frac{m}{2}) H_2$	Endotermická
Zplyňovací reakce s vodíkem		
10	$C + H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75 MJ/kmol
11	$CO + 3 H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-227 MJ/kmol
Zplyňovací reakce s oxidem uhličitým		
12	$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO$	+172 MJ/kmol
13	$C_nH_m + n CO_2 \leftrightarrow 2n CO + \frac{m}{2} H_2$	Endotermická

Sušení

Sušení paliva probíhá při teplotách do 200 °C a jeho cílem je zajistit optimální vlhkost paliva.

Pyrolýza

Probíhá zde termický rozklad paliva na jednotlivé prvky a jednoduché sloučeniny až do teplot okolo 700 °C. Produkty pyrolýzy jsou kapalné, plynné a pevný uhlíkatý zbytek.

Oxidace

Oxidace se uskutečňuje v oblasti přívodu zplyňovacího média. Probíhající oxidační procesy jsou exotermické, takže dodávají teplo potřebné pro endotermické reakce zplyňovacího procesu. Teplota oxidačního pásma se pohybuje v rozmezí 800 až 1500 °C v závislosti na zplyňovacím médiu.

Redukce

Redukcí vznikají spalitelné složky vyráběného plynu. Oxid uhličitý se redukuje na oxid uhelnatý CO a vodní pára na vodík H₂, což popisují Boudouardova rovnice (12) a heterogenní reakce vodního plynu (6). Současně může docházet k reakci uhlíku s vodíkem za vzniku metanu CH₄ (10).

3.2.2 Typy zplyňovacích generátorů

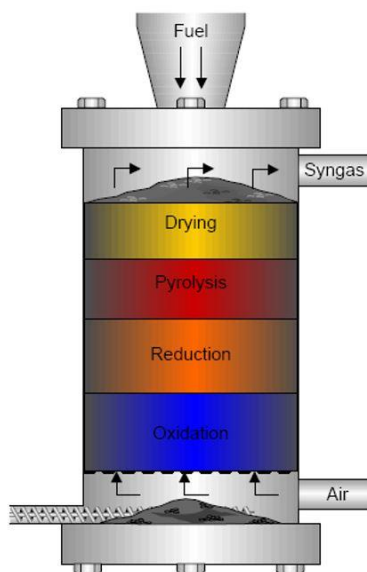
Generátory lze dělit podle nejrůznějších hledisek, například podle druhu použitého zplyňovacího média, podle tlakových poměrů nebo dle konstrukce generátoru. Různá konstrukční provedení generátorů se liší i parametry vyrobeného plynu a mají rozdílné požadavky na použité palivo.

Generátory se sesuvným ložem

Generátory se sesuvným ložem lze dělit podle směru proudu plynu na souproudé, protiproudé nebo generátory s křížovým tokem. Podle směru proudění plynu se rozlišují i generátory updraft se vzestupným prouděním a downdraft s klesajícím prouděním plynu. Vzhledem k přívodu paliva v horní části generátoru lze updraft považovat za protiproudý a downdraft za souproudý generátor. Tyto typy generátorů bývají většinou autotermní, takže teplo potřebné pro zplyňovací proces je dodané spálením části paliva.

Protiproudý reaktor

Jedná se konstrukčně o nejjednodušší typ zplyňovacího generátoru. Palivo je přiváděno v horní části reaktoru a pohybuje se směrem dolů.



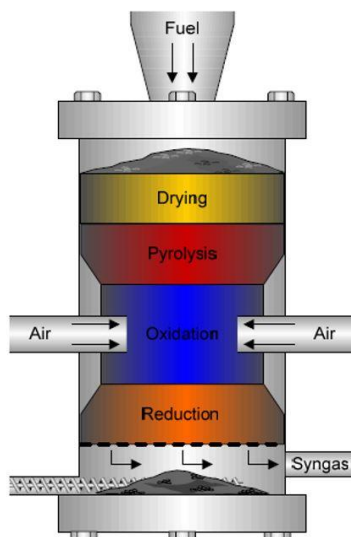
Obr. 7: Protiproudý zplyňovací reaktor [22]

Zplyňovací médium vstupuje do reaktoru v jeho spodní části a vzniklý plyn se pohybuje nahoru proti směru přívodu paliva, a prochází tak pásmem redukce, pyrolýzy a sušení.

K výhodám protiproudého reaktoru patří možnost zplyňovat paliva s vyšším obsahem vlhkosti a velké využití tepla, takže odcházející syntézní plyn má nízkou teplotu. Nevýhodou pak může být přítomnost dehtu v plynu.

Souproudý reaktor

U souproudého reaktoru je nejčastěji přívod paliva v horní části a zplyňovací médium je přiváděno do oxidační zóny nebo nad ní. Produkovaný plyn se odebírá vespod reaktoru, takže plyn proudí ve stejném směru jako palivo. Oproti protiproudému reaktoru se souproudý vyznačuje menší účinností, jelikož syntézní plyn odchází s vyšší teplotou. Plyn na cestě z reaktoru prochází přes pásmo vysokých teplot, což snižuje koncentraci dehtu v plynu.



Obr. 8: Souproudý zplyňovací reaktor [22]

Reaktor s křížovým tokem

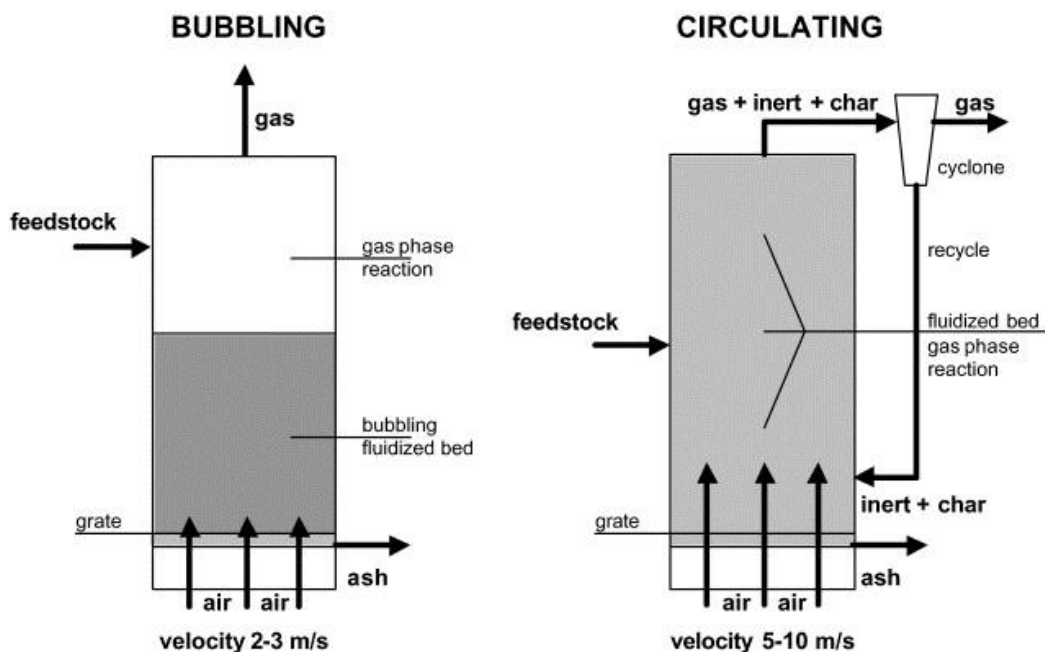
U reaktoru s křížovým tokem je vstup zplyňovacího média a výstup syntézního plynu na opačných stranách ve středu reaktoru. Tento typ reaktoru je méně běžný především kvůli vysoké teplotě, se kterou syntézní plyn odchází, a menší redukci CO₂ v porovnání s ostatními typy reaktorů [36].

Generátory s fluidním ložem

U reaktoru s fluidním ložem se palivo zplyňuje ve vznosu. Zplyňovací médium je přiváděno zespoda skrze lože s inertním materiálem, aby byla překonána prahová rychlost fluidace. Vrstva má poté vlastnosti podobné kapalině. Lože je vyhříváno externě a palivo je přiváděno až s dosažením potřebné teploty, poté nastává rychlé zplynění. Procesy oxidace, redukce a pyrolýzy zde probíhají současně.

Hlavní výhody zplyňovacího generátoru s fluidním ložem jsou možnost zpracovávat palivo s proměnlivou vlhkostí a různým složením a rovnoměrné rozložení teplot v reaktoru. K nevýhodám patří vyšší obsah dehtu v produkovaném plynu a nedokonalé vyhoření uhlíku.

Fluidní generátory se dělí podle rychlosti proudění na generátory se stacionární fluidní vrstvou, u kterých má fluidní vrstva viditelnou hladinu, a na generátory s cirkulující fluidní vrstvou, u těchto generátorů je vrstva ohraničena stropem reaktoru.



Obr. 9: Fluidní zplyňovací reaktory [39]

Plazmové zplyňování

Hlavním rozdílem oproti klasickému zplyňování je teplota. Zatímco u klasického zplyňování je použitá teplota přibližně do 1200 °C, u plazmového zplyňování teplota přesahuje 3000 °C, k čemuž se využívá plazmový hořák. Ten se skládá z grafitových elektrod, mezi nimiž vzniká oblouk, a je zde přiveden plazmový plyn, který se transformuje na plazmu.

Touto technologií se dají využít nejrůznější typy odpadů, ať už se jedná o odpad komunální, nebezpečný nebo čistírenské kaly a popílek ze spaloven.

Při zplyňování se z organických složek stává syntézní plyn, zatímco anorganické látky odchází jako struska, která se vitrifikuje. Plyn se poté zchlazuje a zbavuje nežádoucích příměsí, jako jsou oxidy síry, těžké kovy a prachové částice.

Hlavní výhodou plazmového zplyňování je, že produktem je čistý syntézní plyn vyčištěný od dehtu, nicméně využití plazmy jako jednostupňové konverze odpadu je energeticky náročné. Řada plazmových technologií tak používá plazmu pouze pro vyčištění plynu vzniklého klasickým nízkoteplotním zplyňováním. V takovém případě je spotřeba energie menší a produktem je čistý syntézní plyn, který splňuje požadavky pro použití v plynové turbíně nebo motoru. [42]

3.2.3 Příklady zplyňovacích technologií

Tab. 9: Příklady zařízení na zplyňování odpadu [13]

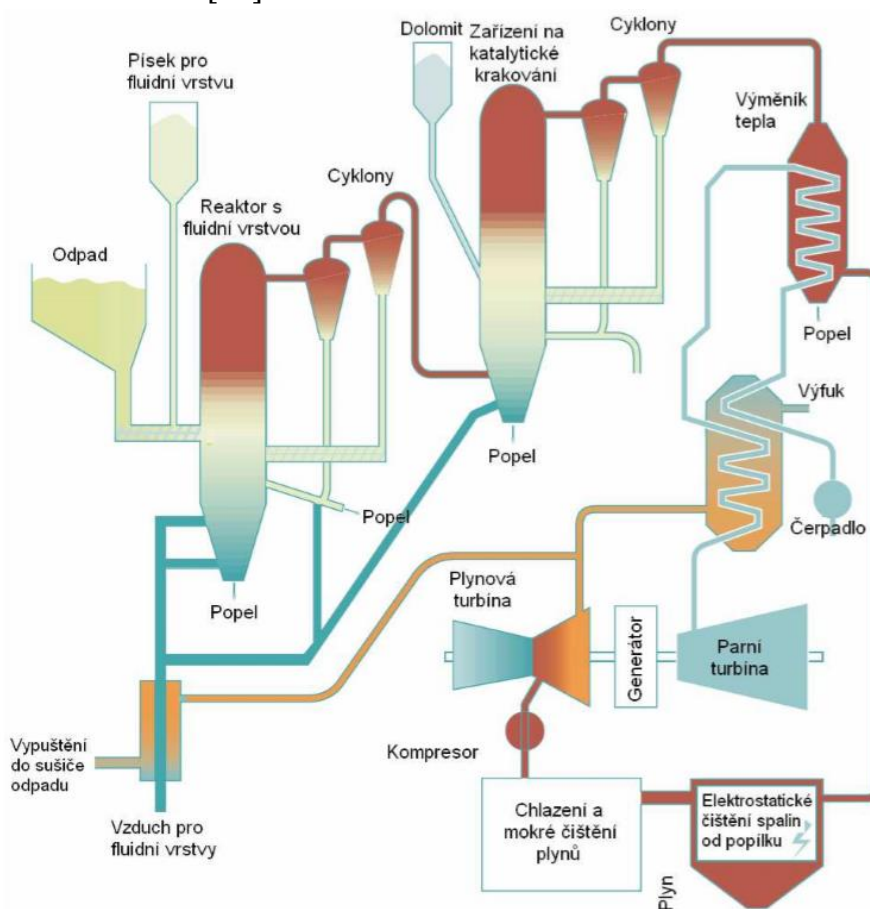
Společnost	Zplyňovací médium	Typ reaktoru	Teplota	Výroba el. energie	Typ odpadu
AlterNRG (Kanada), Westinghouse Plasma Corp., Hitachi Metals (Japonsko)	Plazma		Vysoká	PWG	MSW, RDF
Ebara TIFG (Japonsko)	Vzduch	Cirkulující fluidní vrstva	Nízká	HEG	MSW, MPW, IW
Ebara Co. a Ube Industries Ltd (Japonsko)	Kyslík	Cirkulující fluidní vrstva	Vysoká		MPW
Energos (UK/Norsko)	Vzduch	Pohyblivý rošt	Nízká	HEG	MSW, RDF
Hitachi Zosen (Japonsko)	Vzduch	Stacionární fluidní vrstva	Nízká	HEG	MSW, RDF
JFE (Japonsko), Kawasaki Steel, NKK	Vzduch + O ₂	Souproudý	Vysoká	PWG	MSW, RDF, IW, EW
JFE (Japonsko), Thermosteel (Švýcarsko)	Kyslík	Souproudý	Vysoká	PWG	MSW, RDF
Kobelco (Japonsko)	Vzduch	Stacionární fluidní vrstva	Nízká	HEG	MSW
Mitsui (Japonsko)	Vzduch	Rotační pec	Vysoká	HEG	MSW
Nippon Steel Engineering (Japonsko)	Vzduch + O ₂	Souproudý	Vysoká	HEG	MSW, IW
Plasco Energy Group (Canada)	Plazma		Vysoká	PWG	MSW, RDF
Takuma (Japonsko)	Vzduch	Rotační pec	Vysoká	HEG	MSW

Zplyňovací technologie se mohou lišit typem reaktoru, použitou teplotou, zplyňovacím médiem a dalšími kritérii. Příklady konkrétních zařízení a jejich zplyňovací technologie jsou popsány v tabulce 9.

V tabulce je rozlišeno zplyňování s nízkou teplotou (pod 900 °C) a vysokou teplotou (typicky nad 1200 °C). Zkratka HEG (Heat Gasifiers) představuje zplyňovací technologie, během nichž dochází ke spalování nevyčištěného syntézního plynu v kotli s produkcí tepla případně elektřiny. O PWG (Power Gasifiers) se jedná v případě, kdy je syntézní plyn nejdříve zchlazen a vyčištěn, a až poté se spaluje ve spalovacím motoru nebo plynové turbíně.

TPS

V následujícím schématu je zobrazen integrovaný kombinovaný cyklus zplyňování společnosti TPS. Pro zlepšení kvality syntézního plynu jsou zařazeny v sérii dva fluidní zplyňovací reaktory, přičemž ve druhém je použit jako katalyzátor dolomit. Syntézní plyn z prvního reaktoru může obsahovat dehet a zuhelnatělé zbytky, které jsou zplyněny v druhém reaktoru. [29]



Obr. 10: Schéma TPS [29]

Energos

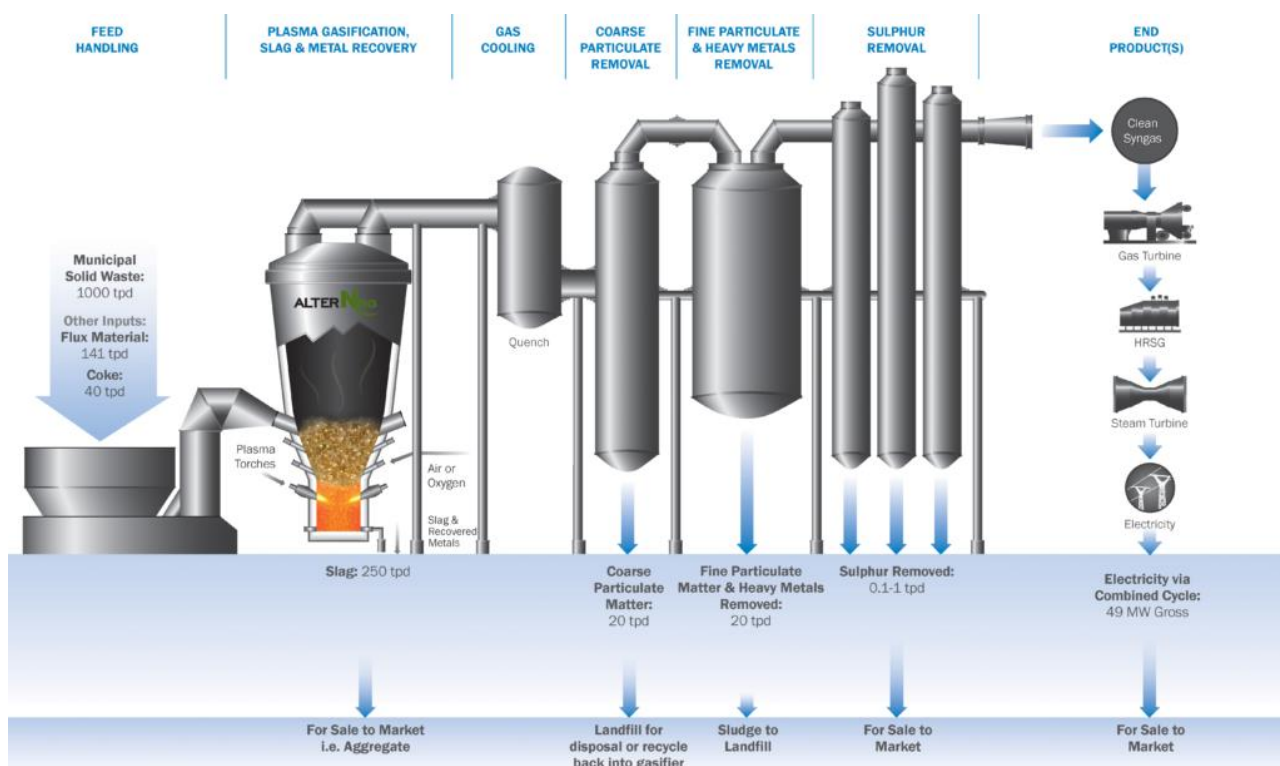
Společnost Energos nabízí menší modulární zplyňovací zařízení především pro lokální využití. Pro zplynění odpadu je nutné jej upravit na požadovaný rozměr a vytrít železné kovy k recyklaci, odpad pokračuje do zplyňovacího reaktoru a sekundární komory, kde probíhá vysokoteplotní spalování. Spaliny jsou využity v HRSG pro výrobu páry a čištěny suchou metodou přidáním vápence a aktivního uhlí. Technologie Energos je možné použít ke zplyňování biomasy a komunálního i průmyslového odpadu.

Alter NRG

Zařízení plazmového zplyňování společnosti Alter NRG může zpracovávat různé odpady jako průmyslový odpad, biomasu, zdravotnický, nebezpečný nebo komunální odpad atd. Plazmové hořáky pro zplyňovací reaktor jsou dodávány společností Westinghouse Plasma Corp.

Ve zplyňovacím reaktoru probíhá pomocí plazmových hořáků zplyňování za velmi vysokých teplot a vzniká syntézní plyn. Čištění syntézního plynu je přizpůsobeno požadavkům jeho dalšího využití – použití v plynovém motoru, turbíně, přeměna na paliva apod. Při spalování komunálního odpadu se proces čištění plynu skládá nejčastěji z odstranění prachových částic, síry a těžkých kovů a vysoké teploty v reaktoru zajišťují úplné odstranění dehtů. Syntézní plyn odchází ze zplyňovacího reaktoru při teplotě 950 °C a struska má na výstupu teplotu 1650 °C.

V současnosti probíhá výstavba čtvrté generace zplyňovacích jednotek na projektu Tees Valley. [43]

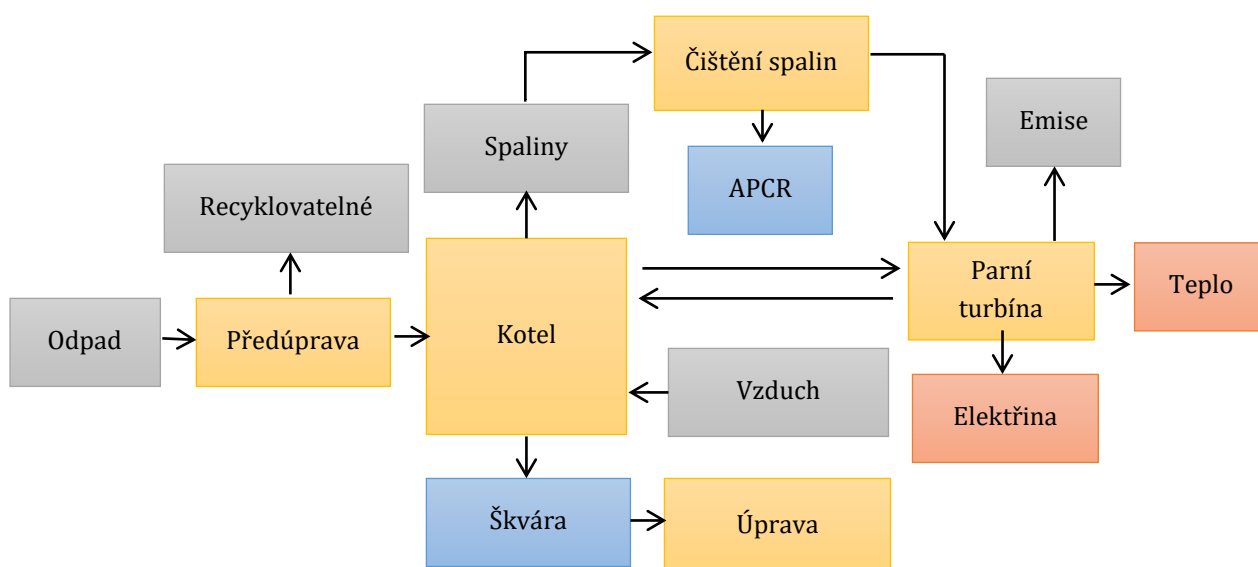


Obr. 11: Plazmová zplyňovací jednotka Alter NRG [43]

3.3 Spalování

Cílem spalování odpadů je redukovat jejich objem, odstranit nebezpečné vlastnosti a získat energii, která je obsažená v odpadech. Spalovat tuhé odpady bez využití přídatného paliva lze pro odpady s výhřevností nad $5\,000\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Pro spalování musí mít palivo obsah popelovin menší než 60 %, obsah vlhkosti pod 50 % a obsah prchavé hořlaviny větší než 25 %. Pro spalování je potřeba zahřát palivo nad teplotu vznícení, zajistit dobrý přístup vzduchu a dostatečnou teplotu a dobu setrvání pro dokonalé vyhoření paliva. Velikost částic odpadu určuje potřebnou dobu setrvání ve spalovací komoře.

U spalování uhlí se přebytek vzduchu pohybuje mezi 20 až 25 %, u spalování odpadu je kvůli jeho různorodosti potřeba přebytek spalovacího vzduchu i vyšší (v rozmezí 1,5 až 2,5). Přívod spalovacího vzduchu je postupný; primární vzduch je odsáván ze zásobníku odpadu a je přiváděn pod roštem, čímž dochází k chlazení roštnic. Vzduch sekundární je přidáván do spalovací komory a zajišťuje dohoření a promíchání spalin.



Obr. 12: Energetické využití odpadu spalováním [20]

Pro dobré vyhoření musí být spaliny vznikající při procesu ohřáty po posledním přívodu spalovacího vzduchu na teplotu nejméně $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu minimálně dvou sekund. Každá linka spalovacího zařízení proto musí být vybavena nejméně jedním hořákem, který se automaticky zapne, pokud teplota odpadního plynu po posledním přívodu spalovacího vzduchu klesne pod stanovenou teplotu. Hořák musí být využíván během uvádění zařízení do provozu a jeho odstavování.

Při spalování vznikají spaliny, jejichž hlavními složkami jsou vodní pára, oxid uhličitý, dusík a kyslík. V závislosti na složení odpadu a provozních podmínkách vzniká i CO, HCl, HI, HBr, SO₂, PCDD/F, PCB a sloučeniny těžkých kovů.

Během spalování komunálního odpadu vzniká škvára, která je přibližně 10 % objemových a 20 až 30 % hmotnostních spalovaného tuhého odpadu. V prvním stupni čištění spalin je v elektrostatických odlučovačích ze spalin separován popílek (přibližně 2 % hm.) a během druhého stupně čištění spalin vzniká odpadní produkt, tzv. end-

produkt (APCr) (také přibližně 2 % hm.). End-produkt je dávkován do míchačky solidifikační linky nebo upraven stabilizací a následně použit při rekultivacích. [18]

Vlastnosti tuhých zbytků se liší dle typu spalovaného odpadu a provozních podmínek. Ze škváry se separují k dalšímu použití kovy, například v zařízení SAKO Brno činilo za rok 2015 množství vytríděných železných kovů 4 299 tun (7,7 % z celkové hmotnosti škváry) a neželezných kovů 178 tun (0,3 % z celkové hmotnosti škváry) a škvára ze zařízení SAKO Brno se využívá pro technické zabezpečení skládek. [19]

3.3.1 Procesy spalování

Nejdříve dochází k vysoušení a ohřevu odpadu na zápalnou teplotu, což je realizováno sáláním z dalších fází spalování a spalinami nebo vzduchem přiváděným pod rošt, který je ohřátý na teplotu okolo 100 °C.

Sáláním plamene a klenby spalovacího prostoru se odpady dále zahřívají, odplyňují a vznikají hořlavé těkavé látky. Nejdříve dochází k hoření prchavé hořlaviny, tuhý materiál je odplyňován a po dosažení zápalné teploty dochází k hoření vrstvy tuhé hořlaviny.

Při hoření plynů i tuhé hořlaviny narůstá teplota na cca 1200 °C a vysokým přebytkem vzduchu se udržuje pod bodem tání popela. Vzniklé teplo je odvedeno spalinami a v loži vzniká škvára a popel. [11]

3.3.2 Typy spalovacích zařízení

Roštové kotle

Spalovny využívající roštové ohniště tvoří nejvíce rozšířený typ spaloven komunálního odpadu v Evropě. Rošt slouží k dopravě odpadu, vytváří požadovanou výšku vrstvy, umožňuje postupné vysoušení, zahřátí a hoření odpadu a zajišťuje odvod tuhých zbytků. Pod roštem je přiváděn primární vzduch, který zároveň chladí roštnice, a sekundární vzduch je přiváděn do prostoru nad lože. Doba setrvání odpadu na roštu je nanejvýš hodina. Spalovny mohou být řešeny kontinuálním přívodem odpadu s mechanickými rošty nebo jako diskontinuální s pevným roštem. K výhodám roštového kotle patří nižší nároky na předúpravu odpadu.

Vratisuvný rošt MARTIN

Jedná se o rošt skloněný směrem k výsypce, střídají se zde nepohyblivé a pohyblivé roštnice, které se posouvají proti toku paliva. Nová vrstva odpadu je přivedena na dohořívající vrstvu, což roštnice chrání před nadměrným tepelným namáháním.

Vratisuvný rošt typu MARTIN je ve spalovnách často využívaný (např. SAKO Brno) a je vhodný ke spalování komunálních odpadů s výhřevností maximálně 20 MJ/kg.

Válcový rošt

Jedná se o rošt tvořený sérií válců, které se pohybují ve směru toku paliva a vrstva odpadu se po nich posouvá. Do válců se přivádí vzduch, který je dále distribuován do vrstvy otvory ve válci, každý válec má vlastní regulaci. Je využíván ve spalovnách komunálního odpadu, např. ZEVO Malešice.

Fluidní kotle

Spalovny s fluidním ložem se používají především pro spalování homogenních paliv – čistírenských kalů, biomasy apod. Při použití fluidního kotle pro spalování komunálního odpadu je potřeba jeho předúprava, zejména separace inertních materiálů a drcení na požadovaný rozměr.

Palivo je ve fluidním kotli spalováno ve vznosu a probíhá zde současně sušení, odplynění a hoření odpadu a teplota se většinou pohybuje do 950 °C. Předehřátý vzduch se přivádí zespoda skrze lože s inertním materiálem a musí překročit prahovou rychlost fluidace. Před vstupem odpadu se pro zahřátí fluidního lože na provozní teplotu využívají hořáky.

Fluidní lože se podle rychlosti vzduchu rozlišuje na lože se stacionární nebo cirkulační fluidní vrstvou. Stacionární fluidní vrstva bývá využívána pro spalování čistírenských nebo průmyslových kalů, např. z petrochemického průmyslu. Cirkulační lože je vhodné zejména pro spalování vysušených čistírenských kalů s vysokou výhřevností. [12]

Tab. 10: Srovnání spalování na roštovém a fluidním loži [10]

	Roštové kotle	Fluidní lože
Předúprava	Není potřeba	Je dobré palivo homogenizovat, nutné drcení
Přídavné palivo	Potřeba jen pro start	Odpad je často míchán s uhlím, pro start je nutné další palivo
Míchání během spalování	Mechanické rošty palivo dobře promíchají, míchání napomáhá i sekundární vzduch nad roštem	Dobré promíchání díky fluidaci
Tvorba popílku	Množství popílku je malé	Produkce popílku je 3-4 x vyšší
Spouštění a vypínání	Nepřetržitý provoz zařízení, spouštění zařízení zvyšují emise znečišťujících látek	Libovolné
Údržba	Provozní doba je většinou nad 8000 hod	Zařízení vyžaduje pravidelnou údržbu, provozní doba je 6000 až 8000 hod

Rotační pece

Rotační pece mohou sloužit ke spalování téměř všech odpadů, tuhých i kapalných. Navíc mají menší požadavky na předúpravu paliva a zajišťují dobré promíchání odpadu. Spalování v rotačních pecích většinou probíhá při teplotách nad 850 °C, pro nebezpečné odpady se teploty pohybují mezi 900 až 1200 °C.

Rotační pec je složena z mírně nakloněného válce, který se otáčí okolo vodorovné osy. Doba setrvání odpadu v peci je dána jejím sklonem a otáčkami a většinou se pohybuje mezi 30 až 90 minutami.

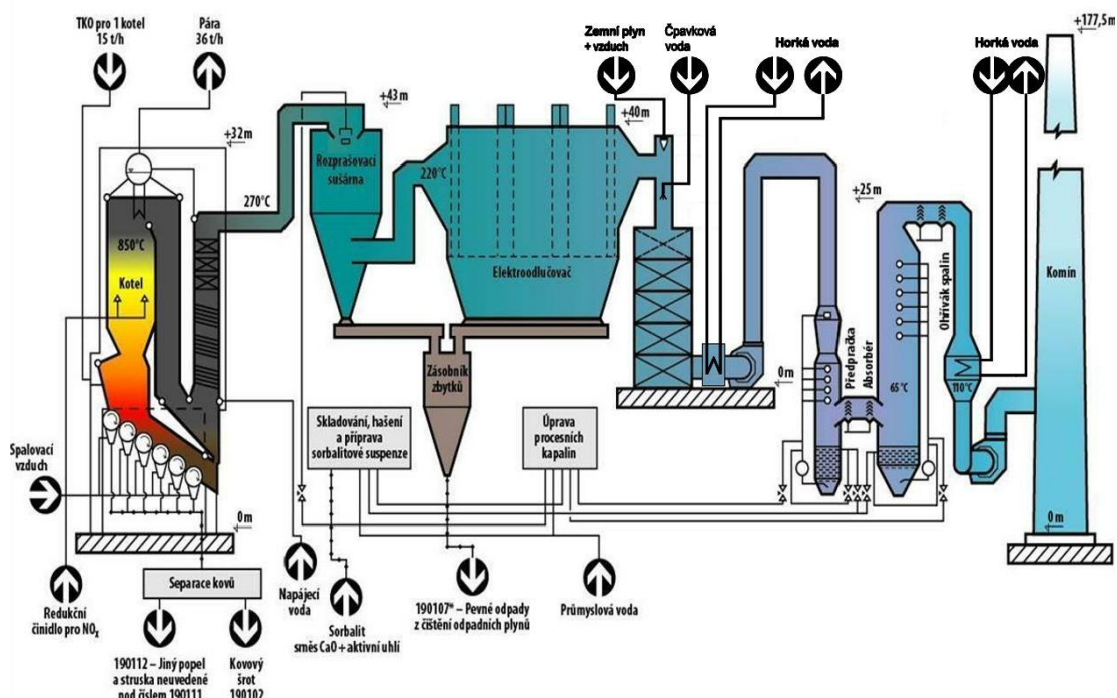
Pro dokonalé vyhoření a odbourání organických sloučenin se může za rotační pec zařadit dohořivací komora, kam se vstřikuje sekundární spalovací vzduch.

3.3.3 Příklady spalovacích zařízení

ZEVO Malešice

Zařízení na energetické využití odpadů Malešice zpracuje ročně 210 tisíc tun tuhého komunálního odpadu a redukuje ho na 10 % původního objemu. Vzniklá škvára je využitelná pro stavební účely. Zařízení má čtyři třítahové kotle s válcovými rošty o kapacitě 15 t odpadu za hodinu. [27]

Čištění spalin probíhá nejdříve v rozprašovací sušárně, kde je do proudu spalin rozprašována upravená odpadní suspenze z pračky a absorbéru, dále spaliny pokračují do elektrofiltru, kde je odloučen prach. V pračce jsou spaliny promývány vápennou suspenzí a odlučují se zde těžké kovy a zbytky prachu a v absorbéru jsou odloučeny zbytky HCl, HF a SO₂.



Obr. 13: ZEVO Malešice [27]

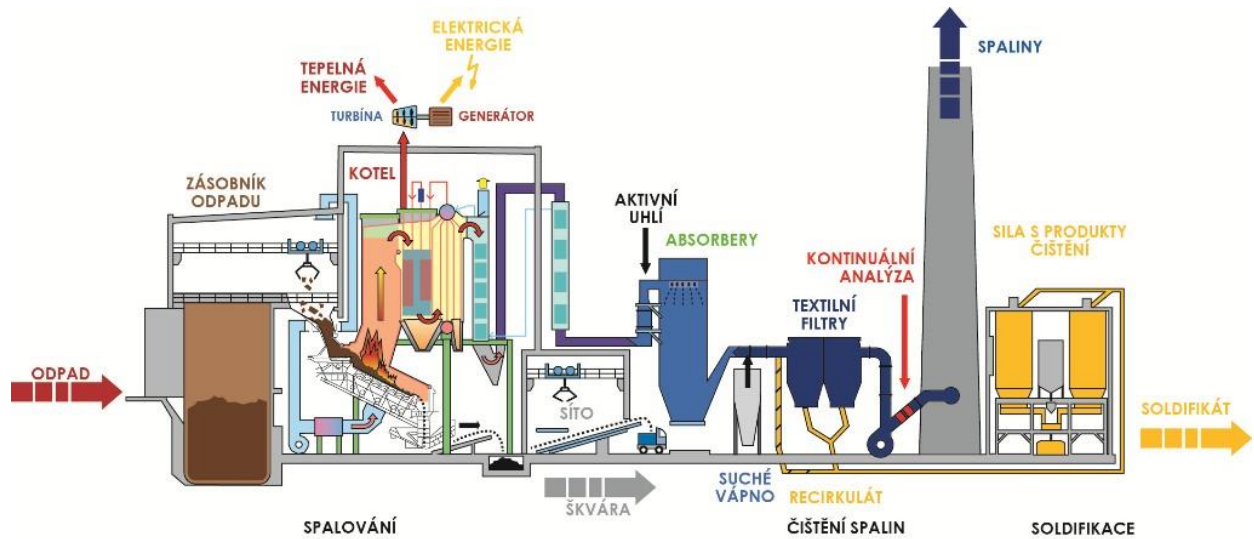
SAKO Brno

Zařízení na energetické využívání odpadu SAKO Brno zahrnuje dva pětítahové kotle s vratisuvnými rošty typu MARTIN, kde odpad setrvá asi 20 minut. Škvára vzniklá spalováním odpadu padá do mokrého vynašeče a přes vibrační třídič pokračuje do zásobníku škváry. Ze škváry je separováno železo a škvára dále slouží k technickému zabezpečení skládek nebo se ukládá na skládky k tomu určené.

Přeměna na mechanickou práci je realizována v parní odběrové kondenzační turbíně, která se skládá z vysokotlakého a nízkotlakého dílu.

Čištění spalin probíhá v pěti navazujících stupních. První stupeň čištění spalin zajišťuje redukcí oxidů dusíku a je instalován ve spalovací komoře, kam se vstříkuje 40 % roztok močoviny. Druhý stupeň představuje adsorpci těžkých kovů a PCDD/F. Třetím stupněm čištění spalin je nástřik vápenné suspenze v adsorbérech do proudu spalin, čtvrtý stupeň

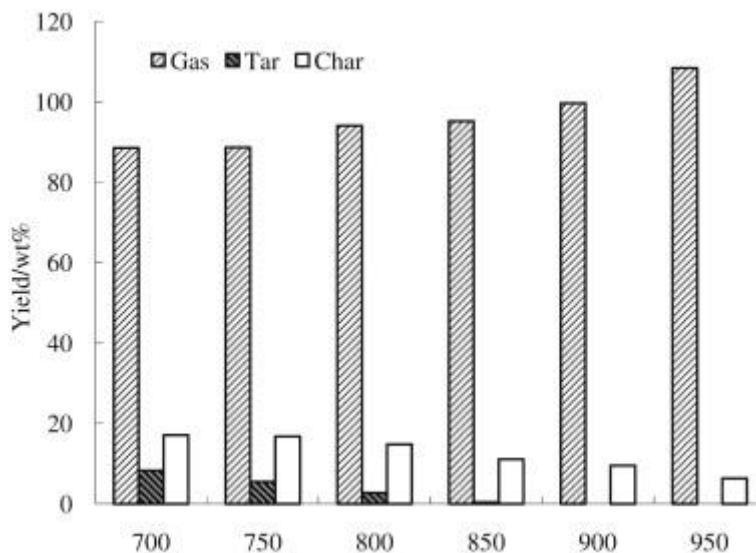
se uplatní v případě zvýšené koncentrace kyselých složek ve spalinách a spočívá v přidání suchého hašeného vápna do spalin. Posledním stupněm jsou textilní filtry odlučující pevné částice. Produkt po čištění spalin je potřeba před uložením na skládku upravit solidifikací. [26]



Obr. 14: SAKO Brno [26]

4 Syntézní plyn

Během zplyňování a pyrolýzy odpadů vzniká jako produkt syntézní plyn. Jeho výtěžnost a složení záleží na typu odpadu a pracovních podmínkách, jako je teplota, přebytek vzduchu, použití katalyzátorů apod. Výtěžnost plynu obecně roste se zvyšující se teplotou, příkladem je výtěžnost produktů fluidního zplyňování MSW parou s použitím katalyzátoru NiO/ γ -Al₂O₃ v závislosti na teplotě [32].



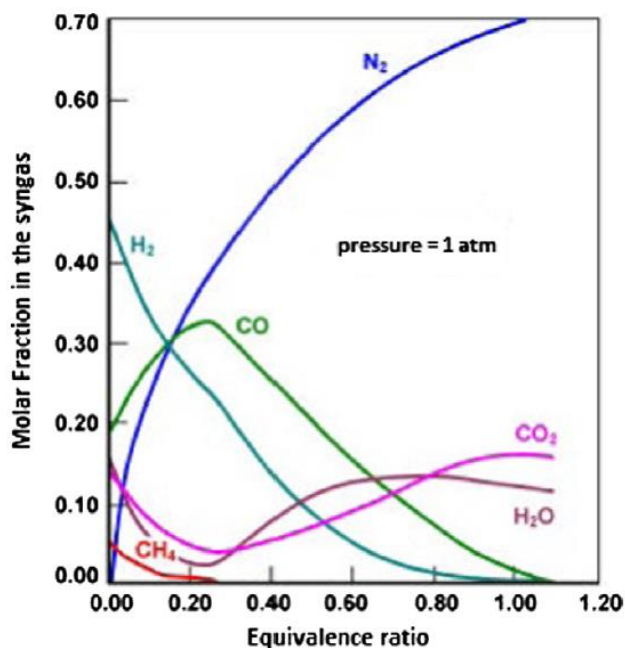
Graf 7: Výtěžnost produktů zplyňování v závislosti na teplotě [32]

4.1 Složení

Syntézní plyn obsahuje kromě výhřevných plynů CO, H₂ a CH₄ i plyny balastní jako jsou CO₂, N₂ a vodní pára, dalšími složkami plynu mohou být sloučeniny S, Cl, N, dehet a další. Složení plynu je závislé jak na vlastnostech tuhého paliva, tak i na provozních podmínkách reaktoru a zplyňovacím médiu a výhřevnost plynu se pohybuje mezi 3 až 20 MJ/m³ [13].

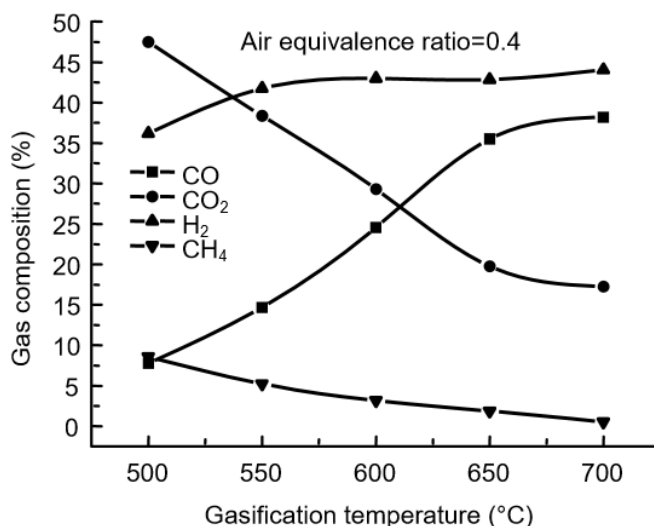
Zplyňování i pyrolýza probíhají v redukčním prostředí, které snižuje tendence k tvorbě dioxinů a oxidů dusíku. Syntézní plyn ovšem může obsahovat amoniak, který při spalování může vést k vyšší koncentraci oxidů dusíku, a je tudíž třeba tyto oxidy ze spalin odstranit. [41]

K důležitým provozním parametrům majícím vliv na složení syntézního plynu patří ekvivalentní poměr. Jedná se o poměr mezi množstvím kyslíku použitého k procesu a množstvím pro stechiometrické spalování. Hodnoty blízké nule odpovídají pyrolýze, zatímco hodnoty rovny nebo vyšší než jedna charakterizují spalování. V následujícím grafu je zachyceno složení syntézního plynu při zplyňování dřevní biomasy při atmosférickém tlaku.



Graf 8: Závislost složení syntézního plynu na ekvivalentním poměru [13]

Složení syntézního plynu se mění také v závislosti na teplotě zplyňování (viz graf 9). Koncentrace vodíku se při zplyňování MSW vzduchem pohybuje v rozmezí 35 až 45 %; jeho obsah se zvyšuje především s rostoucí zplyňovací teplotou z 500 na 550 °C, dále je jeho množství spíše konstantní. Naproti tomu množství CH₄ s rostoucí teplotou klesá. Koncentrace oxidu uhelnatého se s rostoucí zplyňovací teplotou zvyšuje a zároveň klesá odpovídajícím způsobem CO₂. [24]



Graf 9: Složení syntézního plynu v závislosti na teplotě [24]

4.2 Využití

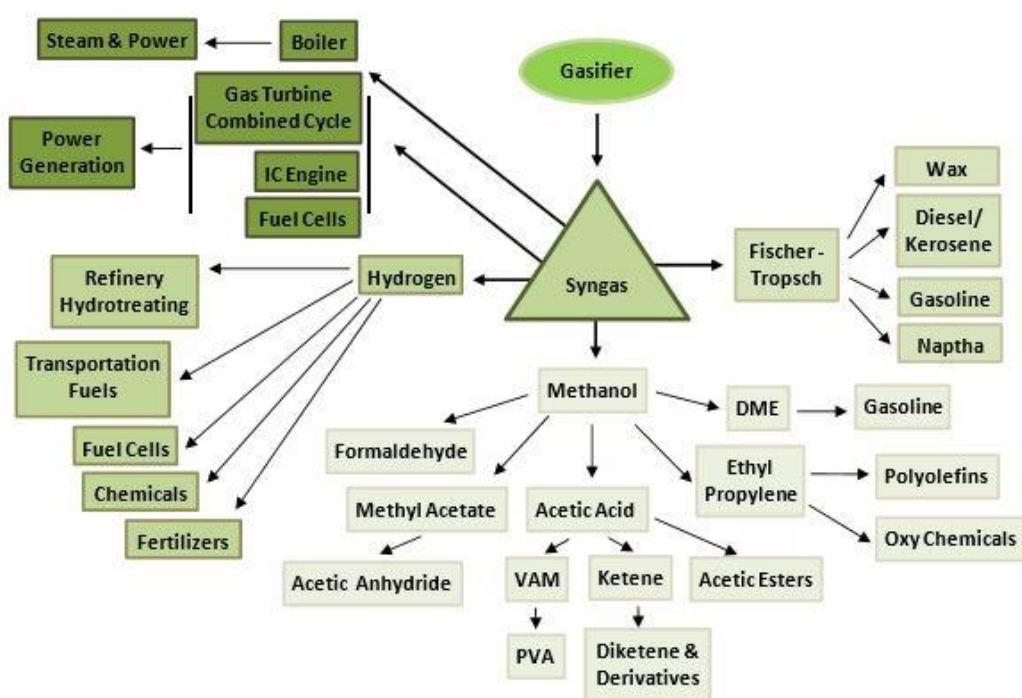
Syntézní plyn může být použit k produkce elektrické energie, jak je popsáno v kapitole 5.6, nebo k výrobě paliv a chemikálií.

Vyrobený syntézní plyn je potřeba zbavit znečišťujících látek, které lze dělit do dvou skupin. První skupina obsahuje složky jako je prach nebo dehet, jejichž množství lze

ovlivnit provozními podmínkami a typem zplyňovacího generátoru, druhou skupinu tvoří složky závislé na složení původního paliva. Nároky na úroveň čištění plynu se liší podle následné technologie využití plynu a jedná se zejména o odstranění pevných částic, sloučenin síry, dusíku, halogenů a alkalických kovů.

Eliminovat nežádoucí látky v produkovaném plynu lze pomocí primárních opatření, což jsou metody uplatňující se přímo v reaktoru, například změna teploty či tlaku, použití vhodného zplyňovacího média a přidání vhodných katalyzátorů. Při sekundárním opatření je použito navazujících technologií, jako jsou filtry, cyklony, mokré vypírky apod.

Syntézní plyn může být přeměněn chemickou syntézou na kapalná paliva nebo může být využit k výrobě vodíku a methanolu, ze kterého dále vznikají chemikálie jako je ethanol, formaldehyd a další [36]. U některých reakcí (např. syntéza methanolu) je potřeba upravit poměr CO a H₂ v syntézním plynu



Obr. 15: Využití syntézního plynu [36]

5 Porovnání

5.1 Zkušenosti s provozem

Jedním z kritérií pro porovnání technologií pro energetické využívání odpadu jsou zkušenosti s provozem dané technologie; osvědčené technologie by měly dosahovat požadovaných parametrů v průběhu dlouhodobého provozu komerčních jednotek. Jiným přístupem může být podpora inovací, kdy je nutné počítat s riziky technologie méně osvědčené.

Tato kapitola obsahuje přehled významnějších realizací pyrolýzních, zplyňovacích a spalovacích zařízení pro energetické využití odpadu, zároveň pak zařízení využívající kombinaci těchto procesů.

Tab. 11: WtE zařízení pro zpracování MSW v Evropě v letech 2011-2012 [28]

Typ	Počet jednotek
Spalovna s posuvným roštem	329
Spalovna s fluidním ložem	38
Spalovna s pevným roštem	22
Spalovna s rotační pecí	28
Pyrolýzní jednotka	2
Zplyňovací jednotka	3

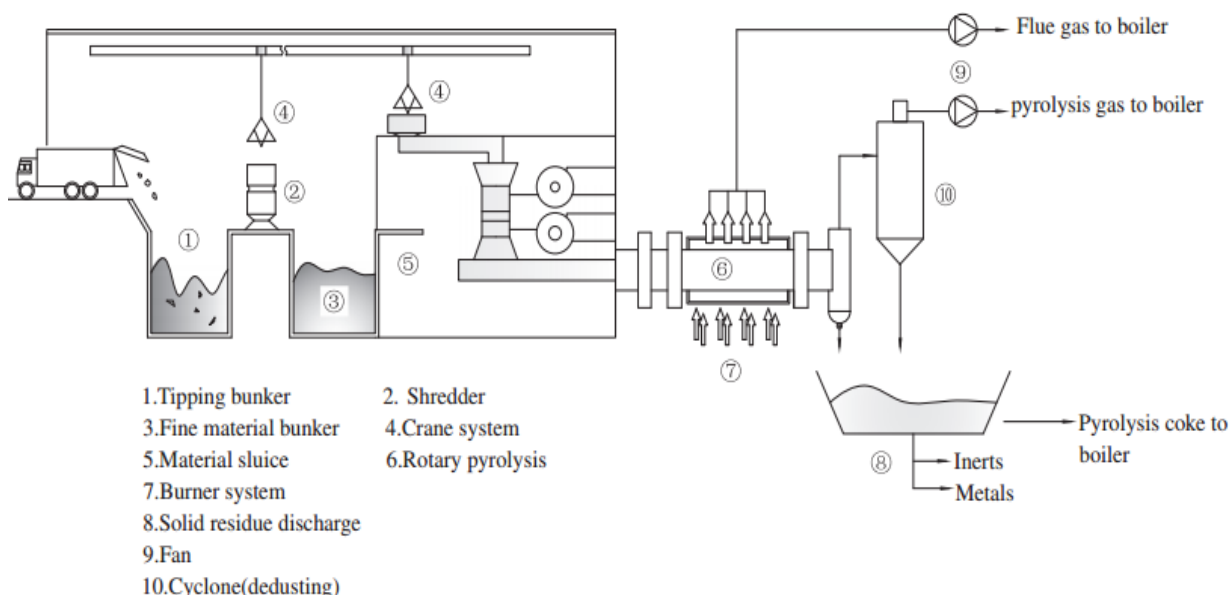
Zařízení pro pyrolýzu odpadů

Společnost Siemens vyvinula pyrolýzně – spalovací proces Schwel-Brenn-Verfahren (SBV), jehož realizaci představovala jednotka postavena v 90. letech ve Fürthu. Zařízení bylo navrženo pro zpracování nízkohodnotného odpadu s kapacitou 100 kt/rok v rotační peci, ale kvůli přetrvávajícím problémům bylo i přes několik procesů optimalizace odstaveno. Problémy představovaly především zařízení pro úpravu plynu, dávkovací systém a ohřev rotační pece.

Pyrolýzním zpracováním odpadu se věnuje i společnost TechTrade, příkladem realizace je jednotka postavena v Burgau. Jedná se o rotační pec se zpracovatelskou kapacitou 6 tun odpadu za hodinu zpracovávající RDF a kaly, k výrobě elektrické energie se využívá parní turbína.

Babcock Krauss-Maffei Industrieanlagen (BKMI) instalovala roku 1984 zařízení na pyrolýzu v německém Günzburgu, které bylo určeno pro zpracování komunálního a průmyslového odpadu. Zařízení se skládalo ze dvou linek s kapacitou 3 t/h a samotná pyrolýza probíhala v teplotním rozmezí 400 až 600 °C s přidáním vápna. S uvedením jednotky do provozu se vyskytly provozní problémy, které vedly ke konstrukčním úpravám.

Zařízení RWE-ConTherm v německém městě Hamm využívalo jako pyrolýzní reaktor rotační pec a vzniklý plyn a polokoks se spaloval v konvenčním kotli. Zařízení není v provozu od prosince roku 2009, kdy došlo k pádu komínu. Nehoda byla způsobena vstupním odpadem, jehož složení nevyhovovalo navrhovaným parametrům, a provozní teplota tak vzrostla nad přípustnou mez. Schéma procesu ConTherm je zobrazeno na následujícím obrázku. [8]



Obr. 16: Schéma RWE-ConTherm [8]

Podle [41] bylo od roku 1971 realizováno 20 významnějších pyrolýzních jednotek na zpracování odpadů, z nichž nejzajímavější je realizace jednotky SBV ve Fürthu, která sloužila k produkci elektrické energie a výrobě syntézního plynu pro chemické účely. Jednotka byla odstavena v roce 1988 a později technologii Siemens SBV převzala společnost Mitsui, která realizovala několik zařízení založených na tomto procesu v Japonsku. Většina realizovaných jednotek pro pyrolýzu odpadu byla odstavena, příkladem stále provozovaných jednotek ale může být BKMI v Günzburgu zpracovávající zbytky z kožedělného průmyslu nebo pyrolýza čistírenských kalů ve Füssenu. [41]

Zařízení pro zplyňování odpadů

V Evropě a Americe jsou hlavní provozní zkušenosti se zplyňováním založeny na dvoustupňovém zplyňování, tzn. zplynění a následné spálení syntézního plynu v kotli. Příkladem může být technologie společnosti Energos, která slouží ke zplyňování biomasy a komunálního i průmyslového odpadu. Instalováno je 5 jednotek v Norsku a po jedné v Německu a Velké Británii. Několik zplyňovacích jednotek Energos s kapacitou téměř 150 tisíc tun za rok jsou nyní ve Velké Británii ve výstavbě a další se projektují.

Tab. 12: Zplyňovací zařízení společnosti Energos [44]

	Lokalita	Začátek provozu	Kapacita [t/rok]
Averøy	Norsko	2000	30 000
Hurum	Norsko	2001	39 000
Minden	Německo	2001	39 000
Forus	Norsko	2002	39 000
Sarpsborg 1	Norsko	2002	39 000
Isle of White Plant	Velká Británie	2009	30 000
Sarpsborg 2	Norsko	2010	78 000

Dalším příkladem zplyňovacího procesu s následným spalováním plynu v kotli je realizace společnosti Foster-Wheeler ve finském Varkaus, kde byla postavena zplyňovací jednotka na biomasu s fluidním zplyňovacím generátorem. Ve Finsku dále instalovala společnost Metso jednotku pro fluidní zplyňování v Lahti, kde dochází nejdříve k čištění plynu, který je spalován v kotli.

Ve Schwarze Pumpe bylo roku 2000 instalováno zařízení pro zplyňování odpadu, vstupní surovinou byly především pelety TAP, biomasa, dehtové zbytky apod., jejichž zplyňování probíhalo obvykle s uhlím v poměru odpad/uhlí 4:1. Použit byl zplyňovací generátor LURGI s pevným roštem a jako zplyňovací plyn sloužil kyslík. Jednotka je od roku 2007 mimo provoz. [41]

Firma Thermostelect vyvinula proces pyrolýzy s navazujícím zplyňováním, který je blíže popsán v kapitole 3.1.4. Demonstrační jednotka byla provozována ve Fondotoce, komerční jednotka pak byla realizována v Karlsruhe o zpracovatelském výkonu 225 kt/rok. Zařízení nebylo schopné trvalého spolehlivého provozu a již se v Evropě neprovozuje, několik jednotek využívajících tuto technologii bylo však postaveno v Japonsku. Zplyňovací procesy v Japonsku tvoří asi 10 % technologií pro energetické využití odpadu, nejčastěji to jsou technologie Nippon Steel, Ebara, JFE a další. [42]

Zařízení pro plazmové zplyňování odpadu

Zkušenosti s plazmovým zplyňováním v Evropě představuje především zařízení pro využití odpadů, které bylo dokončeno roku 2014 ve Francii (Morcenx) společností Europlasma. Zařízení má celkovou zpracovatelskou kapacitu 52 000 tun odpadu za rok, přičemž vstupní surovinou je průmyslový odpad spolu s dřevní štěpkou.

V Tees Valley ve Velké Británii probíhá výstavba a uvádění do provozu plazmové jednotky TV1 a TV2. Zatím byla realizována jednotka TV1 s využitím technologie plazmového zplyňování Westinghouse Plasma Corporation s kapacitou téměř 1 000 tun komunálního odpadu za den a elektrickým výkonem 50 MW_e. Během výstavby TV2 odstoupila od projektu společnost Air Products and Chemicals, která za projektem původně stála, a novým hlavním dodavatelem se stala společnost PGP Terminal, podle které probíhá uvádění TV1 do provozu a pokračuje výstavba TV2. [45]

Další jednotky plazmového zplyňování odpadů byly realizovány především v Asii; 3 jednotky s využitím technologie Westinghouse byly postaveny v Japonsku a jedna v Indii. Dalšími příklady jsou zařízení na Taiwanu (InEnTec, NCKU).

Firma Plasco Energy Group uvedla roku 2007 do provozu demonstrační jednotku v komerčním měřítku zpracovávající komunální odpad u kanadského města Ottawa. Jednotka s kapacitou 25 tisíc tun odpadu za rok nebyla schopná plnit emisní limity pro tuhé znečišťující látky, ale přesto uzavřela společnost kontrakt na instalaci zařízení plazmového zplyňování pro město Ottawa o kapacitě cca 130 tisíc t/rok s plánovaným dokončením stavby do roku 2016. Společnosti Plasco se ale nepodařilo získat finanční prostředky potřebné pro výstavbu a město Ottawa smlouvu vypovědělo. [49]

Zařízení pro spalování odpadu

Existuje okolo 2 tisíc konvenčních spaloven s celkovou kapacitou přes 100 milionů tun MSW za rok. Hlavní podíl tvoří roštové spalovny, které mají široký rozsah použitelných odpadů a produkují páru nejčastěji o parametrech cca 400 °C a 4 MPa. Celosvětově bylo realizováno i několik desítek spaloven s fluidním ložem pro zpracování MSW, ale při jejich použití vyžaduje velikost a výhřevnost odpadu větší pozornost.

Dodavateli zařízení jsou například společnosti Babcock & Wilcox Vølund, JFE, Hitachi Zosen Inova, Martin GmbH, Metso a další. [42]

5.2 Spolehlivost

K porovnání spolehlivosti je třeba znát provozní zkušenosti za podobných podmínek, včetně srovnatelné velikosti a složení použitého odpadu. U řady technologií chybí dostatek zkušeností s provozem komerční jednotky a několikrát menší demonstrační jednotka většinou není dostačující k prohlášení spolehlivosti technologie. Problémem bývá především linka na předúpravu odpadu nebo zařízení pro čištění syntézního plynu.

Pyrolýza

Hlavní rizika pro zařízení využívající pyrolýzní proces jsou spojena s kvalitou produkovaného plynu a oleje. Je vyžadován vysoký stupeň předúpravy paliva, což zvyšuje náklady a přidává další činnost, na kterém je celý pyrolýzní proces závislý. Pro zpracování komunálního odpadu je často nutné jej zpracovat na RDF. Pyrolýzní plyn obsahuje velké množství dehtu, a proto bývá především spalován. Požadavky a náklady na údržbu pyrolýzních zařízení jsou vysoké. [42]

Pyrolýzní jednotky v Evropě nejsou rozšířené a zkušenosti jsou spíše negativní, některá zařízení navíc vykazují vyšší provozní náklady než spalovny. Komerční využití pyrolýzy lze pozorovat v Japonsku, kde se ale využívá kombinace se zplyňováním.

Zplyňování

Množství dehtu v syntézním plynu je nižší než v plynu produkovaném pyrolýzou, ale mění se podle použitých pracovních podmínek. Výhřevnost a množství syntézního plynu může být nižší než navrhované a vést tak k nižším finančním příjmům.

Produktem plazmového zplyňování je syntézní plyn bez dehtů, který lze po odstranění síry, chloru a tuhých částic použít v plynové turbíně či motoru. Problémem plazmového

zplyňování může být vysoká energetická náročnost plazmového cyklu a výroby kyslíku. Náklady na údržbu jsou vyšší vzhledem k nutné výměně elektrod plazmových hořáků.

Zplyňování odpadu se v posledních letech rozšiřuje, několik jednotek je realizováno například v Norsku, Finsku a Velké Británii, kde se několik dalších zařízení projektuje.

Konvenční spalovna

Konvenční spalovny odpadu jsou osvědčenými technologiemi, jejichž spolehlivost je vysoká a zařízení je provozu schopné 8 000 hodin ročně. Rizikem pro velké spalovny může být zajištění potřebného množství komunálního odpadu pro provoz zařízení a veřejné mínění. Na spalovny je často nahlíženo jako na zátěž pro životní prostředí a setkává se s odporem veřejnosti a ekologicky zaměřených společností.

Celkové investiční náklady na konvenční spalovnu mohou být ve srovnání s některými alternativními technologiemi vyšší.

5.3 Specifikace odpadů

Schopnost zařízení zpracovávat odpad různého složení, velikosti a výhřevnosti je důležitá zejména pro zpracování komunálního odpadu, jehož složení se v průběhu roku mění. Pro zařízení vyžadující konstantní vlastnosti odpadu je potřeba zajistit dlouhodobý odběr specifikovaného druhu odpadu nebo je nutné zahrnout dostatečnou předúpravu k dosažení požadovaných vlastností. Linka na předúpravu odpadu zvyšuje investiční i provozní náklady jednotky, stejně se musí zohlednit i odběr již upraveného odpadu.

Odpady vhodné pro termické energetické zpracování jsou materiály obsahující uhlíkaté sloučeniny, může se jednat o komunální odpad nebo jeho složky, biomasu, pneumatiky, odpadní oleje atd.

Pyrolýza i zplyňování jsou zvládnuté technologie při zpracování biomasy a homogenních odpadů, jejich použití při zpracování MSW je ale stále ve vývoji [36]. Nejrozšířenější technologií pro energetické využívání komunálního odpadu jsou roštové spalovny. Komunální odpad je skladován v bunkru, kde je míchán, aby se zaručilo podobné složení a výhřevnost odpadu v celém objemu. Další předúprava záleží na použité technologii, pro roštové spalovny se většinou skládá pouze z mísení odpadu. Následující tabulka zobrazuje způsoby energetického využívání a jejich vhodnost v závislosti na typu odpadu.

Tab. 13: Současné použití technologií tepelného zpracování odpadů pro hlavní druhy odpadu [11]

	Netříděný KO	Tříděný TKO a RDF	Nebezpečný odpad	Čistírenský kal	Zdravotnický odpad
Rošt přesuvný	***	***	-	-	**
Rošt válcový	**	***	*	-	**
Rotační pec	-	**	***	**	***
Nístějová pec	-	-	**	-	***
Stacionární fluidní	*	**	-	**	-
Cirkulační fluidní	*	**	-	***	-
Pyrolýza	*	*	*	*	*
Zplyňování	*	*	*	*	*

*** často používáno | ** používáno | * zřídka | - nevyužíváno běžně

Tuhá alternativní paliva (TAP, RDF) se mohou vyrábět z odpadu komunálního, průmyslového, stavebního a dalšího odpadu, který není klasifikovaný jako nebezpečný. Při výrobě paliva ze směsného komunálního odpadu dochází nejdříve k vytrídění složek vhodných pro energetické využití a nevyužitelná frakce je ukládána na skládku. Během výroby se do paliv mohou přidávat aditiva zlepšující jeho vlastnosti, především výhřevnost. Oproti spalování netříděného komunálního odpadu je výroba RDF výhodnější v tom, že palivo má dlouhodobě garantované vlastnosti. [40]

Většina odpadu z průmyslu patří mezi nebezpečné odpady. Průmyslový odpad má rozličné složení podle výroby, ze které pochází, a může se jednat o pryžové nebo plastové odpady, odpady z výroby celulózy a papíru, odpady z výroby textilních vláken, odpady z hutnického průmyslu, z výroby rozpouštědel, barviv apod.

Materiálové využití odpadu a s tím spojená separace využitelných materiálů z MSW může zapříčinit změny ve složení a výhřevnosti odpadů, které jsou dále energeticky využívány. Odstraněním skla a kovů se zvýší výhřevnost odpadu, separace papíru a plastů způsobí značné snížení výhřevnosti a vytríděním biologicky rozložitelných odpadů se sníží vlhkost odpadu. [12]

Průměrná výhřevnost některých druhů odpadu je shrnuta v následující tabulce, nejvyšší výhřevnost mají plastové a papírové obaly a odpad průmyslový. Výhřevnost směsného komunálního odpadu se pohybuje okolo 9 MJ/kg.

Tab. 14: Výhřevnost některých druhů odpadu [12]

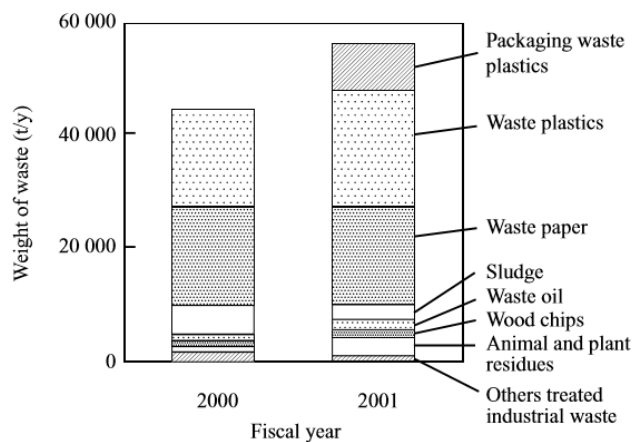
Druh odpadu	Průměrná výhřevnost [MJ/kg]
Směsný tuhý komunální odpad	9
Zbytkový TKO (po vytrídění)	10
Obaly	20
TAP	18
Průmyslový odpad	20
Čistírenské kaly – surové	2
Čistírenské kaly – aktivované	0,8

Pyrolýza

Pyrolýza se využívá mimo jiné ke zpracování odpadní biomasy, příkladem jsou procesy společností Biomass Technology Group nebo Envergent Technologies, které jsou zaměřené na výrobu bio-oleje (výťažnost až 75 % hm.) a jeho další zpracování. Pro zpracování biomasy se používají především fluidní reaktory, u kterých je nutná předúprava vstupního materiálu na daný rozměr. [37]

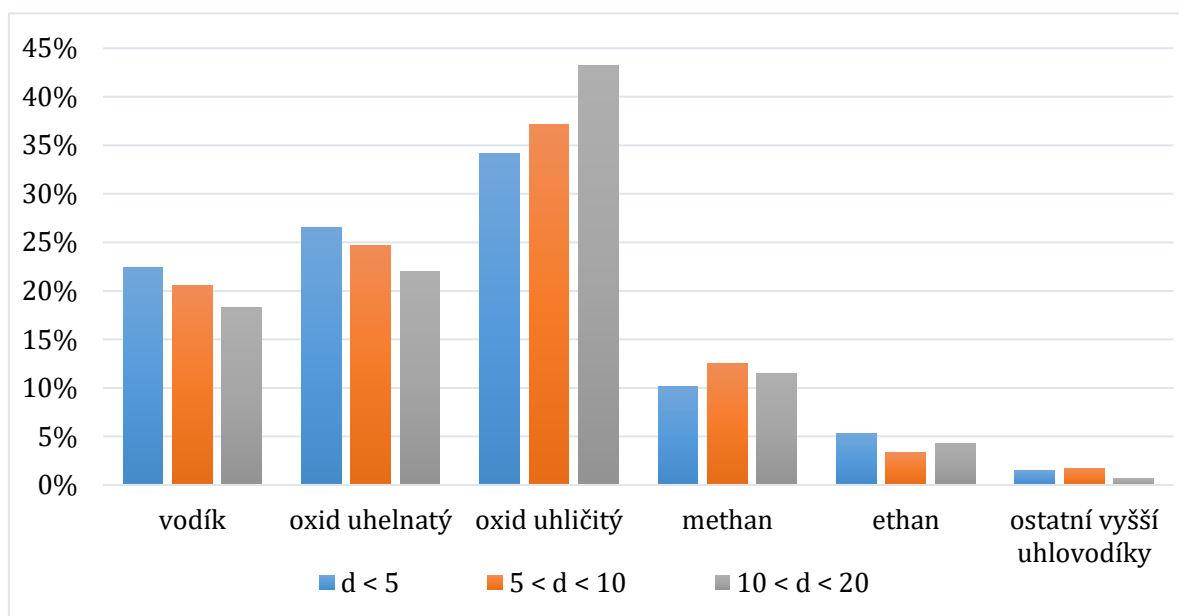
Častou surovinou pro využití v pyrolýzním reaktoru jsou odpadní plasty a pneumatiky, cílem procesu bývá výroba pyrolýzního oleje a zpracování na paliva. K využití komunálního odpadu slouží např. technologie Thermosteect nebo Babcock, které jsou blíže popsány v kapitole 3.1.4. Tyto technologie jsou určeny pro zpracování tuhého komunálního nebo průmyslového odpadu a čistírenských kalů a jejich výstupem je syntézní plyn. Z komunálního odpadu jsou pro pyrolýzu využitelné složky zahrnující papír, textil, plasty nebo biologicky rozložitelný odpad [8].

V následujícím grafu je zobrazeno složení odpadu, které bylo zpracováno v zařízení Thermoselect u japonského města Chiba. Hlavní složku tvoří odpadní plasty a papír, v menší míře jsou zastoupeny čistírenské kaly nebo odpadní oleje.



Graf 10: Složení zpracovávaného odpadu v Thermoselect Chiba [36]

Předúprava se odvíjí od typu reaktoru a vstupního materiálu a je vhodné upravit velikost materiálu kvůli lepšímu přestupu tepla a rychlejšímu zpracování. Menší frakce vstupního materiálu má za následek vyšší výtěžnost plynu a mění se i jeho složení.



Graf 11: Složení pyrolýzního plynu v závislosti na velikosti odpadu [31]

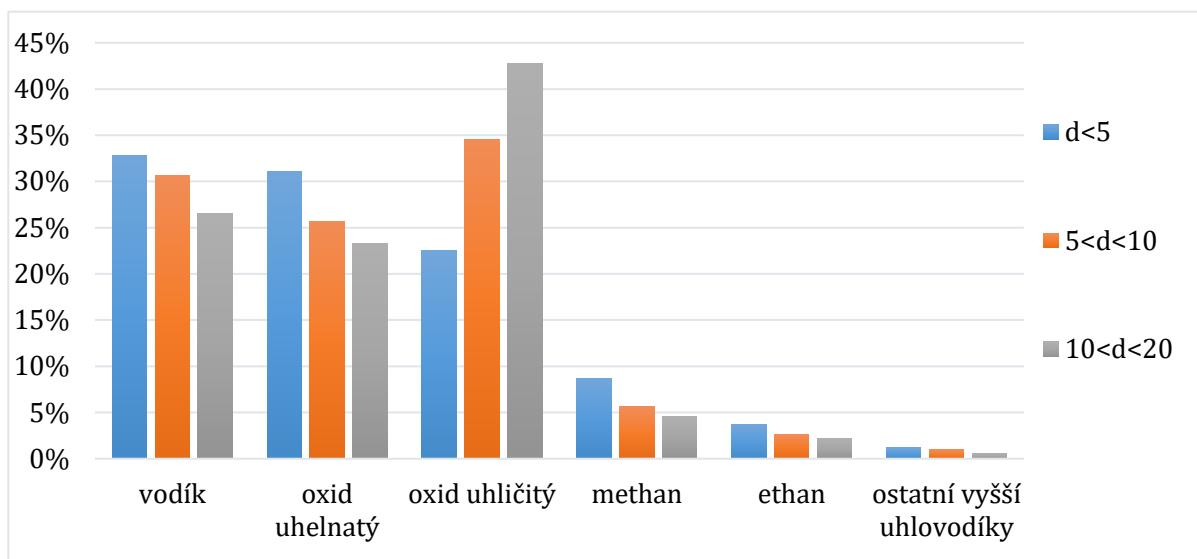
Odpady vhodné pro zpracování pyrolýzou tvoří zejména jednodruhové odpady, jako je dřevní biomasa, drcené pneumatiky a vytríděné složky komunálního a průmyslového odpadu (zejména plasty), případně čistírenské kaly a nemocniční odpad. [41]

Zplyňování

Společnost AlterNRG nabízí proces plazmového zplyňování zpracovávající průmyslový odpad, odpadní biomasu, komunální odpad, odpad ze zdravotnictví, pneumatiky apod. Nyní existuje pět komerčních zařízení AlterNRG, která zpracovávají biomasu, nebezpečný

odpad, odpad ze zdravotnictví a dvě zařízení v Japonsku využívající MSW. Podobně proces Plasco Technologies zpracovává MSW, průmyslový a živnostenský odpad, případně nebezpečný odpad, biomasu a pneumatiky.

Pro efektivní zplyňovací proces je potřeba homogenní materiál, pro použití některých materiálů je proto nutná úprava, kterou je často zpracování odpadu na RDF. Materiály vhodné k použití ve zplyňovacím reaktoru jsou například papíry, plasty a odpady z lesnictví a zemědělství. Předúprava odpadu je opět závislá na typu reaktoru, ale obecně se s menší frakcí odpadu zvyšuje výtěžnost plynu a mění se i zastoupení jednotlivých složek.



Graf 12: Složení syntézního plynu v závislosti na velikosti odpadu [31]

Spalování

Roštové spalovny patří k nejpoužívanějším WtE zařízením ke zpracování tuhého komunálního nebo průmyslového odpadu a mohou být použity i ke spolu-spalování čistírenských kalů nebo spalování tuhého zdravotnického odpadu. V roštových spalovnách spočívá předúprava odpadu v jeho promíchávání k dosažení podobných vlastností v celém objemu a drcení velkoobjemových odpadů. Hromadné spalování směsného odpadu je až o 14 % levnější než spalování odpadu upraveného na RDF. [46]

Další často využívaným typem spalovny jsou spalovny s rotační pecí, jejich výhodou je možnost zpracovávat odpady tuhé, pastózní i kapalné. V rotačních pecích se nejčastěji zpracovává nebezpečný a zdravotnický odpad nebo čistírenské kaly, ty mohou být spalovány i ve spalovnách s fluidním ložem. Čistírenské kaly obsahují většinou značný podíl vody, takže je potřeba jejich sušení nebo přidání přídatných paliv k zajištění stabilního hoření.

Fluidní kotle vyžadují nákladnější předúpravu pro spalování komunálního odpadu a používají se proto spíše pro některé vytríděné složky odpadu a paliva z odpadu. [12]

5.4 Hmotnostní a energetická bilance

Celková hmotnostní a energetická bilance poskytuje zároveň přehled o provozních nákladech a příjmech, jako jsou vstupní poplatky za odpad, prodej energií, náklady na chemikálie, vodu apod.

Vlastní spotřeba může být kromě energie potřebné pro vlastní provoz (čerpadla, ventilátory atd.) navýšena o energii potřebnou pro předúpravu odpadu, předehřev spalovacího vzduchu, výrobu kyslíku apod. Kromě vlastní spotřeby jsou dalším energetickým tokem na vstupu odpad i konvenční paliva. Konvenční paliva využívaná ve spalovnách odpadu mohou sloužit k udržení stanovených teplot ve spalovací komoře, ohřátí spalin (např. kvůli SCR nebo tkaninovým filtrům), dosažení požadované teploty ve spalovací komoře před vstupem odpadu nebo k předehřátí spalovacího vzduchu. Některá paliva (např. koks) se využívají při zplyňování k produkci syntézního plynu o požadovaných vlastnostech.

Reakce probíhající během pyrolýzy jsou endotermické a je proto potřeba teplo do procesu dodat, což je většinou realizováno vnějším ohřevem pyrolýzního reaktoru. Během zplyňování dochází k reakcím exotermickým i endotermickým a zplyňovací provoz je většinou autotermní, takže není potřeba dodávka tepla z vnějšího zdroje. Plazmové zplyňování je energeticky náročnější a potřebná elektrická energie pro provoz plazmových hořáků činí cca 700 až 1000 kWh_e/t. [41]

Při poskytování ekonomické podpory na produkci elektrické energie z WtE zařízení se mohou lišit ceny importované a exportované elektrické energie. Někdy proto může být z ekonomického hlediska výhodnější export veškeré produkované elektrické energie a nákup elektřiny pro vlastní spotřebu. [12]

Hmotnostní tok na vstupu

- odpad
- konvenční paliva
- vzduch/kyslík
- voda
- další suroviny (materiál fluidního lože, chemikálie pro čištění plynu a vody)

Spotřeba vody je ve spalovnách spojena především s čištěním spalin, suché procesy spotřebují nejméně vody, zatímco mokré vykazují vyšší spotřebu vody. Pro neutralizaci kyselin ve spalinách se používá NaOH, hydratované vápenné mléko nebo uhličitán sodný. Pro odstranění NO_x se přidává čpavková voda, čpavek nebo roztok močoviny. [12]

Hmotnostní tok na výstupu

- tuhé zbytky (škvára/struska, popílek, APCR)
- voda
- spaliny

Energetické toky na vstupu

- odpad
- podpůrná paliva
- elektrická energie

Energetické toky na výstupu

- elektrická energie
- teplo
- paliva (např. syntézní plyn)

5.5 Vliv na životní prostředí

Zařízení na energetické využití odpadu snižují množství odpadu ukládaného na skládky a nahrazují energii, která by jinak byla získaná z fosilních paliv. Se stavbou a provozem WtE zařízení může vzrůst hluk a doprava, a to zejména u zařízení s vyšší kapacitou, kde je potřeba odpad dopravovat na větší vzdálenosti, v případě menších jednotek je zpracováván odpad z okolí.

Tuhé zbytky

Při energetickém využití odpadů vznikají tuhé zbytky ze spalování a zbytky z procesu čištění spalin, které jsou složeny z jemného popílku, reakčních produktů a nezreagovaných aditiv. Při čištění odpadních vod jsou tuhé zbytky zpracovány do filtračního koláče nebo jsou míchány s popílkem.

Při spalování komunálního odpadu v roštových pecích vzniká škvára a popílek, který je po úpravě ukládán na skládky nebo může být využit při stavbě silnic. Při spalování nebezpečných odpadů je struska bez dalšího zpracování skládkována. Některá zařízení pracují za vysokých teplot za účelem produkce strusky, která má nižší vyluhovatelnost a díky tomu širší možnosti využití.

Zbytky z procesu čištění spalin obsahují množství znečišťujících látek, proto nejsou vhodné k recyklaci. Použitím suché a polosuché metody čištění spalin vznikají zbytky tvořené směsí solí vápníku a sodíku. Vyskytuje se zde i popílek, který nebyl odloučen v předchozích stupních, a zbytky tak mohou obsahovat těžké kovy a PCDD/F. Zbytky se upravují na nízkou vyluhovatelnost a odstraňují se uložením na skládku jako nebezpečný odpad. Stejně tak filtrační koláč z čištění odpadních vod se ukládá na skládky nebezpečného odpadu. [12]

Při využití plazmové technologie dochází k termickému rozložení některých znečišťujících látek, jako jsou např. dioxiny, a tím dosahují nízkých koncentrací. Podstechiometrické prostředí potlačuje tvorbu oxidů dusíku, vysoká pracovní teplota ale naopak jejich tvorbu podporuje a je tedy potřeba zařadit k čištění plynu i redukci oxidů dusíku. Při plazmovém zplyňování vzniká inertní vitrifikovaná struska.

V konvenčních spalovnách MSW vzniká 200 až 350 kilogramů škváry na tunu upraveného odpadu. Při použití mokrého čištění spalin vzniká asi 10 až 12 kg APCR na tunu odpadu, u polosuchých a suchých vápencových metod čištění je množství vyšší kvůli nezreagovaným aditivům. [12]

Emise do ovzduší

Koncentrace HCl, HF, SO₂, NO_x a těžkých kovů ve spalinách závisí především na složení odpadu a kvalitě čištění spalin, množství CO je dáno hlavně parametry pece. Konstrukce pece a provozní podmínky má vliv na tvorbu NO_x. Spalovny komunálního odpadu

produkují při 11 % kyslíku mezi 4 500 až 6 000 m³ spalin na tunu odpadu. WtE zařízení využívající pyrolýzu nebo zplyňování produkují menší množství spalin.

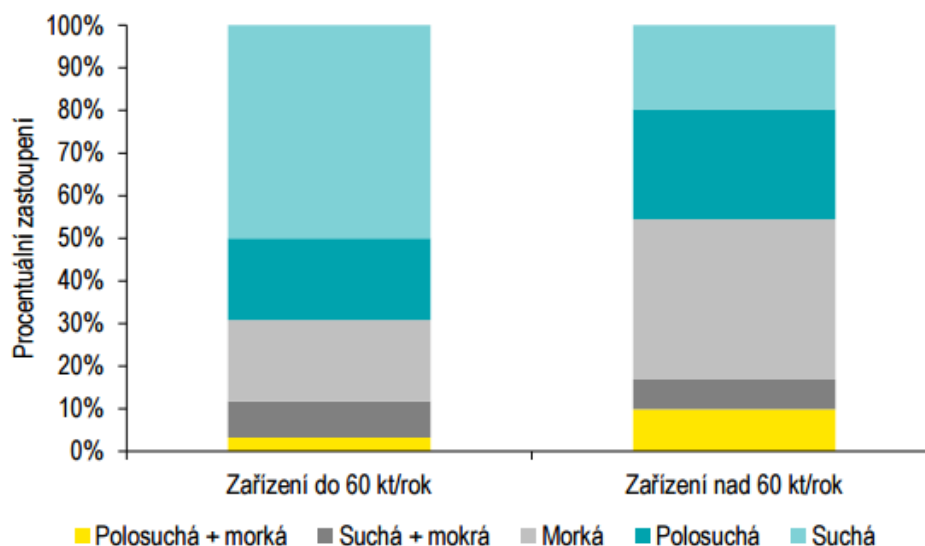
Zplyňování a pyrolýza probíhají v redukční atmosféře, kde je tvorba dioxinů a furanů značně snížena. Náklady na čištění syntézního plynu mohou být nižší v porovnání s větším objemem spalin po spalování, čištění syntézního plynu je ale náročnější kvůli přítomnosti dehtu. [21]

Tab. 15: Emise při pyrolýzním nebo zplyňovacím zpracování odpadu (0 °C, 11 % O₂) [42]

Společnost	Proces	TZL	HCl	HF	SO ₂	NO ₂	CO	Hg	Cd+Tl	PCDD/ PCDF
					mg/Nm ³					μg/Nm ³
AlterNRG	PL	<3	39		<2	82	<29	-	-	0,00067
CompactPower	P+G	1,4	0,96	0,12	0,74	21	3,9	-	0,006	<0,003
Energos	G	0,2	3,6	0,02	19,8	42	2	0,00327	0,00002	0,001
Mitsui	P+C	<1	9		8	150	5	0,01	<0,001	0,016
Nippon Steel	G	6	3		0,5	16	5,2			0,023
TechTrade	P	1,8	6,4		5,42	179,5	5,65	0,0117	0,0006	0,0013
BAT [12]		5	8	1	40	180	30	0,05	0,05	0,1
Vyhláška [51]		10	10	1	50	200	50	0,05	0,05	0,1

Proces: PL – plazma, P – pyrolýza, G – zplyňování, C – spalování

Proces čištění spalin je složen z několika navazujících technologií, které se mohou různě kombinovat. Podle Referenčního dokumentu o nejlepších dostupných technikách [12] je možných až 408 různých kombinací systému čištění spalin.



Graf 13: Zastoupení technologií pro čištění kyselých složek ve spalinách v evropských EVO [55]

5.6 Produkce elektrické energie

Cílem WtE zařízení není jen snížení objemu odpadu ukládaného na skládky, ale i jeho využití na výrobu elektrické energie. Vybraná technologie energetického využití odpadu by měla dosahovat co nejlepší účinnosti, která zvyšuje příjmy z prodeje energií a zároveň

nahrazuje energii jinak získanou z fosilních paliv. Na účinnost zařízení má vliv způsob předúpravy a je proto potřeba počítat se spotřebou drtiče, sušky atd.

Pyrolýza a zplyňování

Energetické využití syntézního plynu může probíhat s využitím Rankine-Clausiova cyklu anebo prostřednictvím tepelných strojů, tzn. plynové turbíny, spalovacího plynového motoru apod.

Při využití parního cyklu se elektrická účinnost pro zplyňování a pyrolýzu pohybuje mezi 9 až 20 %. Zvýšení elektrické účinnosti pro zplyňovací a pyrolýzní procesy může být realizováno použitím plynového motoru, kdy účinnost vzroste na 13 až 24 %. Pro další zvýšení elektrické účinnosti zplyňovacích a pyrolýzních technologií se nabízí řešení spolu-spalování vzniklého syntézního plynu v již existujících konvenčních elektrárnách. Spalováním syntézního plynu v kotli odpadne potřeba energeticky náročného čištění syntézního plynu, které je nutné pro použití plynového motoru nebo plynové turbíny. Spojení zplyňovací či pyrolýzní technologie se stávajícím zařízením navíc sníží investiční náklady. Procesy se zaměřením na výrobu čistého syntézního plynu jsou energeticky náročnější a mají i vyšší spotřebu vody a chemikálií než ostatní procesy. [21]

Využití parního cyklu

Nejjednodušší variantou pro výrobu elektrické energie ze syntézního plynu je skrze parní oběh. Plyn v takovém případě nemusí být čištěn a proces čištění spalin zahrnuje technologické postupy běžně užívané ve spalovnách odpadu. Maximální elektrická účinnost zplyňovacího zařízení s parním cyklem je cca 23 %.

Plynová turbína

Plynové turbíny jsou velmi citlivé na kvalitu plynu a je potřeba plyn upravit na nízké množství prachových částic, dehtu, síry a sloučenin chloru. Požadavky na kvalitu plynu pro využití v plynové turbíně a plynovém motoru jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 16: Nároky na čištění syntézního plynu [13]

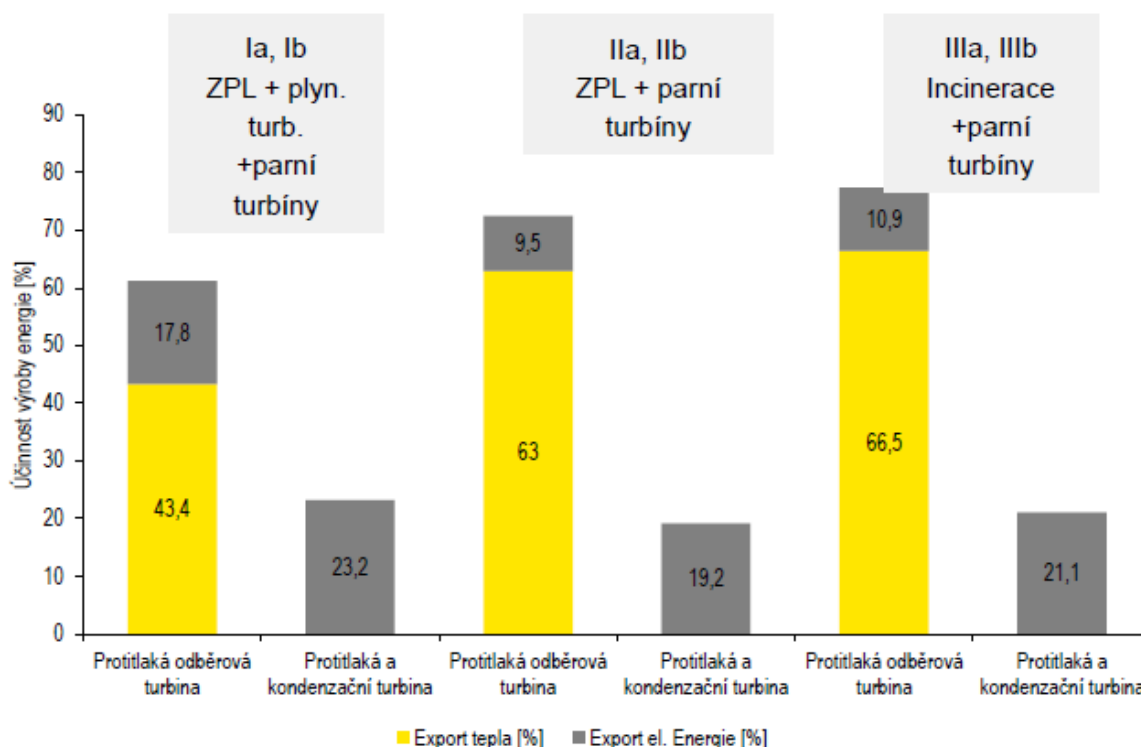
	Jednotka	Plynová turbína	Plynový motor
Dehet	mg/Nm ³	10	100
Prachové částice	mg/Nm ³	5	50
Alkálie	ppm (hm.)	0,1	0,1
Těžké kovy	ppm (hm.)	0,1	0,1
H ₂ S	ppm (obj.)	20	20

Nároky na kvalitu plynu při využití plynových turbín jsou přísnější ve srovnání s plynovými motory, především v dovoleném obsahu dehtu a prachových částic, ale požadovaná kvalita syntézního plynu se může lišit dle výrobce.

Syntézní plyn je pro čištění zchlazen a pomocí filtrů zbaven tuhých znečišťujících látek a aerosolů, dále jsou odstraněny kyselé složky, amoniak a H₂S. Pro vstup do turbíny je nutné plyn stlačit na 2,5 až 3 MPa a spalování probíhá za přebytku spalovacího vzduchu 4 až 5. [41]

Plynový motor

Požadavky na kvalitu syntézního plynu pro provoz plynových motorů jsou nižší než nároky plynových turbín, jejich porovnání je uvedeno v tabulce 16. Spaliny po výstupu z plynového motoru neprocházejí čištěním, a je tedy nutné čistit plyn nejen vzhledem k požadavkům plynového motoru ale i pro dodržení emisních limitů. Plynové motory pracují s přebytkem vzduchu 1,5 až 1,7. [41]



Graf 14: Efektivita výroby elektrické energie a tepla [41]
pro odpad s výhřevností 18,5 MJ/kg, účinnost zplyňování 74,2 %

Spalování

Pro spalování odpadů jsou nejvíce rozšířené spalovny s roštovým ohništěm, které produkují páru nejčastěji o parametrech 400 °C a 4 MPa. Vyšší parametry páry vedou k vyšší produkci elektřiny, zároveň ale zvyšují riziko koroze. Jejich použití je spojeno s dalšími opatřeními na spalínové cestě, jako jsou např. obklady chránící povrch tepelných výměníků [12]. Vlastní produkce elektřiny bývá realizována pomocí kondenzační, odběrové nebo protitlaké turbíny.

Tab. 17: Jmenovité parametry páry v ZEVO

	Teplota [°C]	Tlak [MPa]
ZEVO Malešice	235	1,37
SAKO Brno	400	4
Termizo	400	4,3
ZEVO Plzeň	425	5,1

5.7 Shrnutí

Hlavním kritériem pro porovnání možností energetického využití odpadu je především spolehlivost zařízení. Důležitost tohoto kritéria roste s velikostí zařízení, kdy by se v případě odstávky odpad rychleji kumuloval a bylo by nutné najít alternativní řešení nakládání s odpady. Jako nejspolehlivější zařízení se jeví konvenční spalovna, u plazmového zplyňování je pro nedostatek referencí zvolena spolehlivost nízká. Možnost použití proměnlivého odpadu je nejnižší u pyrolýzní technologie, která zpracovává homogenní odpady, naopak spalovna a dle některých zdrojů i plazmové zplyňování mají široký rozsah použití.

Během energetického využití odpadů vznikají tuhé zbytky a další nakládání s nimi se odvíjí od zvolené technologie. Nejnižší vliv na životní prostředí vykazuje plazmová technologie, která produkuje syntézní plyn a vitrifikovanou strusku, ostatní varianty jsou zvoleny na stejné úrovni.

Tab. 18: Shrnutí vybraných technologií

	Spalování	Pyrolýza	Zplyňování	Plazmové zplyňování
Oxidační médium	vzduch	žádné	vzduch/kyslík/pára	
Přebytek vzduchu	>1	0	<1	<1
Provozní teplota [°C]	850-1200	500-800	550-1600	>4000
Provozní zkušenosti	* * *	*	* *	*
Spolehlivost	* * *	*	* *	*
Variabilita odpadu	* * *	*	* *	* * *
Vliv na životní prostředí	* *	* *	* *	* * *

Účinnost zařízení se liší podle technologie využití odpadu a způsobu výroby elektrické energie, ta je shrnuta v tabulce 19. Pokud se syntézní plyn přímo spaluje a k výrobě elektřiny je využit parní oběh, je účinnost nižší než pro konvenční spalovnu. To se může změnit v případě využití parní i plynové turbíny.

Tab. 19: Účinnost výroby elektrické energie [21]

Spalování		Zplyňování a pyrolýza		
Parní oběh	Parní oběh	Plynový motor	CCGT	Spolu-spalování
19-27 %	9-20 %	13-24 %	23-28 %	27-35 %

6 Ekonomické porovnání

Hlavní rizika při ekonomickém porovnání jsou spojena s obtížnou předvídatelností nákladů po celou dobu životnosti zařízení. Příjem z těchto zařízení může být oproti návrhu nižší (skutečný pracovní fond nebo výhřevnost plynu mohou být nižší apod.), zároveň mohou vzrůst náklady na údržbu a opravy.

Některé WtE technologie vyžadují přísun energie ve formě zemního plynu, LTO, koksu nebo elektřiny (např. pro plazmové hořáky). Při úpravě syntézního plynu na hodnotnější palivo nebo chemické látky se zvyšuje složitost zařízení a investiční i provozní náklady.

Pro ekonomické porovnání technologií energetického využití odpadu jsou zvoleny 3 varianty: plazmové zplyňování, pyrolýzní proces a konvenční spalovna. Všechna zařízení mají kapacitu 100 tisíc tun komunálního odpadu za rok s pracovním fondem 8 000 hodin.

Konvenční spalovna

Pro porovnání je uvažována roštová spalovna zpracovávající komunální odpad, který je v bunkru promícháván. Spalování probíhá bez podpůrného paliva, ale jsou instalovány hořáky na LTO. Ty slouží pro najíždění a odstavení zařízení a pro dosažení stanovené minimální teploty 850 °C při spalování méně výhřevných odpadů.

Do procesu vstupují chemikálie jako například čpavková voda pro SNCR nebo hydroxid vápenatý dávkovaný do pračky spalin; tyto látky pak zvyšují variabilní provozní náklady zařízení. Vzniklé odpady ze zařízení jsou tvořeny škvárou, popílkem a reakčním produktem z čištění spalin a jsou skládkovány.

Tržby jsou realizovány prodejem tepla a elektřiny, příjmy za likvidaci odpadu a prodejem separovaného železného šrotu.

Plazmové zplyňování

Pro plazmové zplyňování je potřeba odpad upravit a zvýšit jeho homogenitu. Z komunálního odpadu se oddělí recyklovatelné a anorganické materiály, zbytek odpadu se drtí a vysušuje spalinami z plynové turbíny.

Produkce elektrické energie probíhá s využitím integrovaného kombinovaného cyklu plazmového zplyňování. Během zplyňování vzniká syntézní plyn, který je pro výrobu elektrické energie spalován ve spalovací turbíně. Spaliny jsou poté využity v kotli na odpadní teplo, kde je produkována pára pro výrobu elektřiny v parní turbíně. Před vstupem do spalovací turbíny jsou ze syntézního plynu odděleny kyselé složky a pevné částice, ty jsou vedeny zpět do plazmového reaktoru. Pro odstranění H₂S je použito chelatační činidlo a z procesu vystupuje odpad ve formě sírového koláče. Pro použití syntézního plynu ve spalovací turbíně je nutné zvýšit tlak na cca 25 barů.

Pro provoz plazmového reaktoru je potřeba dodávat koks, který slouží ke stabilizaci procesu a vytváří koksové lože, a dále je do reaktoru dávkován vápenec k dosažení požadovaných vlastností strusky. Kyslík využívaný pro proces je vyráběn ve vlastní režii a výroba je zahrnuta v investičních i provozních nákladech.

Pyrolýza

Odpad je před vstupem do pyrolýzního reaktoru drcen. K vlastní pyrolýze je použita nepřímá ohřevná rotační pec, kde se odpad při 450 °C odplyňuje a vzniká tak pyrolýzní plyn a tuhý zbytek tvořen koksem, kovy a inertními složkami odpadu. Pyrolýzní plyn a tuhý zbytek po vytřídění kovů pokračuje do spalovací komory, ve které jsou spalovány při vysokých teplotách, aby došlo k roztavení popelovin. Po vychladnutí tvoří popeloviny inertní materiál použitelný při stavbě silnic.

Spalování pyrolýzního plynu probíhá za nižšího přebytku spalovacího vzduchu, a vzniká tak menší množství spalin. Čištění spalin probíhá stejně jako u konvenční spalovny, ale během pyrolýzního procesu je omezen vznik oxidů dusíku a dioxinů.

6.1 Investiční náklady

Investiční náklady zahrnují náklady na stavbu, vlastní zařízení tepelného zpracování, potřebný stupeň předúpravy odpadu a technologii pro čištění spalin. Investiční náklady lze v případě pyrolýzních a zplyňovacích procesů snížit spolu-spalováním syntézního plynu v existující konvenční elektrárně.

Tab. 20: Invest. náklady vybraných technologií energetického využití odpadu [16, 36, 42, 46, 53]

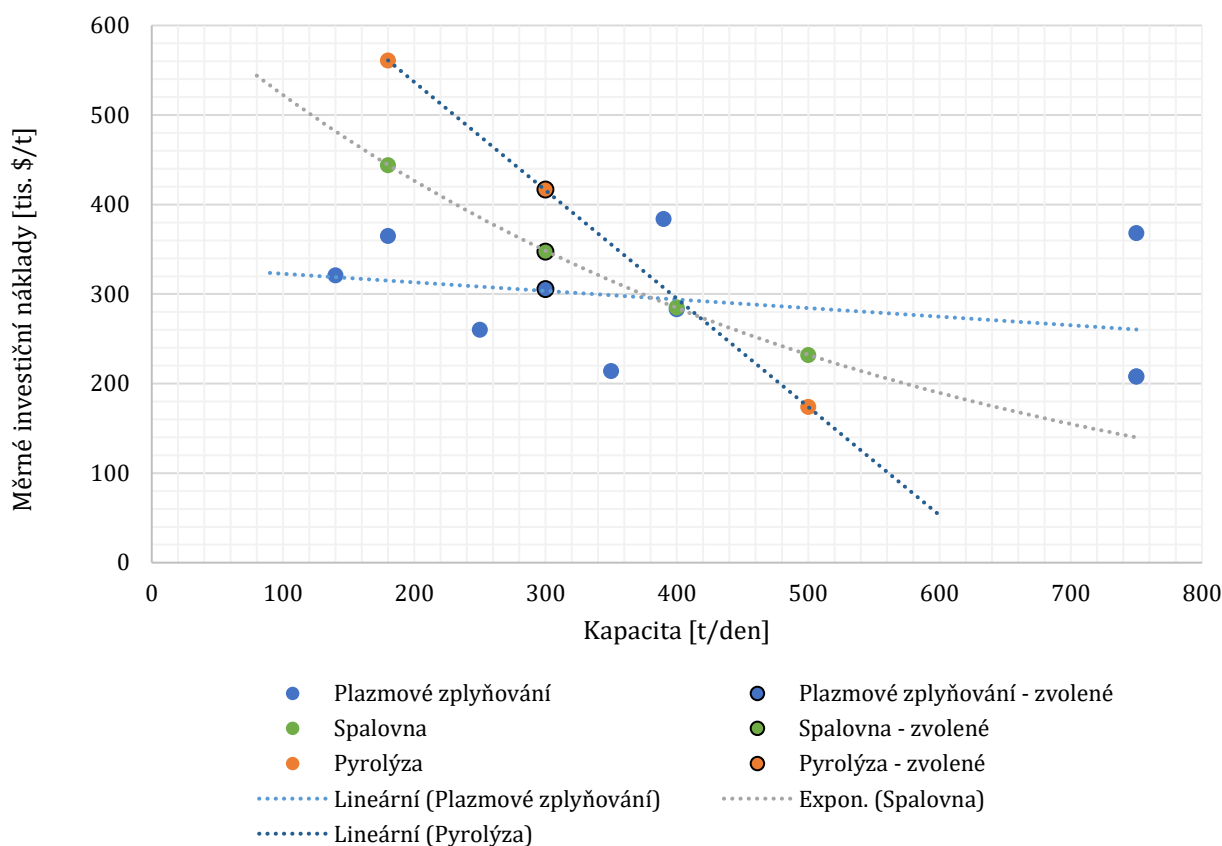
	Proces	Zdroj	Kapacita [t/den]	Invest. náklady [mil. \$]	Měrné invest. náklady [tis.\$/t]
AlterNRG	PL	[36]	750	156	208
Plasco	PL	[36]	390	150	384
Europlasma	PL	[36]	400	113	283
Pyrolýza	P	[53]	500	87	174
Pyrolýza+Zplyň.	P+G	[53]	500	103	206
Zplyňování	G	[53]	500	80	160
Plazma	PL	[53]	500	102	204
Spalovna	S	[53]	500	116	232
Thermoselect ¹	P+G	[42]	670	125	187
SBV ²	P+S	[42]	300	144	480
TPS ³	G	[42]	90	20	222
Westinghouse	PL	[42]	250	65	260
Plasco	PL	[42]	200	36	180
Solena	PL	[42]	350	75	214
Solena	PL	[42]	140	45	321
Solena	PL	[46]	180	66	365
Pyrolýza	P+S	[46]	180	101	561
Spalovna	S	[46]	180	80	444
Westinghouse ⁴	PL	[16]	750	156	208
Westinghouse ⁵	PL	[16]	750	276	368

PL – plazmové zplyňování, P – pyrolýza, G – zplyňování, S – spalování

¹ Karlsruhe, ² Fürth, ³ Greve, ⁴ Parní cyklus, ⁵ IGCC

Uvedená tabulka zahrnuje investiční náklady vybraných technologií energetického využití odpadu. Kromě uvedených realizovaných zařízení v Karlsruhe, Fürthu a Greve se jedná o data převzatá z projektů [36, 42] nebo analýz [53].

V následujícím grafu je zobrazena závislost měrných investičních nákladů na kapacitě zařízení. Z grafu je zřejmé, že výše měrných investičních nákladů konvenční spalovny se vzrůstající kapacitou exponenciálně klesá a podle tohoto trendu je zvolena investice pro další výpočet. Investiční náklady pyrolýzy se podle použitých zdrojů velmi liší a pro stanovení hodnoty k výpočtu jsem neuvažovala investiční náklady jednotky SBV. Výše měrné investice plazmové technologie se pohybuje v určitém rozmezí, které se ale se změnou provozní kapacity mění jen minimálně. Měrné investice pro plazmové zplyňování se liší zejména kvůli rozdílné výrobě elektrické energie, kdy například rozdíl mezi paroplynovým zařízením a parním oběhem je zřetelný ze zařízení Westinghouse pro 750 tun odpadu denně.



Graf 15: Závislost měrných investičních nákladů na provozní kapacitě [16, 36, 42, 46, 53]

Výše investičních nákladů pro jednotlivé varianty byla zvolena na základě grafu 15, hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tab. 21: Výše investičních nákladů pro jednotlivé varianty EVO

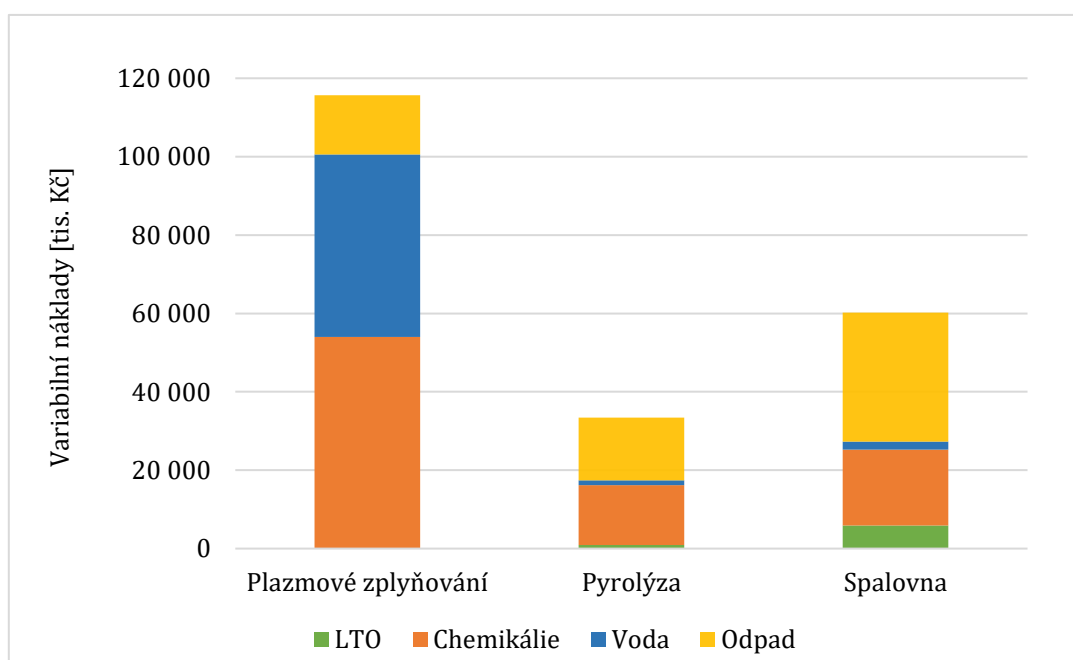
Varianta EVO	Investiční náklady [tis. Kč]
Plazmové zplyňování	2 200 000
Pyrolýza	3 000 000
Spalovna	2 500 000

6.2 Provozní náklady

Náklady na provoz jsou složeny z nákladů fixních a variabilních. Fixní náklady představují osobní náklady, náklady na údržbu a ostatní režijní náklady a s provozem zařízení se nemění, zatímco variabilní náklady jsou závislé na množství využitého odpadu.

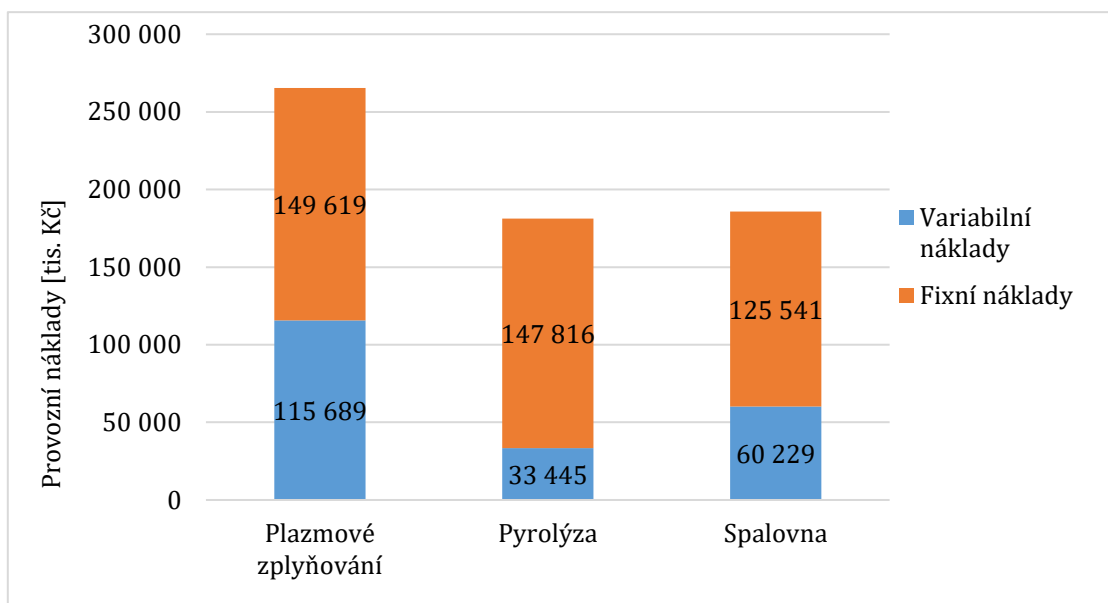
Variabilní náklady tvoří z velké části náklady na vodu, které jsou složeny z nákupu vody a nákladů na úpravu odpadních vod. Množství odpadních vod je závislé na technologii čištění spalin a například mokré vypírky náklady na úpravu vody značně navyšují. Vybrané varianty konvenční spalovny i pyrolýzy neprodukují odpadní vody, ale při procesu plazmového zplyňování je nutný odvoz zasolených odpadních vod. Další část tvoří náklady na odběr zbytků z procesu tzn. škvára, struska, reakční produkt atd. Přestože jsou některé tuhé zbytky využitelné například při stavbě silnic, ve výpočtech jsou přiřazeny k odpadům určeným ke skládkování.

Najížděcí palivo je využíváno zejména v konvenčních spalovnách, kde slouží k najíždění a odstavování zařízení a k dosažení a udržení požadované teploty ve spalovací komoře při spalování méně výhřevných odpadů, a pro najíždění pyrolýzního zařízení. Palivo je nejčastěji tvořeno zemním plynem, lehkým topným olejem apod.

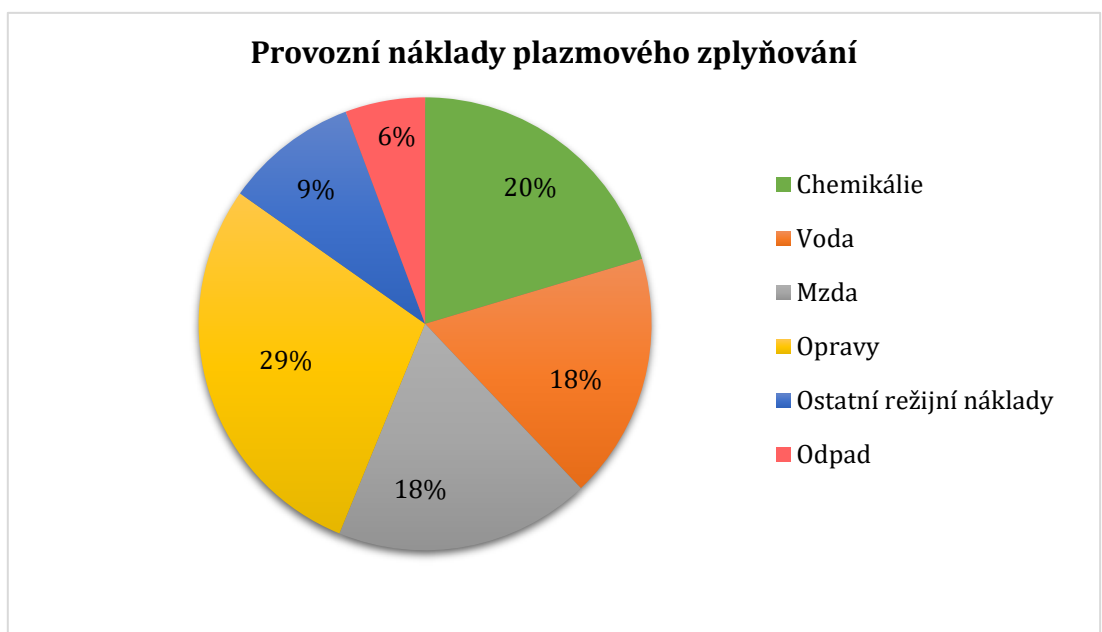


Graf 16: Výše fixních a variabilních provozních nákladů variant EVO

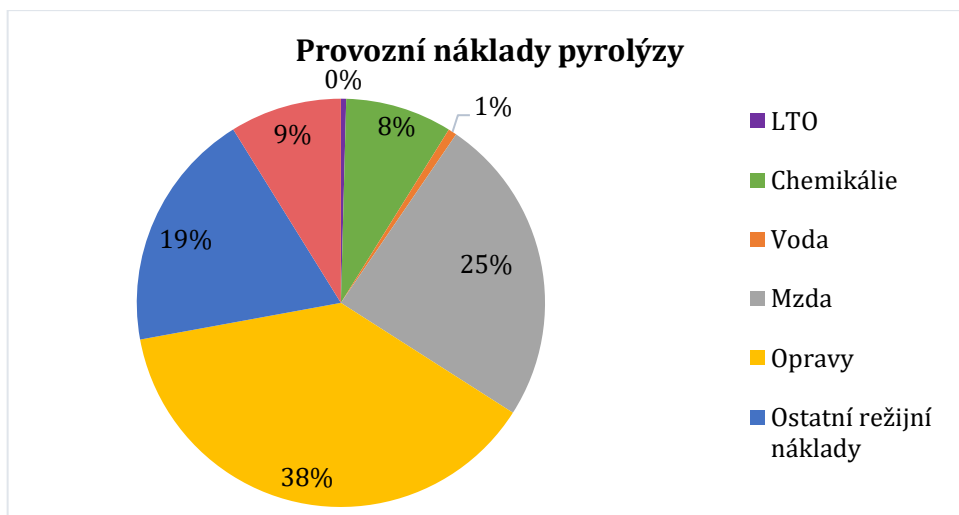
Nejvyšší provozní náklady vykazuje varianta plazmového zplyňování, u které tvoří nejvyšší položku náklady na údržbu a opravy. U ostatních variant jsou tyto náklady tvořeny 2 % z investice, plazmové zplyňování ale vyžaduje pravidelnou výměnu elektrod plazmových hořáků, a tak byly náklady na údržbu zvoleny ve výši 3 % investičních nákladů. Ostatní režijní náklady jsou u všech variant ve výši 1 % investice.



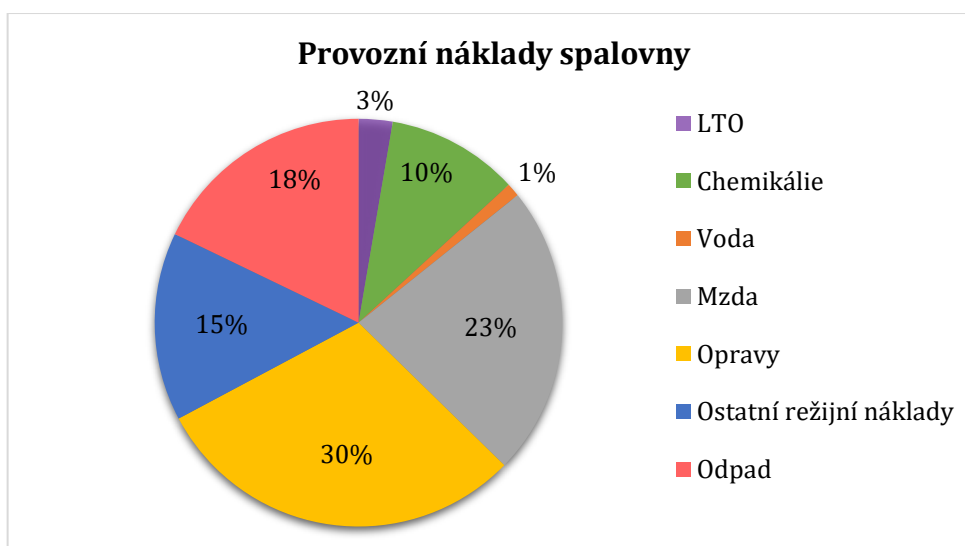
Graf 17: Variabilní náklady jednotlivých variant EVO



Graf 18: Složení provozních nákladů plazmového zplyňování



Graf 19: Složení provozních nákladů pyrolýzy



Graf 20: Složení provozních nákladů spalovny odpadů

6.3 Tržby

Příjmy zařízení na energetické využití odpadu tvoří především poplatky za přijatý odpad, prodej elektřiny, tepla a separovaných kovů. Jejich přehled je uveden v tabulce 22. Cena elektřiny i tepla byla stanovena na základě hodnot běžných pro teplárny a nejsou tedy uvažovány dotace, případná podpora vyrobené elektřiny je řešena v rámci citlivostní analýzy.

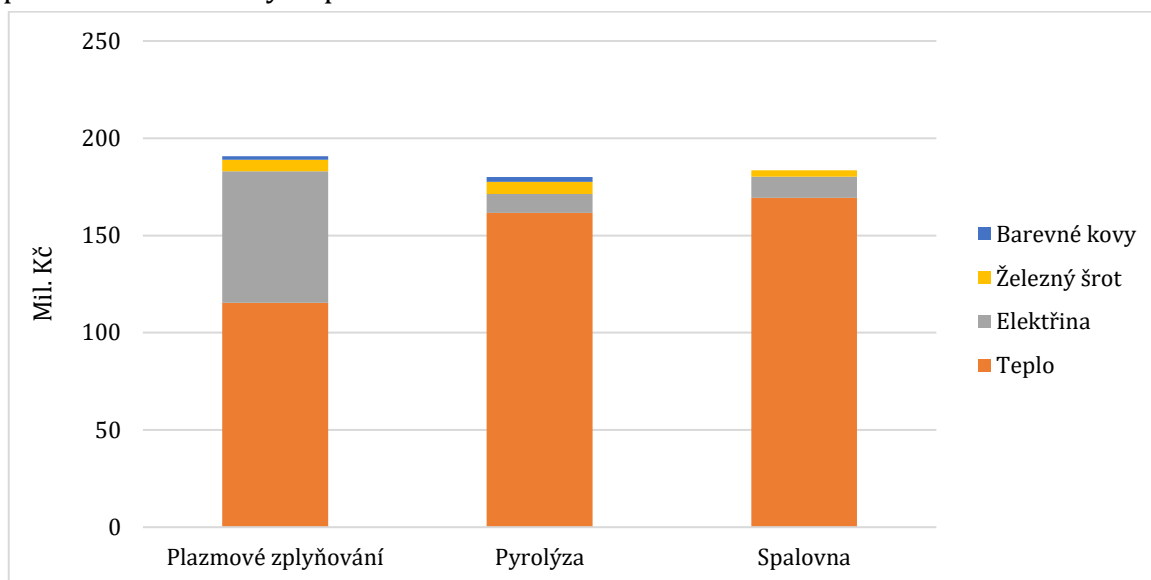
Tab. 22: Ocenění výstupů ZEVO

Elektřina	900	Kč/MWh
Teplo	220	Kč/GJ
Železný šrot	2 000	Kč/t
Barevné kovy	6 500	Kč/t

Současné ceny likvidace odpadu v českých ZEVO se pohybují od 850 do 2 900 Kč bez DPH v závislosti na zařízení a druhu odpadu. Cena za skládkování komunálního odpadu je nyní složena ze zákonného poplatku 500 Kč/t, ceny za uložení odpadu a rezervy na rekultivaci, a je tak často levnější alternativou nakládání s KO. Podle návrhu nového zákona o odpadech by ale do roku 2024 měl poplatek za skládkování využitelných odpadů vzrůst až na 2 000 Kč/t.

Ceny za likvidaci odpadů budou výsledkem výpočtu peněžních toků a to tak, aby NPV uvažovaná na dobu 30 let byla právě nulová. Pro jednotlivé varianty se tak cena za likvidaci tuny odpadu bude lišit a budou různé i příjmy za likvidaci odpadu.

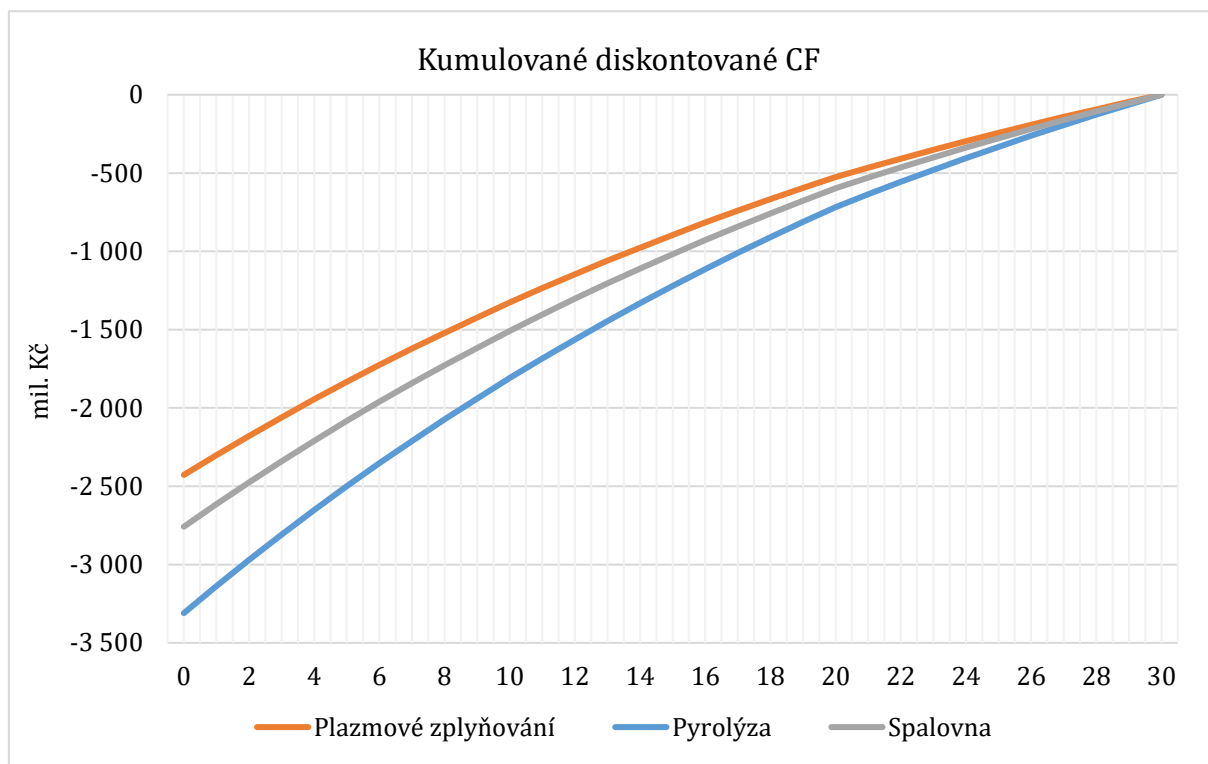
V následujícím grafu je přehled tržeb v osmém roce provozu jednotlivých variant ZEVO. Příjmy za železný šrot a barevné kovy jsou minoritní, největší podíl tvoří příjmy z prodeje tepla, v případě plazmového zplyňování jsou značné i příjmy z prodeje elektrické energie. Příjmy za likvidaci odpadu nejsou nyní v grafu uvažovány, jejich výše bude různá podle vypočítané mezní ceny odpadu.



Graf 21: Tržby jednotlivých variant ZEVO

6.4 Cash Flow

Pro výpočet Cash Flow je uvažováno zdanění zisku ve výši 19 % a rovnoměrné odpisování investice po dobu 20 let, diskontní sazba je pro všechny varianty zvolena ve výši 5 %. Investice je rozložena rovnoměrně do tří let a je také diskontována. Cílem výpočtu bylo určit mezní cenu za likvidaci odpadu tak, aby NPV uvažované na 30 let bylo nulové.



Graf 22: Kumulované diskontované Cash Flow

Z výpočtu diskontovaného peněžního toku byly určeny ceny odpadu, které odpovídají hranici návratnosti projektu. Mezní ceny za likvidaci odpadu jsou pro jednotlivé varianty různé, jejich přehled je uveden v následující tabulce.

Tab. 23: Mezní cena za likvidaci odpadu

Plazmové zplyňování	1962	Kč/t
Pyrolýza	1830	Kč/t
Spalování	1581	Kč/t

6.5 Citlivostní analýza

Citlivostní analýza je řešena na základě hodnot uvedených na začátku kapitoly ekonomického porovnání a je zpracována pro změnu ceny elektrické energie a odpadu. Čistá současná hodnota jednotlivých variant v závislosti na těchto parametrech je uvedena v tabulce 24.

Na spalovnu ani pyrolýzní technologii nemá změna elektrické energie velký vliv, zatímco NPV varianty plazmového zplyňování roste šestkrát rychleji. Konvenční spalovna je ekonomicky nejvýhodnější až do navýšení ceny elektrické energie na 1600 Kč/MWh, pro cenu elektřiny uvažovanou ve výpočtu cash flow to znamená navýšení o 80 %. Pro tuto cenu vykazuje plazmové zplyňování čistou současnou hodnotu vyšší než všechny ostatní varianty nezávisle na ceně odpadu.

Výrazná změna ceny elektrické energie by mohla nastat v případě ekonomické podpory výkupu elektřiny. Ve výpočtu cash flow je cena elektřiny zvolená na základě hodnot běžných pro teplárny, ale pro WtE zařízení by se cena mohla navýšit o podporu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů nebo výroby elektřiny z KVET.

Tab. 24: Závislost NPV na ceně elektřiny a odpadu [mil. Kč]

Cena odpadu Kč/t	Cena elektřiny [Kč/MWh]																	
	800			900			1 000			1 100			1 200			1 300		
	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P
1500	-144	-832	-533	-127	-725	-518	-110	-618	-502	-93	-511	-487	-76	-404	-471	-58	-297	-456
1600	12,4	-675	-376	29,6	-568	-361	46,9	-461	-345	64,1	-354	-330	81,3	-247	-315	98,5	-140	-299
1700	169	-518	-219	186	-411	-204	204	-304	-189	221	-197	-173	238	-90	-158	255	16,4	-142
1800	326	-361	-62	343	-254	-47	361	-147	-32	378	-41	-16	395	66,4	-1	412	173	14,4
1900	483	-204	94,4	500	-97	110	517	9,42	125	535	116	141	552	223	156	569	330	171
2000	640	-47	251	657	59,7	267	674	166	282	691	273	297	709	380	313	726	487	328

Cena odpadu Kč/t	Cena elektřiny [Kč/MWh]																	
	1 400			1 500			1 600			1 700			1 800			1 900		
	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P	S	PL	P
1500	-41	-190	-441	-24	-84	-425	-6,7	23,3	-410	10,5	130	-395	27,7	237	-379	44,9	344	-364
1600	116	-34	-284	133	73,3	-269	150	180	-253	167	287	-238	185	394	-223	202	501	-207
1700	273	123	-127	290	230	-112	307	337	-96	324	444	-81	341	551	-66	359	657	-50
1800	429	280	29,7	447	387	45,1	464	494	60,5	481	601	75,8	498	707	91,2	515	814	107
1900	586	437	187	603	544	202	621	651	217	638	757	233	655	864	248	672	971	263
2000	743	594	343	760	700	359	778	807	374	795	914	389	812	1 021	405	829	1 128	420

S – spalovna, PL – plazmové zplyňování, P – pyrolýza

7 Závěr

Práce zahrnuje definice a přehled v oblasti odpadového hospodářství a české legislativy týkající se nakládání s odpady. V rešerši jsou zpracované informace o vybraných způsobech energetického využití odpadu – pyrolýze, zplyňování a konvenčním spalování. Realizace zařízení pro energetické využívání odpadů vyžaduje vysoké investiční náklady, které například pro zařízení o kapacitě 100 tisíc tun odpadu ročně přesahují 2 miliardy Kč. V Evropě jsou v současnosti nejvyužívanějším WtE zařízením spalovny s celkovou kapacitou asi 60 mil. tun odpadu za rok, zatímco pyrolýzní a zplyňovací zařízení mají provozovanou kapacitu nepřesahující 1 mil. tun za rok.

Během energetického využití odpadů pomocí pyrolýzy, zplyňování nebo spalování vznikají tuhé zbytky z termického procesu, čištění spalin a procesních vod, které jsou většinou ukládány na skládky. Při vysokoteplotních procesech jsou tuhé zbytky vitrifikovány a díky inertním vlastnostem mohou najít využití např. při stavbě silnic nebo jako plnivo do betonových směsí. Zařízení musí být vybavena technologií čištění spalin, aby vyhovovala předepsaným emisním limitům. Při podstechiometrických procesech je omezena tvorba oxidů dusíku a PCDD/F a jako vedlejší produkt vzniká syntézní plyn, případně pyrolýzní olej. Syntézní plyn může být využit k výrobě paliv a chemikálií nebo k produkci elektrické energie. Pro výrobu elektrické energie v spalovnách s roštovým ohništěm je nejčastěji navrhovaná pára s jmenovitými parametry páry do 400 °C a 4 MPa z důvodu zvýšeného rizika koroze při parametrech vyšších.

Hlavní část této práce je věnována porovnání zmíněných způsobů energetického využití odpadu z hlediska technického a ekonomického, k čemuž byly vybrány 3 varianty ZEVO s kapacitou 100 tisíc tun ročně: plazmové zplyňování s plynovou a parní turbínou, pyrolýza a spalovna s roštovým ohništěm. Pro zvolené hodnoty popsané v kapitole 6 se jeví jako nejvýhodnější varianta konvenční spalovny, která stejnou dobu návratnosti vykazuje při nižší ceně za zpracování odpadu. Ve výpočtech nejsou zohledněny možné dotace a podpora výkupu elektřiny a pokud by byl výkup elektřiny ze ZEVO ekonomicky podporován, změnily by se nejvíce příjmy plazmového zplyňování. Uvažovaná jednotka plazmového zplyňování totiž produkuje šestkrát více elektřiny k prodeji než ostatní varianty a zvýšením ceny elektřiny by se doba návratnosti pro tuto variantu výrazněji zkrátila. Ekonomická výhodnost zařízení pro energetické využití závisí především na výši ceny za zpracováváný odpad a na ceně vykupované elektřiny a tepla. Při změně ceny za likvidaci odpadu bude vždy diskontovaná doba návratnosti nejkratší u varianty konvenčního spalování, pro kterou je minimální cena odpadu k proveditelnosti projektu 1581 Kč/t. Pro danou cenu odpadu by se plazmové zplyňování stalo výhodnější při výkupu elektrické energie za 1566 Kč/MWh.

Z provedené rešerše vyplývá, že proces pyrolýzy je vhodný pro homogenní palivo a používá se především pro zpracování odpadních plastů nebo pneumatik. Jedná se především o menší jednotky, jejichž produktem je pyrolýzní olej. Příkladem pyrolýzního zařízení zpracovávající směsný odpad je jednotka SBV ve Fürthu, která ale byla kvůli provozním problémům odstavena. Na základě výše uvedených informací bych proto

proces pyrolýzy doporučila pro homogenní odpady, popřípadě pro procesy kombinované. Kombinace pyrolýzy a zplyňování je využita například v procesu Thermoselect, který zpracovává průmyslový i komunální odpad.

Plazmové zplyňování představuje atraktivní způsob nakládání s odpady, především protože generuje syntézní plyn zcela zbaven dehtů a inertní strusku. Dalšími výhodami jsou nižší investiční náklady ve srovnání se spalovnami a účinnost výroby elektrické energie, která dosahuje až 34 %. Proces ale není autotermní a je potřeba energii dodávat prostřednictvím plazmových hořáků, jejichž pravidelná výměna navíc zvyšuje provozní náklady. Jednotky plazmového zplyňování jsou realizovány s širokým rozsahem zpracovatelské kapacity, a to od jednotek 8 tisíc tun za rok až po projektovanou kapacitu 300 tisíc tun odpadu ročně. Plazmovou technologií je možné zpracovávat různé odpady včetně komunálního, průmyslového, nebezpečného nebo čistírenských kalů. I přes zmiňované výhody se často při výběru WtE zařízení varianta plazmového zplyňování opouští pro nedostatek referencí. Tuto skutečnost by mohlo změnit zprovoznění projektu Tees Valley s plánovanou celkovou kapacitou 700 tisíc tun odpadu za rok, na jehož realizaci se podílí společnost Alter NRG.

Jak již bylo zmíněno, tvoří spalovny odpadu převážnou většinu WtE zařízení. Jedná se o technologii ověřenou řadou komerčních jednotek, z nichž 4 stojí na území České republiky. Realizovaná kapacita spaloven se pohybuje od 10 tisíc tun odpadu za rok pro malé jednotky až po zařízení velká se zpracovatelskou kapacitou přes 400 tisíc tun, nejčastěji jsou ale spalovny koncipovány s kapacitou 80 až 250 tisíc tun odpadu ročně. Nevýhodou malých zařízení pro energetické využití odpadu je dodržení emisních limitů, které jsou stejné jako u zařízeních velkých. Je tedy potřeba využít stejně obsáhlý proces čištění spalin jako u jednotek velkých, což může zvýšit měrné investiční náklady.

Pro energetické využití komunálního odpadu se jeví jako nejlepší varianta roštové spalovny, která byla i v ekonomickém posouzení nejvýhodnější. Variantu bych doporučila především pro množství existujících referencí a zvládnutí dané technologie. Jednotky mohou být menších velikostí pro zpracování odpadu v nejbližším okolí, ty jsou ale často spojeny s vyššími měrnými investičními náklady než zařízení větší. Hlavní nevýhodu spaloven shledávám v negativním postoji veřejnosti k výstavbě nových zařízení, který by se mohl v případě plazmové technologie změnit. Navíc jsou příjmy spaloven závislé na odběru elektřiny a tepla, naproti tomu může být syntézní plyn ze zplyňovacích procesů přeměněn na hodnotnější paliva a využit jinde než v místě vzniku. Dalším krokem pro rozšíření využití plazmového zplyňování je z mého pohledu bezproblémový provoz jednotek nyní realizovaných v rámci projektu Tees Valley.

Seznam použité literatury

- [1] Vyhláška č. 93/2016 Sb., o Katalogu odpadů. In: Sběrka zákonů. 2016, částka 38.
- [2] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů. 2001, částka 71.
- [3] BENEŠOVÁ, Libuše. Výzkum Vlastností komunálních odpadů a optimalizace jejich využívání. Praha, 2010. Projekt SPf1/132/08 programu VaV MŽP. Univerzita Karlova v Praze
- [4] CHANDRAPPA, Ramesha a Diganta Bhusan DAS. Waste Quantities and Characteristics [online]. 47 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1007/978-3-642-28681-0_2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-28681-0_2
- [5] TRÁVNÍČEK, Petr. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Brno, 2015. Mendelova univerzita v Brně. ISBN 9788075092069.
- [6] Souhrnná data o odpadovém hospodářství ČR v letech 2009 - 2015 [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove_hospodarstvi_data_2015/\\$FILE/OODP-Souhrnna_data_2009_2015-20160930.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove_hospodarstvi_data_2015/$FILE/OODP-Souhrnna_data_2009_2015-20160930.pdf)
- [7] Eurostat. Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method. [online] [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdpc240&language=en>
- [8] CHEN, Dezhen, Lijie YIN, Huan WANG a Pinjing HE. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. Waste Management [online]. 2014, 34(12), 24662486 [cit. 2017-03-20]. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.08.004. ISSN 0956053x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X14003596>
- [9] CAMPBELL, Frank. An Overview of the History and Capabilities of the Thermoselect Technology [online] Dostupné z: <http://www.swananys.org/pdf/Thermoselect.pdf>
- [10] CHENG, Hefa a Yuanan HU. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. Bioresource Technology [online]. 2010, 101(11), 3816-3824 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.01.040. ISSN 09608524. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852410000970>
- [11] KURAŠ, Mečislav. Odpady a jejich zpracování. Chrudim: Ekomonitor, 2014. ISBN 978-80-86832-80-7.
- [12] Reference document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. European Commission, 2006.

- [13] ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management* [online]. 2012, **32**(4), 625-639 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025. ISSN 0956053x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X11004314>
- [14] *KIC Odpady* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.kic-odpady.cz/jak-to-chodi.html>
- [15] HE, Maoyun, Bo XIAO, Shiming LIU, Zhiquan HU, Xianjun GUO, Siyi LUO a Fan YANG. Syngas production from pyrolysis of municipal solid waste (MSW) with dolomite as downstream catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2010, **87**(2), 181-187 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.11.005. ISSN 01652370. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237009001612>
- [16] DUCHARME, Caroline a Nickolas THEMELIS. Analysis of Thermal Plasma-Assisted Waste-to-Energy Processes. 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference [online]. ASME, 2010, 101-106 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1115/NAWTEC18-3582. ISBN 978-0-7918-4393-2. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1607022>
- [17] del ALAMO, G., A. HART a P. LUNDSTRØM. Characterization of syngas produced from MSW gasification at commercial-scale ENERGOS Plants. *Waste Management* [online]. 2012. 1835-1842 [cit. 2017-03-21]. ISBN 0148-2076. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12001857>
- [18] KARÁSEK, René. Transfer těžkých kovů při spalování odpadů. Vysoké učení technické v Brně, 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33099
- [19] SAKO Brno, a.s. Výroční zpráva 2015 [online] Dostupné z: <http://www.sako.cz/upload/1465896127.pdf>
- [20] BOSMANS, A., I. VANDERREYDT, D. GEYSEN a L. HELSEN. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining. *Journal of Cleaner Production*. 2013, **55**, 10-23. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.032. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612002557>
- [21] Fichtner Consulting Engineers Ltd. The Viability of Advanced Thermal Treatment of MSW in the UK. London: ESTET, 2004. Dostupné také z: http://energy.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2016/05/thermal_treatment_report.pdf
- [22] ED. BY CENERTEC, CENTRO DE ENERGIA E TECNOLOGICA. AUTHORS, ALBINO REIS, ed. by Cenertec, Centro de Energia e Tecnologica. authors, Albino Reis, John WARD a Wolfgang LEUCKEL. 8th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers Vilamoura, Hotel D. Pedro Golf Resort, Portugal, 25-28 March 2008

- [online]. Rio Tinto, Portugal: Cenertec-Centro de Energia e Tecnologia, 2008 [cit. 2017-03-23]. ISBN 978-972-9930-935.
- [23] HE, M, B XIAO, Z HU, S LIU, X GUO a S LUO. Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2009, **34**(3), 1342-1348 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.023. ISSN 03603199. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319908016844>
- [24] CHEN, Chong, Yu-qi JIN, Jian-hua YAN a Yong CHI. Simulation of municipal solid waste gasification for syngas production in fixed bed reactors. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* [online]. 2010, **11**(8), 619-628 [cit. 2017-03-23]. DOI: 10.1631/jzus.A0900792. ISSN 1673-565x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1631/jzus.A0900792>
- [25] PANEPINTO, Deborah, Vita TEDESCO, Enrico BRIZIO a Giuseppe GENON. Environmental Performances and Energy Efficiency for MSW Gasification Treatment. *Waste and Biomass Valorization* [online]. 2015, **6**(1), 123-135 [cit. 2017-03-24]. DOI: 10.1007/s12649-014-9322-7. ISSN 1877-2641. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-014-9322-7>
- [26] Technologický proces. SAKO Brno [online]. 2013 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/stranka/cz/62/technologicky-proces/>
- [27] Energetické využívání odpadů. Pražské služby [online]. 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.psas.cz/index.cfm/sluzby-firmam/zarizeni-pro-energeticke-vyuzivani-odpadu/energeticke-vyuzivani-odpadc5af/>
- [28] LECKNER, Bo. Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units. *Waste Management*. 2015, **37**, 13-25. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.04.019. ISSN 0956053x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X14001597>
- [29] JEVIČ, Petr. Termolýzní zpracování zbytkové biomasy, separovaných plastových a celulózových podílů tuhého komunálního odpadu pro energetické a surovinové účely: certifikovaná metodika. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2012. ISBN 978-80-86884-67-7.
- [30] NIPATTUMMAKUL, Nimit, Islam I. AHMED, Somrat KERDSUWAN a Ashwani K. GUPTA. Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2010, **35**(21), 11738-11745 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.032. ISSN 03603199. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031991001671X>
- [31] LUO, Siyi, Bo XIAO, Zhiquan HU, Shiming LIU, Yanwen GUAN a Lei CAI. Influence of particle size on pyrolysis and gasification performance of municipal solid waste in a fixed bed reactor. *Bioresource Technology* [online]. 2010, **101**(16),

- 6517-6520 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.03.060. ISSN 09608524. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852410005377>
- [32] LUO, Siyi, Yangmin ZHOU a Chuijie YI. Syngas production by catalytic steam gasification of municipal solid waste in fixed-bed reactor. *Energy* [online]. 2012, **44**(1), 391-395 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1016/j.energy.2012.06.016. ISSN 03605442. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544212004677>
- [33] WARREN, Kathryn, Simon GANDY, Georgina DAVIS, Adam READ, Jackie FITZGERALD a Emelia HOLDAWAY. Waste to Energy Background Paper [online]. 2013. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z:
<http://www.zerowaste.sa.gov.au/upload/resource-centre/publications/waste-to-energy/waste%20to%20energy%20background%20paper%20final.pdf>
- [34] JÍLKOVÁ, Lenka, Karel CIAHOTNÝ a Radek ČERNÝ. Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů. *Paliva* [online]. 2012, **4**(3), 74-80 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z:
<http://paliva.vscht.cz/download.php?id=76>
- [35] FITE a.s. Studie zařízení na pyrolytický rozklad odpadů. [online] [cit. 2017-04-6]. Dostupné z: http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf
- [36] Gershman, Brickner & Bratton, Inc. *Gasification of Non-Recycled Plastics From Municipal Solid Waste In the United States* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://plastics.americanchemistry.com/Sustainability-Recycling/Energy-Recovery/Gasification-of-Non-Recycled-Plastics-from-Municipal-Solid-Waste-in-the-United-States.pdf>
- [37] *Biomass Technology Group* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://www.btgworld.com/en/rtd/technologies/fast-pyrolysis>
- [38] *Waste to Energy Research and Technology Council* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.wtert.eu/default.asp?Menu=12&ShowDok=15>
- [39] BELGIORNO, V., G. DE FEO, C. DELLA ROCCA a R.M.A. NAPOLI. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*. 2003, **23**(1), 1-15. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00149-6. ISSN 0956053x. Dostupné také z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X02001496>
- [40] *Odpadové fórum* [online]. 2015, **16**(4) [cit. 2017-05-25]. ISSN 1212-7779. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/of-04-2015-pdf.pdf>
- [41] *4.5 Analýza a vyhodnocení možnosti aplikace nových technologií k energetickému využití odpadů* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-4_5_MZP_FIN-20160810.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-4_5_MZP_FIN-20160810.pdf)

- [42] ISWA. Alternative Waste Conversion Technologies. [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiDrN3YvYvUAhWJLhoKHUFVCCsQFggoMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.iswa.org%2Findex.php%3FeID%3Dtx_iswaknowledgebase_download%26documentUId%3D3155&usg=AFQjCNHVt2SHIgyw6LZAaF0W9RUa3PkAjg&sig2=-R76OynKNCdb29cIOql0KQ
- [43] *Alter NRG* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: http://www.alternrg.com/waste_to_energy
- [44] *Energos* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.energus.com/our-plants/>
- [45] MOLEK, Tomáš. *Analýza využití plazmového zplyňování odpadů v ČR* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66864/F3-DP-2017-Molek-Tomas-DP_T_%20Molek.pdf?sequence=-1
- [46] Studie proveditelnosti Chotíkov, porovnání variant závodů na využití SKO [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: http://www.plzenskateplarenska.cz/skladka/upload/File/kestazeni/Studie%2060%20tis.%20tun/Studie%20proved_%20%20text%2060%20kt%20za%20rok.pdf
- [47] RICHERS, U., B. BERGFELDT. Das Siemens Schwell-Brenn-Verfahren. [online]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiW8u6QvYvUAhXEWRoKHQm7D2gQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fpublikationen.bibliothek.kit.edu%2F270040311%2F3813582&usg=AFQjCNENSNfAvESKUhZB2Cl5HS8ib2DLng&sig2=g_1rsC5mlZMPsM4ykX6llw
- [48] YAMADA, Sumio, Masuto SHIMIZU a Fumihiro MIYOSHI. Thermoselect Waste Gasification and Reforming Process [online], 21-26 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/003/pdf/003-05.pdf>
- [49] Plasco obtains creditor protection, 80 jobs terminated. In: CBCNEWS [online]. 2015 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.cbc.ca/news/canada/ottawa/plasco-obtains-creditor-protection-80-jobs-terminated-1.2951751>
- [50] Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů. In: Sbírka zákonů České republiky. 2012, částka 69.
- [51] Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů. In: Sbírka zákonů České republiky. 2012, částka 151.
- [52] Nařízení vlády č. 352/2014 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024. 2014, částka 141.

- [53] YOUNG, Gary C. *Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons*. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2010. ISBN 978-0-470-53967-5.
- [54] Plán odpadového hospodářství. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z:
[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/\\$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf)
- [55] *4.3 Analýza potenciálu energetického využití odpadů v ČR včetně ekonomického a regionálního vyhodnocení*. [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-4_3_MZP_FIN-20160810.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-4_3_MZP_FIN-20160810.pdf)
- [56] *Greenlight Energy Solution* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://www.glescorp.com/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma zařízení na energetické využívání odpadů [14]	15
Obr. 2: Energetické využití odpadu pyrolýzou [20]	16
Obr. 3: Proces Thermoselect [9]	19
Obr. 4: Pyrolýzní jednotka Babcock [5].....	20
Obr. 5: Proces SBV [47].....	21
Obr. 6: Energetické využití odpadu zplyňováním [20]	22
Obr. 7: Protiproudý zplyňovací reaktor [22]	24
Obr. 8: Souproudý zplyňovací reaktor [22]	25
Obr. 9: Fluidní zplyňovací reaktory [39]	26
Obr. 10: Schéma TPS [29]	28
Obr. 11: Plazmová zplyňovací jednotka Alter NRG [43]	29
Obr. 12: Energetické využití odpadu spalováním [20].....	30
Obr. 13: ZEVO Malešice [27].....	33
Obr. 14: SAKO Brno [26]	34
Obr. 15: Využití syntézního plynu [36]	37
Obr. 16: Schéma RWE-ConTherm [8]	39

Seznam tabulek

Tab. 1: Kategorie odpadu [1]	7
Tab. 2: Vlastnosti vybraných složek komunálního odpadu [4]	8
Tab. 3: Porovnání skládkování, kompostování a spalování odpadu [10]	10
Tab. 4: Návrh poplatků za ukládání odpadu na skládku	13
Tab. 5: Chemické reakce pyrolýzy [5]	16
Tab. 6: Chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolytického oleje [5]	18
Tab. 7: Zařízení Thermoselect [36]	19
Tab. 8: Reakce probíhající při zplyňování [13]	23
Tab. 9: Příklady zařízení na zplyňování odpadu [13]	27
Tab. 10: Srovnání spalování na roštovém a fluidním loži [10]	32
Tab. 11: WtE zařízení pro zpracování MSW v Evropě v letech 2011-2012 [28]	38
Tab. 12: Zplyňovací zařízení společnosti Energos [44]	40
Tab. 13: Současné použití technologií tepelného zpracování odpadů pro hlavní druhy odpadu [11]	42
Tab. 14: Výhřevnost některých druhů odpadu [12]	43
Tab. 15: Emise při pyrolýzním nebo zplyňovacím zpracování odpadu (0 °C, 11 % O ₂) [42]	48
Tab. 16: Nároky na čištění syntézního plynu [13]	49
Tab. 17: Jmenovité parametry páry v ZEVO	50
Tab. 18: Shrnutí vybraných technologií	51
Tab. 19: Účinnost výroby elektrické energie [21]	51
Tab. 20: Invest. náklady vybraných technologií energetického využití odpadu [16, 36, 42, 46, 53]	53
Tab. 21: Výše investičních nákladů pro jednotlivé varianty EVO	54
Tab. 22: Ocenění výstupů ZEVO	57
Tab. 23: Mezní cena za likvidaci odpadu	59
Tab. 24: Závislost NPV na ceně elektřiny a odpadu [mil. Kč]	61

Seznam grafů

Graf 1: Skladba komunálního odpadu z domácností [3].....	8
Graf 2: Složení KO v roce 2012 [54].....	9
Graf 3: Produkce a nakládání s odpady v ČR v letech 2009-2015 [6]	10
Graf 4: Produkce a nakládání s komunálními odpady v ČR v letech 2009-2015 [6]	11
Graf 5: Nakládání se směsným komunálním odpadem ve vybraných státech EU [7].....	11
Graf 6: Výtěžnost produktů pyrolýzy v závislosti na teplotě [15]	18
Graf 7: Výtěžnost produktů zplyňování v závislosti na teplotě [32].....	35
Graf 8: Závislost složení syntézního plynu na ekvivalentním poměru [13].....	36
Graf 9: Složení syntézního plynu v závislosti na teplotě [24].....	36
Graf 10: Složení zpracovávaného odpadu v Thermoselect Chiba [36]	44
Graf 11: Složení pyrolýzního plynu v závislosti na velikosti odpadu [31]	44
Graf 12: Složení syntézního plynu v závislosti na velikosti odpadu [31].....	45
Graf 13: Zastoupení technologií pro čištění kyselých složek ve spalinách v evropských EVO [55]	48
Graf 14: Efektivita výroby elektrické energie a tepla [41].....	50
Graf 15: Závislost měrných investičních nákladů na provozní kapacitě [16, 36, 42, 46, 53]	54
Graf 16: Výše fixních a variabilních provozních nákladů variant EVO	55
Graf 17: Variabilní náklady jednotlivých variant EVO.....	56
Graf 18: Složení provozních nákladů plazmového zplyňování	56
Graf 19: Složení provozních nákladů pyrolýzy.....	57
Graf 20: Složení provozních nákladů spalovny odpadů.....	57
Graf 21: Tržby jednotlivých variant ZEVO	58
Graf 22: Kumulované diskontované Cash Flow	59