



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ZPLYŇOVÁNÍ ODPADU

WASTE GASIFICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Sedláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Lachman

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Tomáš Sedláček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Lachman**
Akademický rok: 2019/20

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

Zplyňování odpadu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zplyňování odpadu je jednou z možností jeho termické likvidace. Z původního paliva vzniká hořlavý plyn, z kterého jsou dále odstraněny nečistoty a nežádoucí složky. Tento plyn je možné spalovat v zařízeních s vyšší účinností a bez složitého systému čištění spalin. V porovnání se spalováním odpadu má zplyňování řadu výhod. Naráží však na technické, legislativní i ekonomické překážky.

Cíle bakalářské práce:

- Zhodnotit složení a vlastnosti odpadu jako paliva.
- Popsat proces zplyňování, výsledné produkty a systém čištění plynu.
- Vypracovat rešerši technologií používaných pro zplyňování odpadu.
- Popsat problematiku zplyňování odpadu v ČR.

Seznam doporučené literatury:

WALDHEIM, Lars. Gasification of Waste for Energy Carriers: A review. IEA Bioenergy, 2018. ISBN 978-1-910154-56-4.

VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-x.

OBROUČKA, Karel. Termické odstraňování a energetické využívání odpadů. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-248-0009-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou zplyňování odpadu. První část zahrnuje definici odpadu se zaměřením na komunální odpad, jeho zhodnocení jako palivo na základě jeho složení a vlastností, v tomto případě výhřevnosti. Nakonec je odpad porovnán s dalšími běžně užívanými tuhými palivy. Ve druhé části jsou uvedeny a popsány termické procesy aplikované na technologie energetického využití odpadu, kde je podrobněji rozveden proces zplyňování, jeho výsledné produkty, obsah znečišťujících látek v těchto produktech a jejich odstranění. V další části jsou popsány technologie používané na zplyňování odpadu. V poslední části je rozebrána problematika zplyňování odpadů na území České republiky.

Klíčová slova

Zplyňování odpadu, čištění plynu, syntézní plyn, zplyňovací reaktor

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the topic of waste gasification. The first part includes the definition of waste with the focus on municipal solid waste, its evaluation as fuel on the basis of its contents and properties, in this case the heating value. Eventually the waste is compared with other normally used solid fuels. The second part presents and describes the thermal processes applied to waste-to-energy technologies, where the gasification is explained in more detail, its final products, the content of contaminants in these products and their removal. The next part deals with technologies used for waste gasification. The last part deals with the issue of waste gasification in the Czech republic.

Key words

Waste gasification, gas treatment, synthetic gas, gasification reactor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEDLÁČEK, Tomáš. *Zplyňování odpadu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124832>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Jakub Lachman.

PROHLÁŠENÍ

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

.....
Datum

.....
Tomáš Sedláček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jakobovi Lachmanovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Složení a vlastnosti odpadu jako paliva.....	12
1.1 Komunální odpad (KO)	12
1.2 Nakládání s odpady	13
1.3 Odpad jako palivo	14
1.3.1 Výhřevnost odpadu	14
1.4 Energetické využití odpadu	16
1.4.1 Spalování	16
1.4.2 Pyrolýza.....	16
2 Zplyňování.....	17
2.1 Procesy zplyňování	18
2.2 Zdroje tepla při zplyňování	19
2.2.1 Autotermní zplyňovač	19
2.2.2 Alotermní zplyňovač	19
2.3 Kontaminanty.....	19
2.4 Úvod do technologií čištění plynu	20
2.4.1 Odstranění částic	20
2.4.2 Odstranění halogenovodíků a oxidů síry.....	21
2.4.2.1 Suchá metoda	21
2.4.2.2 Polosuchá metoda.....	21
2.4.2.3 Mokrý metoda.....	22
2.4.3 Odstranění NO _x	22
2.4.4 Odstranění dehtu	22
2.4.5 Odstranění PCDD a PCDF	23
3 Produkty zplyňování a jejich využití.....	24
3.1 Syntézní plyn	24
3.2 Využití syntézního plynu	24
3.2.1 Fischerova-Tropschova syntéza	25
3.2.2 Spalovací motor.....	25
3.2.3 Plynová turbína	26
3.2.4 Výroba vodíku.....	26
4 Technologie používané na zplyňování odpadu	27
4.1 Účinnost zplyňování	27
4.2 Zplyňovací reaktory s pevným ložem.....	27
4.2.1 Souproudové reaktory	28
4.2.2 Protiproudové reaktory.....	28
4.2.3 Reaktor s křížovým tokem	29
4.3 Zplyňovací reaktory s fluidním ložem.....	29
4.3.1 Reaktory se stacionární fluidní vrstvou.....	30
4.3.2 Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou	30

4.4	Zplyňovací reaktory s unášivým proudem	31
4.5	Konkrétní příklady zplyňovacích zařízení	31
4.5.1	Enerkem	32
4.5.1.1	Využití	32
4.5.2	Advanced Plasma Power Ltd. (APP)	33
4.5.3	Ebara Ube Process (EUP)	34
4.5.4	Další příklady	35
5	Zplyňování odpadů v České republice	36
5.1	PGP Terminal, a.s.	36
5.1.1	Srovnání se spalováním	37
5.2	Millenium Technologies	38
	ZÁVĚR	39
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
	SEZNAM OBRÁZKŮ	45
	SEZNAM TABULEK	46

ÚVOD

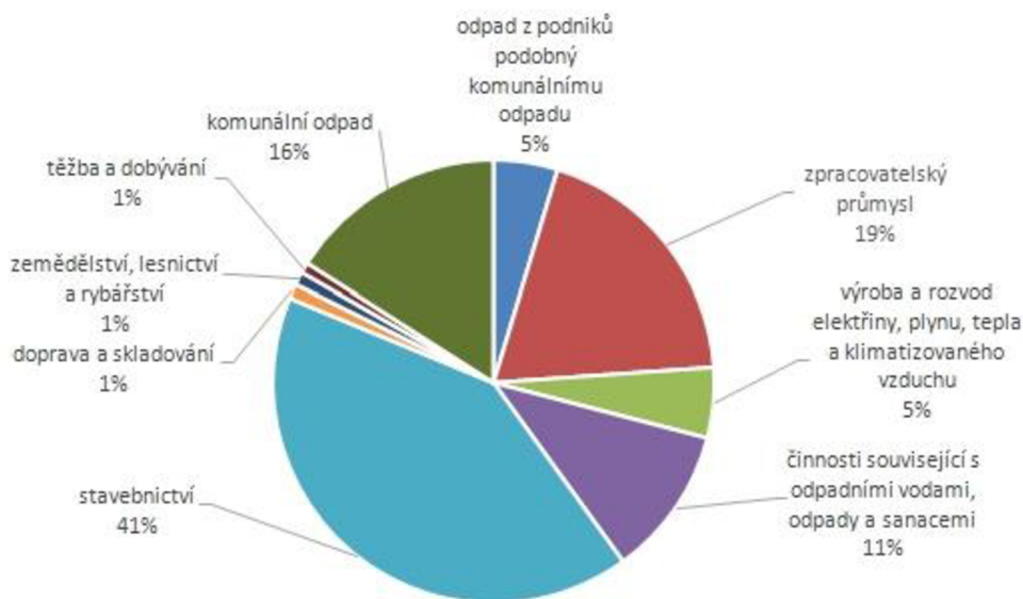
Moderní svět je závislý na produkci energie, aby vše fungovalo tak, jak má. V současné době je tato potřeba dodávána velmi často neobnovitelnými přírodními zdroji jako je ropa, hnědé uhlí a černé uhlí. Nejen, že jsou tyto zdroje omezené, jejich zpracování má negativní vliv na životní prostředí ve formě spalin, které vypouští do ovzduší. Tyto spaliny přidávají na síle skleníkového efektu, zejména oxid uhličitý. Nároky na produkci energie se s prosperující společností neustále zvyšují. Se snižujícím se množstvím fosilních paliv se hledají nové alternativy na produkci energie. Mezi vhodné alternativy patří využití obnovitelných zdrojů energie. Příkladem jsou zařízení na zpracování slunečního záření, větru nebo vodní elektrárny.

Další možný zdroj energie je při odstraňování odpadu termickými procesy, jakými jsou spalování, pyrolýza a zplyňování. Velké zastoupení odpadu je skládkováno a půda, na které dochází ke skládce, je znehodnocována, nemluvě o škodě na životní prostředí v blízkosti skládky. Energetické využití odpadu je poměrně nízkou prioritou hierarchie nakládání s odpady. Předšlé cíle hierarchie avšak zachytí pouze malou frakci celkového množství odpadu. Tudíž se energetické využití odpadu jeví jako vhodná alternativa, jak se vypořádat se skládkováním, protože dochází ke značné redukci množství odpadu.

Převážně se jedná o spalování, kde zařízení produkuje teplo a elektrickou energii spálením odpadu. Více náročnější a nákladově dražší je metoda zplyňování. Zde z komplexního procesu získáváme syntézní plyn. Surový syntézní plyn obsahuje značné množství znečišťujících látek, které je nutné redukovat pod stanovené emisní limity. Čistý syntézní plyn je poté možné použít na velkou řadu aplikací bez nutnosti složitějšího systému čištění plynu.

1 Složení a vlastnosti odpadu jako paliva

Odpad je jakákoliv látka nebo předmět, kterých se držitel zbavuje nebo má v úmyslu se zbavit nebo se od něho požaduje, aby se jich zbavil. [1] Odpad je dělen do mnoha skupin (podle vlastností nebo jeho původu), které určuje Katalog odpadů dle vyhlášky 93/2016 Sb. o Katalogu odpadů. [2] Hlavními typy odpadu jsou stavební a demoliční odpady, odpady z tepelných procesů, podnikatelské odpady apod. Zaměření bude především na komunální odpad (KO). [3]



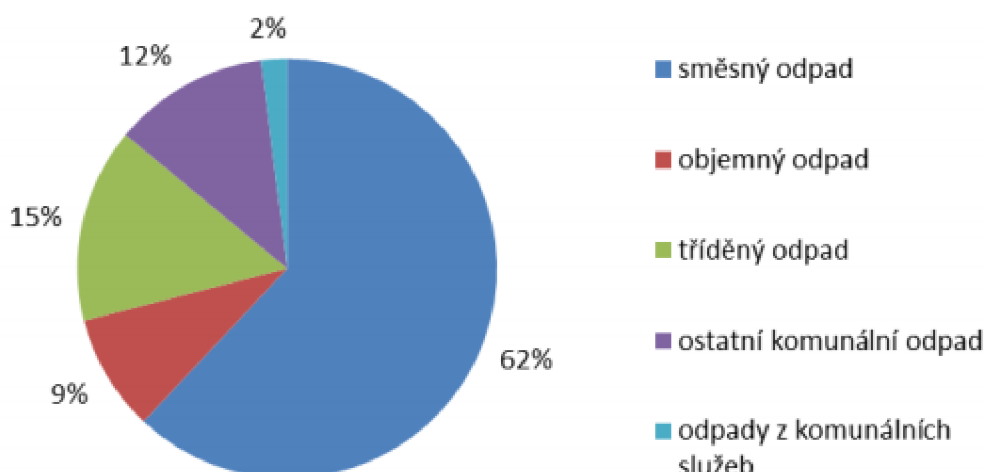
Obr. 1.1 Produkce komunálního odpadu a odpadu z podniků v roce 2012 v ČR [7].

1.1 Komunální odpad (KO)

Definován v souladu se zákonem č. 185/2001 Sb. o odpadech, je pojem podle §4 b) vymezen takto: Veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. [5]

Komunální odpady zahrnují:[6]

- Tuhý komunální odpad – takto je označen odpad, který je částí komunálního odpadu, jehož celek nebo jeho jednotlivé části za normálních atmosférických podmínek udržují svůj tvar a objem. Lze také definovat jako domovní odpad.
- Separovaně sbírané složky – část komunálního odpadu, která lze třídit, spadá do této skupiny: papír, sklo, nápojové kartóny atd.
- Nebezpečný odpad – část KO vykazující nebezpečný vliv na zdraví lidí, zvířat a životní prostředí obecně.
- Objemný odpad – odpad většího objemu.
- Zbytkový komunální odpad – cokoliv dalšího, co nelze kategorizovat do žádných z výše uvedených skupin.

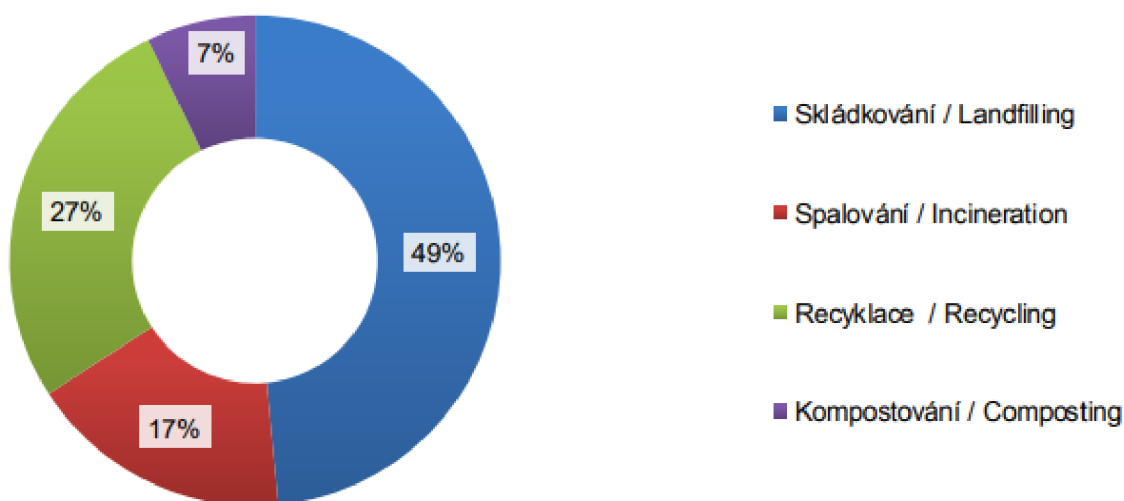


Obr. 1.2 Složení komunálního odpadu v ČR 2015 [8].

1.2 Nakládání s odpady

Hlavním dokumentem o nakládání s odpady v EU je směrnice 2008/98/ES, přijata v roce 2008 Evropskou komisí. Obsahem směrnice je vymezení pětistupňové hierarchie nakládání s odpady, kde jedním z cílů je předcházení vzniku odpadů. Dále se stanovuje recyklovat alespoň 50 % komunálního odpadu (zahrnující plasty, sklo, papír a kovy) a také 70 % odpadu ze stavebnictví do roku 2020. [7]

Vyrovnat se s touto směrnicí je pro Českou republiku velice těžký úkol, což je patrné z Obr. 1.3, kde téměř polovina komunálního odpadu je skládkována. V souladu s hierarchií nakládání s odpady by měl být kladen důraz především na snížení množství odpadů. Vhodnou alternativou ke skládkování je právě energetické využití odpadu. To probíhá nejčastěji spalováním. Další možností je zplyňování. Spalování v České republice silně převažuje. [1] [7]



Obr. 1.3 Nakládání s komunálními odpady v ČR roku 2017 [1].

1.3 Odpad jako palivo

Největším problémem využití odpadu jako paliva je jeho vysoká rozdílnost složení. Tato vlastnost závisí na několika faktorech, jedním z nich je oblast svozu odpadu a dále může záviset i na ročním období. V odpadu je také obsaženo velké množství nebezpečných látek, které se projeví ve spalinách. Nebezpečné látky je třeba redukovat. Toto probíhá zpracováním odpadu (např. tříděním) před samotným procesem spalování. Dále jsou redukovány ve spalinách. [7]

1.3.1 Výhřevnost odpadu

Výhřevnost je vlastnost paliva, která udává, kolik energie se uvolní úplným spálením jedné jednotky (obvykle 1 kg). Proti spalnému teplu není v hodnotě zahrnuto měrné skupenské teplo páry. Teplo páry je nevyužitelné a uniká v plynném stavu se spalinami. [26] Při porovnání obecné výhřevnosti SKO, pohybující se kolem 7 až 15 MJ/kg a výhřevnosti palivového dřeva (kolem 15 MJ/kg) nebo hnědého uhlí (kolem 17 MJ/kg), se dá usoudit, že je odpad méně efektivní, ale stále využitelný na účel produkci energie. [9] Výhřevnost jednotlivých složek komunálního odpadu je uvedena v Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Výhřevnost složek komunálního odpadu [7].

Druh odpadu	Výhřevnost [MJ/kg]
Papír	15,7
Plasty	32,7
Polyetylen	43,4
Polystyren	38,0
PVC	22,5
Textil	18,3
Potraviny	3,2
Smetky	6,0
Štěpka, dřevo	12,4
Sklo	0,2

V Tab. 1.2 jsou vyjádřeny přibližné rozptyly prvkového složení komunálního odpadu dle dokumentu BREF¹. Nejvíce je zastoupen uhlík a další hořlavé látky, ale nachází se zde i nebezpečné látky, čímž je především síra, chlór a fluor. Dále se na složení podílí i těžké kovy. Těmito látkami jsou ovlivňovány konečné náklady na energetické zpracování, zejména v procesu čištění spalin, respektive čištění plynu u zplyňování.

¹ Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.

Tab. 1.2 Prvkové složení komunálního odpadu dle BREF [3].

Prvek	SKO, Německo 2001-2002
Uhlík (%hm)	18-40
Vodík (%hm)	1-5
Dusík (%hm)	0,2-1,5
Kyslík (%hm)	15-22
Síra (%hm)	0,1-0,5
Fluor (%hm)	0,035-0,1
Chlór (%hm)	0,1-1
Olovo (mg/kg)	100-2000
Kadmium (mg/kg)	1-15
Měď (mg/kg)	200-700
Zinek (mg/kg)	400-1400
Rtuť (mg/kg)	1-5
Thalium (mg/kg)	<0,1
Mangan (mg/kg)	250
Vanad (mg/kg)	4-11
Nikl (mg/kg)	30-50
Kobalt (mg/kg)	3-10
Arsen (mg/kg)	2-5
Chrom (mg/kg)	40-200
Selen (mg/kg)	0,2-15
PCB (mg/kg)	0,2-0,4

1.4 Energetické využití odpadu

Zařízení v České republice využívající odpad pro generaci energie a tepla jsou obecně označována jako zařízení na energetické využití odpadů (ZEVO). V Evropě dle dat CEWEP z roku 2017 bylo v provozu 518 ZEVO s celkovou roční kapacitou 93,6 mil. tun odpadu. Nejvíce zařízení se nachází v Německu a Francii, v ČR jsou 4. [11]

Je potřeba také rozlišit, jestli se jedná o energetické využití odpadu nebo o prostou likvidaci. Rozhodují o tom určitá kritéria, jedno z nich je uvedeno ve směrnici o odpadech 2008/98/ES s označením R1. Pojednává o dosažení minimální hodnoty energetické účinnosti, která je vymezena nejméně na 0,65. Pro výpočet hodnoty je určen tento vztah: [10]

$$\eta_e = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (1.1)$$

kde E_p – vyrobená energie ve formě tepla nebo elektřiny
 E_f – energie obsažená v přídavném palivu
 E_w – energie obsažená ve zpracovávaném odpadu
 E_i – energie přivedená u jiných zdrojů

Termické způsoby energetického využití odpadu lze rozdělit na tři způsoby podle množství přiváděného okysličovadla.

1.4.1 Spalování

Spalování odpadů je řízené exotermické slučování hořlavých složek odpadů s kyslíkem za stechiometrických nebo nadstechiometrických podmínek, tj. za potřebného, nebo vyššího obsahu kyslíku. Pro dosažení dokonalého spalování, jež zahrnuje konverzi všeho uhlíku na CO_2 , vodíku na vodu a síry na oxid siřičitý, je nutno užití nadstechiometrických podmínek. Jedná se tedy o oxidační proces, čímž se liší od zplyňování a pyrolýzy.

Hlavními nevýhodami spalování odpadu jsou emisní plyny, které proces produkuje. Musí se vynaložit velké náklady na prostředky pro čištění těchto spalin pod povolené emisní limity. Vysoké investiční náklady a vysoké náklady na provoz jsou další nevýhodou spalování odpadů vůči ostatním metodám zpracování. [12]

Využití vyprodukovaného tepla je možným problémem, ale spalovny jsou obecně stavěny v blízkosti města. Toto znamená, že jsou nejspíše napojeny na centrální zdroj tepla (CZT), který zajišťuje rozvod vyprodukovaného tepla.

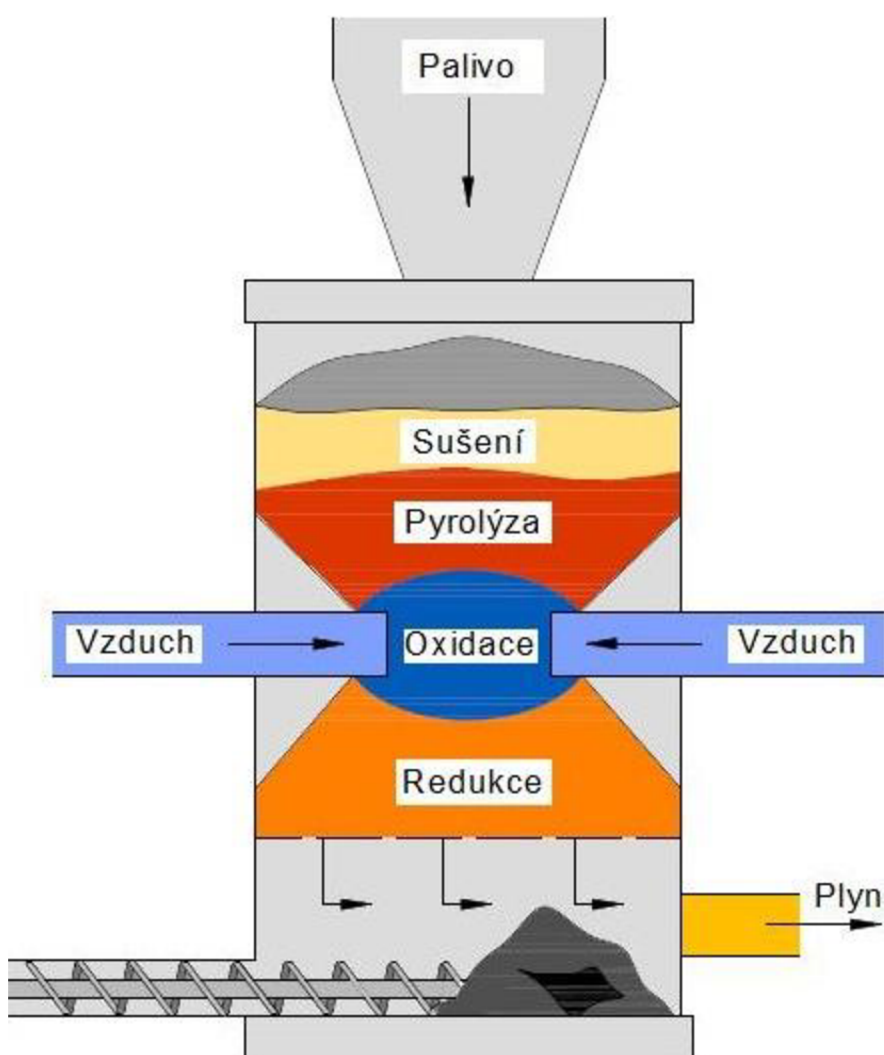
1.4.2 Pyrolýza

Pyrolýza je tepelný rozklad organických odpadních látek bez přístupu okysličovadla. Tento proces je na rozdíl od spalování endotermní, tj. nutno reakci dodávat teplo a vede ke vzniku jednotlivých pevných, kapalných a plyných frakcí. Častým užitím pyrolýzy je výroba dřevěného uhlí, methanolu, terpentýnu a koksu. Mimo jiné je produktem i dehet, který býval zdrojem mnoha chemických látek. Z provedených pokusů na pyrolytický rozklad komunálního odpadu nebyla žádná z navrhovaných technologií vhodná. Důvodem byla zejména ekonomická hlediska. Pyrolýza se tedy používá na zpracování organických materiálů. [12] [13]

2 Zplyňování

Zplyňování je proces hoření za omezeného přístupu kyslíku, kdy probíhají, jak oxidační děje uvolňující energii, tak i redukční děje energii spotřebující. [13] Tudiž se zplyňování z ohledu přítomného kyslíku nachází na pomezí spalování a pyrolýzy, kdy se jedná o podstechiometrické podmínky. Cílem procesu bylo v minulosti vytvoření tuhého zbytku (např. dřevěné uhlí), v současné době je hlavním produktem plyn (svítiplyn, vodní plyn, dřevní plyn atd.). Tento plyn je poté možné užít pro mnoho různých aplikací, kde se spálí, tj. vyprodukuje energii nebo teplo, jež v rámci emisních limitů je možno kdekoliv, bez použití pokročilých systémů čištění spalin. Samotné čištění plynu probíhá po procesu zplyňování. [3]

Fáze zplyňovacího procesu probíhající ve zplyňovacím reaktoru lze u reaktoru s pevným ložem prostorově i časově rozdělit na čtyři základní pásma viz Obr. 2.1. U reaktoru s fluidním ložem tato ilustrace není moc možná, protože se samostatné procesy uskutečňují současně.



Obr. 2.1 Průběh reakcí v reaktoru [14].

2.1 Procesy zplyňování

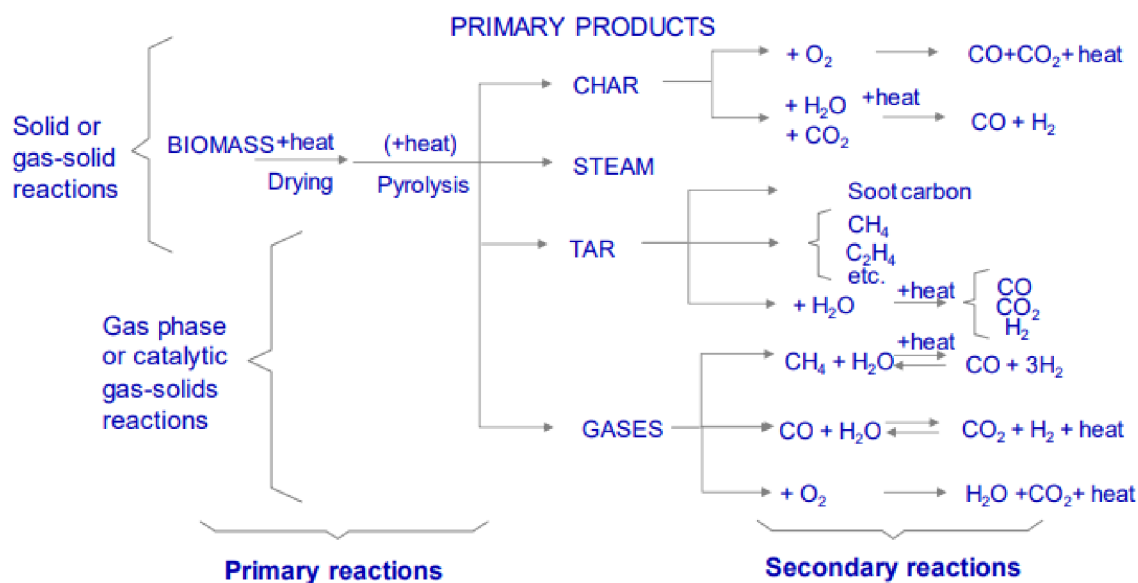
Zplyňování je složitý proces, zahrnující mnoho termochemických reakcí. Konečným produktem bývá nejčastěji energetický plyn. Celý proces je dělen na čtyři základní fáze.

První fází je sušení. Dochází k ohřevu odpadu do teploty 150 °C. Účelem této fáze je odpaření vlhkosti z paliva, čím více vlhkosti se v palivu nachází, tím je větší spotřeba energie na její odpaření. Větší obsah vlhkosti se také projeví v celkové výhřevnosti plynu (bude menší). Vzniklá vodní pára v této fázi znečišťuje plyn. Plyn je znečišťován ve výši od 10 do 50 % jeho objemu. Vodní pára má i pozitivní vliv, kterým je její reakce s karbonizátem v redukční zóně, což má za důsledek produkci H₂ a CO. [28] [29]

Další fází je pyrolýza. Proces probíhá za teplot od 200 do 500 °C. V pyrolýzní fázi dochází k uvolnění prchavé hořlaviny z paliva. Výstupem z tohoto procesu jsou plynné, tuhé a kapalné produkty. Plynné produkty jsou zastoupeny sloučeniny CO, CO₂, CH₄ a prvky H₂ a N₂. Mezi tuhé produkty patří pevný uhlík, který je nazýván polokoks, prchavé látky a popel. Kapalné produkty jsou viskózní kyselé tekutiny hnědé barvy. [27] [28]

Oxidační fáze se může, ale nemusí vyskytovat ve zplyňovacím procesu. Záleží na zdroji tepla při zplyňování. Jestliže dochází k oxidaci, jedná se o autotermní proces. Díky částečné oxidaci hořlavých plynů a polokoksu za přístupu oksyličovadla je zajištěno nutné teplo pro další reakce procesu, které jsou endotermické. Oxidační (spalovací) proces má rozsah teplot od 800 do 1200 °C. Během oxidace také dochází ke krakování dehtů. Dále je proces ovlivněn druhem zplyňovacího média, jestliže je použit vzduch, tak je do procesu přiváděno velké množství dusíku. Jelikož se dusík aktivně nezúčastňuje procesu, je třeba vynaložit mnoho energie, aby se ohřál. Při alotermním procesu je zdroj tepla zajištěn externími zdroji.

V poslední redukční fázi dochází k redukci oxidačních produktů zpět na výchozí reaktanty (CO₂ na CO a H₂O na H₂, je možné že C bude reagovat s H₂ a vznikne CH₄). Tyto složky tvoří konečný hořlavý plyn. [28]



Obr. 2.2 Schéma procesů zplyňování [3].

Obr. 2.2 popisuje jednotlivé procesy, jejich produkty a reakce.

2.2 Zdroje tepla při zplyňování

Při zplyňování je nutné dodávat teplo pro endotermické reakce. Přestože většina reakcí probíhá endotermicky, nachází se zde jeden proces, který je exotermický. Tento proces je oxidace pevného uhlíku/hořlavých plynů. Podle zdroje tepla pro endotermické reakce lze zplyňovače rozdělit na dva základní typy: autotermní a alotermní zplyňovače. [3]

2.2.1 Autotermní zplyňovač

Nazýván jako přímý zplyňovač, kde potřebné teplo je dodáváno přidáním oxidačního činidla k dosažení parciální oxidace paliva v rámci zplyňovacího reaktoru. Při porovnání s alotermním zplyňovačem je konstrukčně jednodušší, ale kvůli procesu uvolnění tepla, ke kterému dochází v oblasti kontaktu oxidačního činidla a hořlavin, musí mít autotermní zplyňovače dobrou vnitřní výměnu tepla, aby došlo k vyrovnání teplot. Užívané oxidační činidlo je většinou vzduch nebo kyslík. [3]

2.2.2 Alotermní zplyňovač

Zde je teplo dodáváno z odděleného zdroje tepla, který se nachází mimo zplyňovací reaktor, tudíž je proces přijímání tepla fyzicky oddělen od produkce daného tepla a je tedy nazýván jako nepřímý zplyňovač. Palivo je dováženo do zplyňovacího reaktoru, kde poté nastane přívod potřebného tepla.

Výhoda oproti autotermnímu zplyňovači je výroba plynu s malým obsahem dusíku bez potřeby použití čistého kyslíku. Produkovány jsou také dva proudy plynu oproti jednomu, kterými jsou konečný plyn s malým obsahem dusíku ze zplyňovacího reaktoru a proud spalin ze spalovacího reaktoru. Toto je považováno za nevýhodu, kvůli nutnosti čištění obou proudů plynu narozdíl od autotermního zplyňovače, kde je pouze jeden. [3]

2.3 Kontaminanty

Kontaminanty jsou znečišťující látky nacházející se ve většině vyprodukovaných plynů ze spalovacích procesů obecně. Čištění těchto plynů je nutné, aby byl snížen dopad na životní prostředí. Konkrétní emisní limity jsou dány směrnicí o průmyslových emisích. [16]

Tab. 2.1 Emisní limity dle směrnice o průmyslových emisích [3].

Kontaminant	Průměrné denní mezí hodnoty emisí (mg/Nm ³)	Typické množství kontaminantu v SKO	Potřebná úroveň čištění (%)
Částice	10	n.a.	n.a.
N (NO _x , HCN + NH ₃)	200 (NO ₂)	0,1-2,2 %	> 90
S (SO ₂ , H ₂ S + COS)	50 (SO ₂)	0,1-1 %	> 90
Cl (HCl)	10	0,03-2,6 %	> 95
HF	1	35-100 mg/kg	> 95
Hg	0,05	0,05-5 mg/kg	> 50
Cd + Tl	Σ 0,05	Σ 0,3-16 mg/kg	> 90
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni a V	Σ 0,5	Σ 300-1000 mg/kg	> 99
TOC	10	n.a.	n.a.
CO	50	n.a.	n.a.

Dioxiny, furany (ng/Nm³)	0,1	n.a.	n.a.
--	-----	------	------

V Tab. 2.1 je uveden výpis kontaminantů obsažených v plynu při procesu zplyňování. V druhém sloupci jsou vyjádřeny průměrné denní mezní hodnoty emisí v přepočtu na 11 % obsahu O₂ v odpadním plynu. Pro těžké kovy jsou průměrné mezní hodnoty emisí změřené během intervalu odběru vzorků v délce 30 minut až 8 hodin (ještě jsou rozdílné dioxiny a furany, kde je interval 6-8 hodin). Pro představu je zde vypsáno typické množství kontaminantu v SKO na základě Tab. 1.2, kde je poté v posledním sloupci uvedena potřebná úroveň čištění, která se nejčastěji pohybuje v řádu > 90 %.

Potřebná úroveň čištění plynu je pouze orientační. Skutečné hodnoty závisí na aplikaci syntézního plynu.

2.4 Úvod do technologií čištění plynu

Při spalování obecně vznikají spaliny a jejich množství se pohybuje kolem 4500-6000 m³ na tunu spáleného odpadu. Spaliny jsou plynné produkty. Složení je závislé na druhu paliva a na spalovacích podmínkách. Při plně oxidačním spalování jsou hlavní částí spalin vodní pára, CO₂ a vzduch a podle složení odpadu se do ovzduší může dostávat chlorovodík (HCl), fluorovodík (HF), oxidy dusíku (NO_x), oxid siřičitý (SO₂) a další. Vznik CO je ovlivňován řízeným přívodem kyslíku. Hlavními škodlivými složkami nejvíce nebezpečné pro životní prostředí jsou dioxiny (PCDD) a furany (PCDF). [18] [19]

U zplyňování odpadu, dle závislosti na aplikaci plynu a jednoduchosti čištění, je dána možnost čištění před spalováním, po spalování nebo její kombinace. S výjimkou čištění plynu po spalování jsou tyto technologie málo vyvinuté. Místo toho je u většiny zplyňovacích zařízení spoléháno na plnou oxidaci plynu po zplyňovači, příkladem je přímé spalování syntézního plynu v kogenerační jednotce. Plyn je tedy po prvním procesu spálen a poté nastává čištění spalin podobné jako u spalování odpadů. [3]

Čištění spalin probíhá obvykle ve třech stupních. Spaliny vycházející ze zplyňovače se musí nejdříve schladit, aby se zamezilo nežádoucím reakcím. Prvním stupněm je zaměření na odstranění tuhých částí, respektive prachových částic a částečně i těžkých kovů. Odstranění kyselých anorganických plynů je realizováno ve druhém stupni za pomoci suché, mokré nebo polosuché metody. Posledním stupněm se zbavujeme organických látek, především dioxinů. [19]

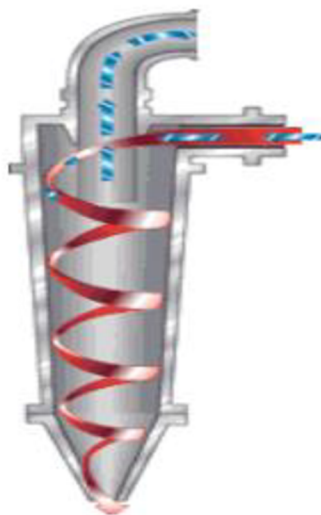
2.4.1 Odstranění částic

Největší množství nebezpečných látek je vázáno právě na prachové částice spalin. Jejich čištění probíhá v odlučovačích, kde nejvíce užívané jsou elektrostatické, respektive elektrické odlučovače. Elektrický odlučovač využívá dvě elektrody, nabíjecí elektroda o malé ploše a elektroda sběrací s velkou plochou. Nabíjecí elektrodou, zapojenou na záporný pól, jsou elektricky nabíjeny prachové částice, které jsou poté přitažlivou silou naneseny na sběrnou elektrodu, napojenou na zdroj stejnosměrného proudu opačné polarity. Výhodou elektrických odlučovačů je vysoká účinnost, ale oproti tomu zaujímají velký prostor a mají vysoké investiční náklady. [21] Dále lze použít mechanické odlučovače.

Nejjednodušším způsobem odlučování tuhých částic jsou sedimentační komory. Princip spočívá v tom, že proud plynu vstupuje do komory o velkém objemu, což má za následek

zmenšení rychlosti proudu. Toto má za důsledek, že těžké částice vlivem gravitace klesají ke dnu komory. Bez modifikací jsou sedimentační komory velmi málo účinné a slouží pouze pro filtraci velkých částic.

Nejvíce užívané mechanické odlučovače jsou takzvané cyklóny, Obr. 2.3. Plyn je uveden do vířivého šroubovitého pohybu a díky odstředivé síle jsou tuhé částice spalin shromažďovány na stěně válcové komory a klesají do sběrné nádoby. Středová trubka umístěna do těla cyklonu slouží pro výstup plynu. [17]



Obr. 2.3 Cyklón [17].

Pro důkladné odstranění je využíváno Venturiho pračky, viz podkapitola 2.4.2.3. [21]

2.4.2 Odstranění halogenovodíků a oxidů síry

Do této kategorie spadají sloučeniny HCl, HF a SO_x. Absorpce v alkalických činidlech slouží pro jejich odstranění. Na základě druhu a postupu jsou dále děleny na suché, polosuché a mokré metody. [22]

2.4.2.1 Suchá metoda

V této metodě je používáno sorbentu² v suchém stavu v podobě jemného prášku. Jeho hlavní složkou je hydroxid vápenatý. Proces probíhá rozptylem sorbentu, který reaguje s kyselými složkami spalin, kde zreagovaný sorbent je následně zachytáván na látkovém filtru. Výhodou je jednoduchá konstrukce, ale metoda má malou účinnost a produkuje velké množství nebezpečného odpadu. [20]

2.4.2.2 Polosuchá metoda

Polosuchá metoda spočívá v opět použití hydroxidu vápenatého, ale tentokrát se ještě smísí s vodou a je následně rozptylován do proudu horkých spalin. Výstupem je suchý produkt, protože voda v procesu je odpařována. Tato metoda je účinnější než metoda suchá, ale je také

² Název pro speciální prostředky k zachycení a odstranění kapalin.

náročnější kvůli přípravě a aplikaci sorbentu, je nutné užití složitější technologie a tím stoupají i finanční náklady. Jako u suché metody je nevýhodou velká produkce nebezpečného odpadu. [19] [20]

2.4.2.3 Mokrý metoda

Pro sorpční roztok u mokré metody jsou užívány chemické roztoky na bázi hydroxidů. Mezi běžné sorpční činidla patří roztok NaOH a $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Spaliny jsou dovedeny do reaktoru, kde jsou následně sprchovány sorpčním roztokem. Odpadní voda je shromažďována na dně reaktoru a je poté zpracována v čističce odpadních vod. Z předchozích metod je mokrá metoda nejúčinnější, ale je nejsložitější a nejvíce finančně nákladná. [19] [20]

Příkladem stroje využívající mokré metody je Venturiho pračka. Do proudu spalin je vstříkována vypírací kapalina s jemným rozptylem. Dosahuje velké účinnosti, díky velké pravděpodobnosti kontaktu aerosolu vody a prachových částic. Shluky těchto sloučenin jsou za pomoci odlučovače, který pracuje na principu cyklónu, odděleny z proudu spalin. [17]

2.4.3 Odstranění NO_x

Zastoupení dusíku v odpadních palivech, jak lze vidět dle Tab. 1.2, je vysoké. Tvorba oxidů dusíku závisí na volbě typu zdroje tepla při zplyňování, kde je konvertováno 25-95 % palivového dusíku na emisní meziprodukty. Mezi emisní meziprodukty patří amoniak (NH_3) a kyanovodík (HCN). Jejich výskyt je problematický, protože následné aplikace plynu budou produkovat oxidy dusíku NO_x . Čili je nutné jich redukovat, abychom dosáhli povolených emisních limit dle Tab. 2.1.

Převážně je tvořen amoniak. Pro jeho redukcí neexistují žádné průmyslové metody suchého čištění, a jelikož se jedná o zplyňování, tak užití katalyzátoru v dnešní době není praktikováno. Nejběžnější způsob redukce je praní. Amoniak je relativně snadný na odstranění ve vodě, jelikož je silnou zásadou.

Posledním krokem je odstranění kyanovodíku, což se uskutečňuje za pomoci katalytické hydrolyzy za teploty 150-200 °C. [3] [23]

2.4.4 Odstranění dehtu

Dehet je komplexní sloučenina uhlovodíků a je velmi nebezpečný kvůli vysoké koncentraci aromatických a polyaromatických látek, kterými jsou benzen, toluen, xylen. Je tvořen při pyrolytickém rozkladu organického paliva. V dnešní době existují nebo jsou předmětem studia čtyři metody odstraňování dehtu: katalytický rozklad, tepelný rozklad, fyzické oddělení dehtu a regulace teploty.

Katalytický rozklad spočívá v přeměně dehtu na plyny s nižší molekulovou hmotností za pomoci katalyzátoru. Nejvíce zajímavý je niklový katalyzátor, ale pro zplyňování odpadů je tento proces nerozvinutý a nedochází k žádné průmyslové integraci. Problém užívání katalyzátorů je ten, že katalyzátor (v tomto případě nikl) má tendenci reagovat s přítomnými kontaminanty (především těžké kovy). Výskyt těchto kontaminantů v tuhém komunálním odpadu je větší než u biomasy.

Další metodou, jednodušší než metoda výše, je tepelný rozklad. Jak jméno napovídá, jedná se o rozklad dehtu za vysokých teplot. Teploty na efektivní rozklad se pohybují v rozmezí 1100-1300 °C. Plazmové zplyňovače AlterNRG a Solena využívají tohoto procesu.

Fyzické oddělení dehtu je nejméně složitá metoda odstraňování dehtu a lze provádět společně s odstraňováním částic. Zahrnuje kondenzaci a praní za pomoci různých typů praček. Nevýhodou je zhoršená možnost rekuperace tepla.

Poslední metodou je regulace teploty. Dehet je udržován na stejné teplotě kolem 400 °C a tím pádem je uchováván v parní fázi, kde při spalování plynu jsou páry pohlceny. V Japonsku je tato operace ve zplyňovačích odpadu hojně používána. [3]

2.4.5 Odstranění PCDD a PCDF

Výskyt dioxinu a furanu je závislý na množství chlóru obsaženého v palivě. PVC plasty jsou jednou ze složek odpadu, jež obsahuje chlór. Během procesu zplyňování dochází k produkci téměř zanedbatelného množství těchto škodlivých látek, kde nadměrná koncentrace je řešena tepelným rozkladem, praním, atd. Většina chlóru se ve vygenerovaném plynu vyskytuje ve formě kyseliny chlorovodíkové (HCl). Problém kladou dioxiny při aplikaci plynu. Jelikož je nejčastější aplikací spalování, může dojít k jejich tvorbě. [3] [29]

3 Produkty zplyňování a jejich využití

Nejvíce zastoupeným produktem zplyňování je plyn/kapalina ve formě paliva, který je možný využít na celou řadu aplikací bez složitého systému čištění. Dalším produktem jsou chemikálie. Rozlišení těchto dvou je spíše motivační a ekonomické, protože se v některých případech mohou zaměnit, například u metanolu, který lze použít jako palivo i chemikálie.

3.1 Syntézní plyn

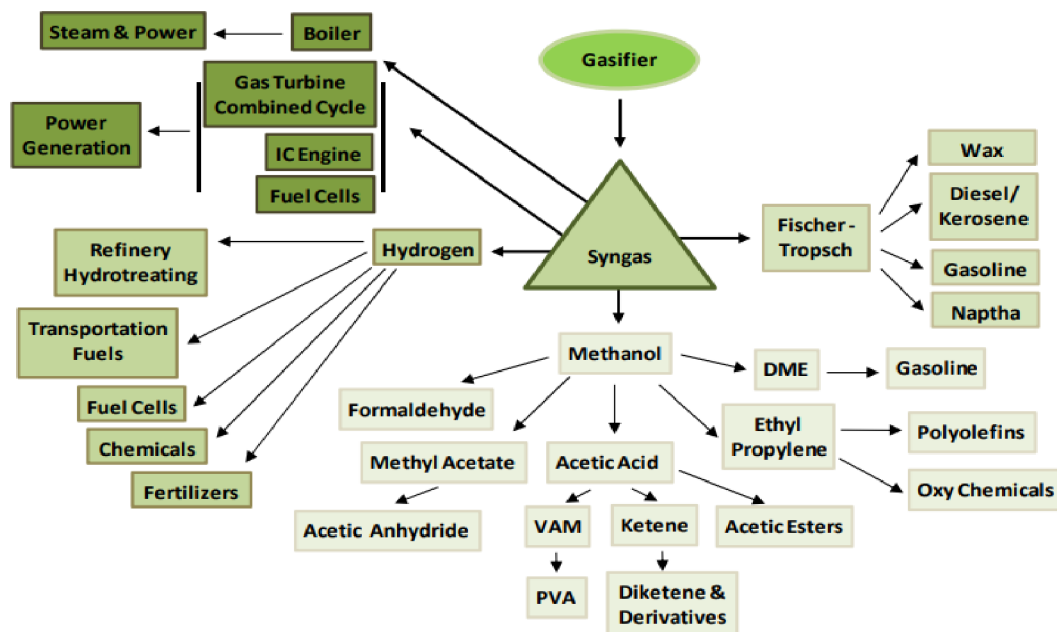
Syntézní plyn (syngas) je generovaný plyn, který lze získat z širokého výběru materiálů obsahující uhlík. V tomto případě z odpadu. Syngas je směs hořlavých (CO , H_2 , CH_4 , atd.) a nehořlavých složek (CO_2 , N_2 , atd.). Množství nehořlavých složek má negativní vliv na jeho celkovou výhřevnost. Konkrétní chemické složení plynu závisí zejména na typu zplyňovaného paliva a také na zplyňovacím médiu. Častou aplikací plynu je jako palivo ve spalovacích motorech. [27] [39] V tabulce 3.1 je uvedeno chemické složení syntézního plynu od společnosti Sierra Energy, kde zplyňovacím médiem je parokyslíková směs.

Tab. 3.1 Chemické složení syntézního plynu (Sierra Energy) [40].

Složky	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	O ₂	Ar
%	48-66	5-15	18-32	0,5-12	< 2	< 2	0,5-3	< 1	0,5-2,5

3.2 Využití syntézního plynu

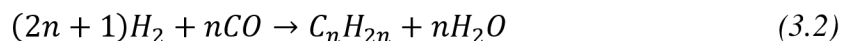
Vyprodukovaný syntézní plyn lze tedy použít na produkci elektrické energie nebo k výrobě paliv a chemikálií. Plyn je před použitím nutné zbavit znečišťujících látek, tyto metody jsou popsány v kapitole 2.4. Čistý syntézní plyn je poté možné spálit k zisku energie ve formě tepla nebo k produkci elektřiny. Dalším využitím je produkce kapalného paliva. Toto je dosaženo chemickou syntézou (konkrétně Fischerova-Tropschova syntéza). Kapalný produkt je dále možné rafinovat na různé typy paliv, např. nafta. Syntézní plyn může být použit k výrobě vodíku a metanolu, ze kterých dále vznikají chemikálie (ethanol, formaldehyd, atd.). [41]



Obr. 3.1 Schéma využití syntézního plynu [41].

3.2.1 Fischerova-Tropschova syntéza

Fischerova-Tropschova syntéza je katalyzovaná chemická reakce, při které jsou oxid uhelnatý a vodík přeměňovány na různé kapalné uhlovodíky. Proces probíhá za teploty 200-350 °C a za zvýšeného tlaku. Hlavním účelem je výroba umělé náhrady ropy. Původní syntézu lze definovat těmito chemickými rovnicemi: [42]



3.2.2 Spalovací motor

Dříve zmíněná produkce elektrické energie ze syntézního plynu probíhá nejčastěji v kogenerační jednotce s pístovým spalovacím motorem. Kogenerační jednotka znamená, že dochází k produkci dvou typů energií současně (elektrická a tepelná energie). Je kladen důraz na vysokou čistotu plynu, především na prachové částice a dehet. Při ochlazení dochází ke kondenzaci dehtu na stěnách motoru, kde nánosy mohou karbonizovat, což může vést ke zničení části motoru. Nároky na čistotu syntézního plynu jsou udávány výrobcí spalovacích motorů a značně se liší. [27] [43]



Obr. 3.2 Kogenerační jednotka s pístovým spalovacím motorem [27].

3.2.3 Plynová turbína

Nároky na čistotu syntézního plynu jsou pro plynové turbíny opět vysoké. [3] Je důležitá důkladná redukce prachových částic, aby se omezilo poškozování lopatek. Na rozdíl od spalovacích motorů je dehet v plynové turbíně méně problematický. Důvodem je totiž vysoká teplota ve spalovací komoře, za které je předpokládáno, že dehet shoří. Přesto je nutné kontrolovat množství obsaženého dehtu. Další možnou komplikací provozu je tvorba nánosů a vysokoteplotní koroze. [44] Plynové turbíny převážně slouží k produkci elektrické energie. Pokud není na hřídel turbíny připojen generátor, lze spaliny použít k vytvoření tahu pro tryskový motor. Na obr. 3.3 lze vidět plynovou turbínu, která se vyskytuje v elektrárně.



Obr. 3.3 Plynová turbína [45].

3.2.4 Výroba vodíku

Syntézní plyn vzniklý z procesu zplyňování lze dále aplikovat na výrobu vodíku. Toto se odehrává prostřednictvím konverze syntézního plynu. Směs CO a H₂ v plynu je uvedena do reakce s vodní párou za přítomnosti katalyzátorů (Fe-Cr/Al₂O₃). Reakce probíhá za teploty kolem 350 °C a lze popsat následující chemickou rovnicí:



Vzniklý oxid uhličitý se odstraňuje vypíráním ve studené vodě, v alkalických roztocích. Zbytky CO a CO₂ jsou poté za přítomnosti niklových katalyzátorů odstraňovány hydrogenací za teploty 800-900 °C. Z této reakce vzniká methan. [46] [47]

Využití vodíku je v současné době zejména v dopravě, energetice, spotřební elektronice apod. Probíhá také intenzivní výzkum na použití vodíku jako zdroje energie. Jeho energetický zisk při spalování je totiž velmi značný (96-120 MJ/kg). [48] Další příklady využití vodíku jsou obsaženy na obr. 3.1.

4 Technologie používané na zplyňování odpadu

Během vývoje zplyňovacích technologií byla navržena velká škála reaktorů v různých provedeních. Tento vývoj stále probíhá a neustále se provádějí testy na stávajících zařízeních pro jejich zlepšení a také výzkum nových zařízení. Dnešní technologie na zplyňování lze rozdělit podle těchto hlavních hledisek:

Rozdělení podle konstrukce reaktoru:

- s pevným ložem – souprroudové, protiproudé, s křížovým tokem
- s fluidním ložem
- s unášivým proudem

Rozdělení podle zplyňovacího média:

- parní
- parokyslíková směs
- kyslíkové
- vzduchové
- Mezi další patří: CO₂, H₂O a různé směsi těchto médií

Rozdělení podle zdroje tepla při zplyňování (popsáno v podkapitole 2.2):

- autotermní
- alotermní

Rozdělení podle tlaku v reaktoru:

- podtlakové
- přetlakové [14]

4.1 Účinnost zplyňování

Důležitým faktorem definující provoz zplyňovače a jeho ekonomickou stránku je účinnost zplyňování. Pro aplikaci plynu v motorech je vztah účinnosti zplyňování následující: [38]

$$\eta_m = \frac{H_g * Q_g}{H_S * M_S} \quad (4.1)$$

kde η_m – účinnost zplyňování (%)
 H_g – výhřevnost vyprodukovaného plynu (kJ/m³)
 Q_g – objemový tok vyprodukovaného plynu (m³/s)
 H_S – výhřevnost původního paliva (kJ/kg)
 M_S – hmotnostní tok původního paliva (kg/s)

4.2 Zplyňovací reaktory s pevným ložem

Reaktory s pevným ložem pro zplyňování odpadu jsou konstruovány jako jednotky fungující při mírném podtlaku nebo přetlaku. Mezi charakteristické schopnosti těchto reaktorů patří zřetelné oddělení fází procesu zplyňování. Toto oddělení má za důsledek nerovnoměrné rozložení teplot uvnitř reaktoru. Důvod uplatnění a velkou výhodou je jednoduchá konstrukce, spolehlivost a jednoduchá obsluha během provozu.

Dle závislosti proudění paliva a zplyňovacího média dělíme reaktory s pevným ložem na souproudové (Downdraft), protiproudové (Updraft) a při speciálních případech na reaktory s křížovým tokem (Cross-current). [29]

4.2.1 Souproudové reaktory

U souproudových reaktorů je palivo nejčastěji zaváděno do horní části reaktoru (viz Obr. 2.1). Zplyňovací médium má přívod shora nebo z boku. Palivo se zplyňovacím médiem je nuceno projít zúžením (hrdlem), kde proběhne většina zplyňovacích reakcí. Ohledně vhodného paliva na souproudový reaktor, musí být splněna podmínka nízkého obsahu vlhkosti paliva (do 20 %). Společně s protiproudovými reaktory sdílí podobnou granulometrii (zrnitost) paliva s velikostí částic 20-200 mm. Energetická účinnost souproudového reaktoru je nízká. Důvodem je vysoká teplota opouštějících plynů (900-1000 °C), což znamená, že je odveden velký obsah tepla. Tento typ zařízení není vhodný pro použití při větších výkonech a rozsah se pohybuje od několik kW_t do 1 MW_t.

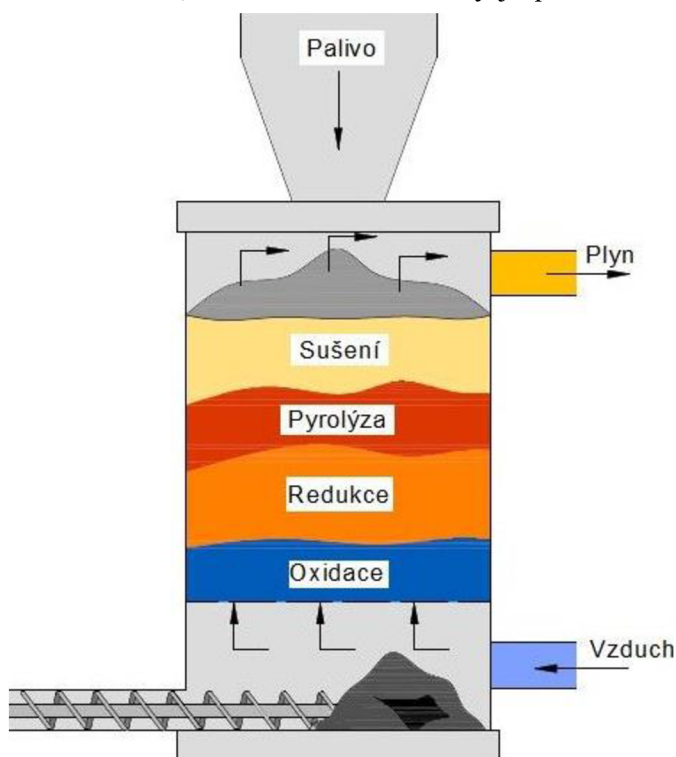
Významnou výhodou oproti protiproudovému reaktoru je nižší výskyt dehtu v plynu (až 15krát nižší). Vyprodukovaný plyn dosahuje hodnoty výhřevnosti až 5,5 MJ/m³_N a obsahuje vysoký podíl prachových částic.

Nejvíce používaná konstrukce souproudového reaktoru je od francouzského inženýra Imbertena. Tato konstrukce využívá hrdla ve tvaru „V“. [14] [28] [29]

4.2.2 Protiproudové reaktory

Zplyňovací médium u protiproudových reaktorů (Obr. 4.1) je přiváděno ze spodu a proudí vzhůru. Naopak palivo je opět dávkováno v horní části, kde vlivem tíhové síly je posouváno směrem dolů. Taková konfigurace má pozitivní vliv na účinnost, která dosahuje až 80 %. Výsledný plyn je odváděn v horní části reaktoru a dosahuje vyšší výhřevnosti než u souproudových reaktorů (do 7 MJ/m³_N). Hlavní použití těchto zařízení je při zplyňování odpadu s vysokým obsahem vlhkosti (až 50 %).

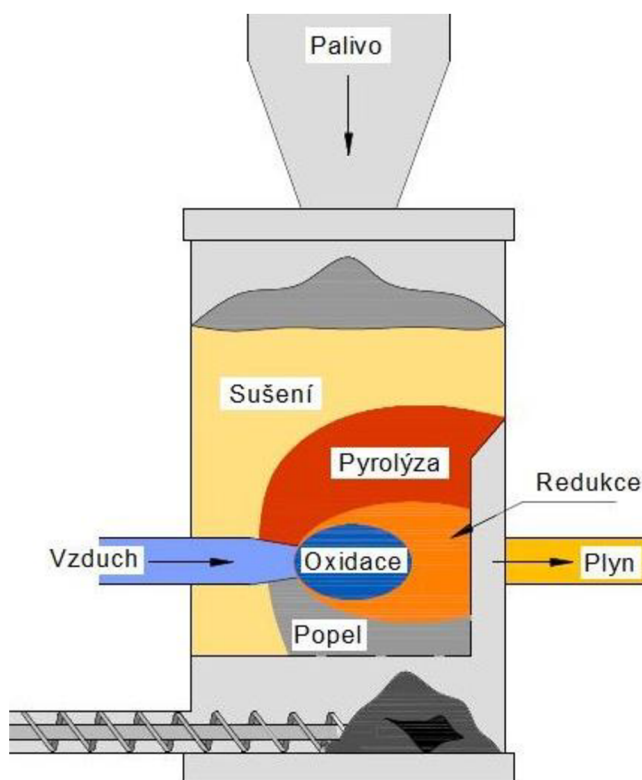
Velmi značnou vlastností protiproudových reaktorů je vysoký podíl dehtu v plynu. Vzhledem k tomuto faktu je tato konstrukce vhodná pro použití ve spojení s přímým spalováním plynu v hořácích. Mezi výhody patří nízká energetická náročnost, nízký obsah prachových částic a dříve zmíněná schopnost pracovat s palivem o vysokém obsahu vlhkosti. Tento typ reaktoru má rozsah výkonu od několika set kW_t do 10 MW_t. [28] [29] [35]



Obr. 4.1 Schéma protiproudového reaktoru [14].

4.2.3 Reaktor s křížovým tokem

Reaktor s křížovým tokem (viz Obr. 4.2) byl navržen pro zplyňování dřevěného uhlí. Palivo je přiváděno z horní části reaktoru a zplyňovací médium je vedeno skrz stěnu v boční části reaktoru. Výsledný plyn je následně odveden skrze stěnu proti přívodu zplyňovacího média. Jelikož je proces zplyňování doprovázen vysokými teplotami dosahující až 1500 °C, může docházet k problémům s odolností konstrukčního materiálu reaktoru. Mezi výhody patří jednoduchost čištění vyprodukovaného plynu. Nevýhodou reaktoru s křížovým tokem je ve vyšších nákladech na kvalitu dřevěného uhlí. Také je tento typ omezený, kvůli malému rozsahu pracovního výkonu. [36]



Obr. 4.2 Schéma reaktoru s křížovým tokem [14].

4.3 Zplyňovací reaktory s fluidním ložem

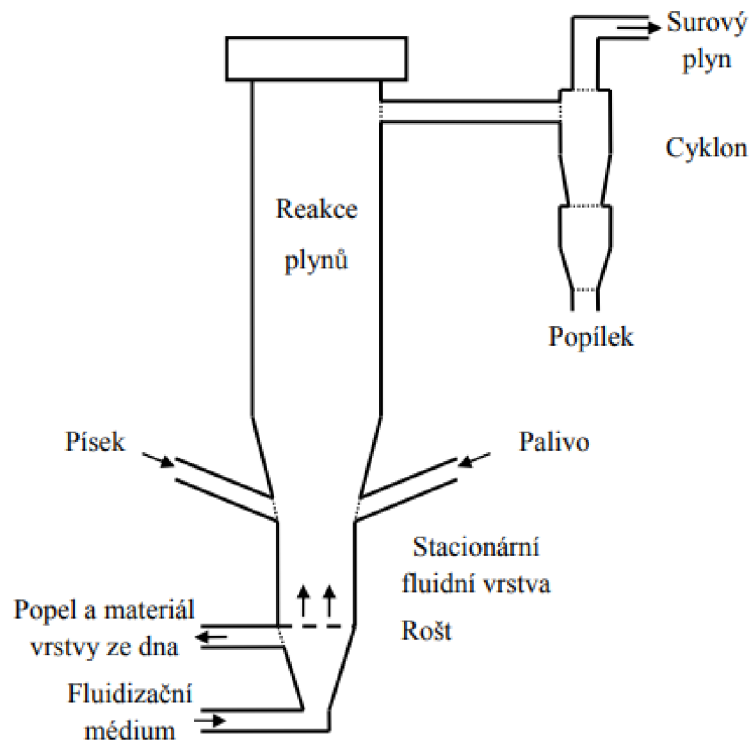
Při zplyňování ve fluidním loži je pevné palivo smícháno s horkým materiálem fluidního lože, kterým je většinou písek nebo dolomit a palivo se zplyňuje ve vznosu za pomoci proudu zplyňovacího média.

Nejdříve byl tento reaktor určen ke zplyňování uhlí a byl vynalezen firmou Winkler v roce 1926. S časem se zařízení začalo uplatňovat i ve zplyňování biomasy/odpadu. Kvůli intenzivnímu mísení zplyňovacího média s palivem ve fluidním loži nelze rozdělit samostatné fáze procesu zplyňování, jako u předešlých reaktorů s pevným ložem. Teplota je v celém rozsahu stejná (pohybuje se od 750 do 1000 °C) a všechny procesy zplyňování probíhají současně. Přeměna paliva ve zplyňovacích reaktorech s fluidním ložem je z uvedených důvodů téměř 100 %. Dále jsou méně citlivější na vstupní materiál a jsou vhodnější pro větší aplikace. Uvádí se minimální výkon okolo 10 MW_t a horní hranice výkonu není stanovena.

Zplyňovací reaktory s fluidním ložem se dělí dle fluidního chování na dva základní typy: reaktor se stacionární fluidní vrstvou a reaktor s cirkulující fluidní vrstvou. [28] [35] [36]

4.3.1 Reaktory se stacionární fluidní vrstvou

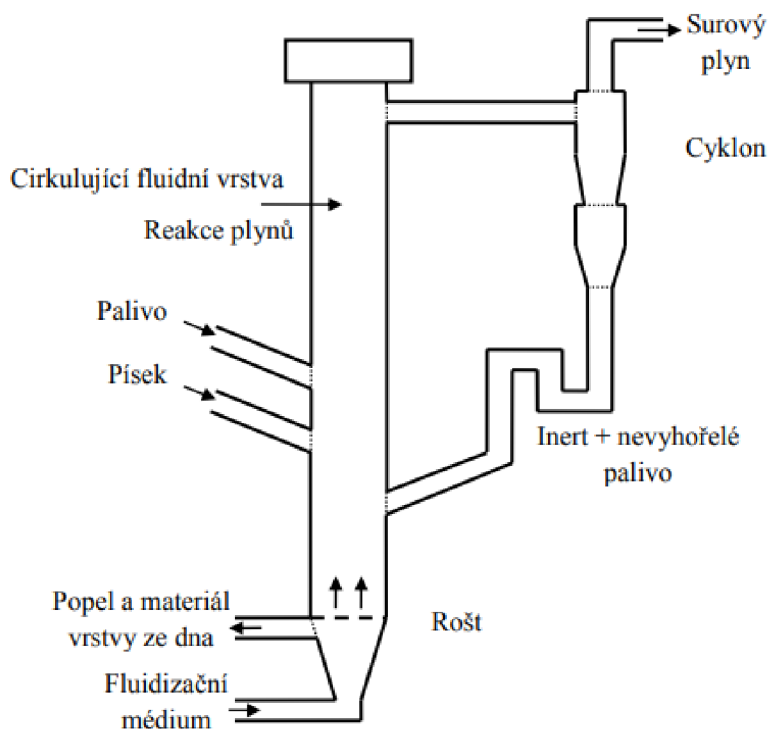
Tyto reaktory pracují v rozsahu výkonu od 500 kW do 50 MW. Velice důležitým krokem je důkladná příprava granulometrie paliva, aby bylo dosaženo ustáleného rychlostního profilu. Jako inertní materiál fluidního lože je používán písek a oxid hlinitý. Zplyňovací médium je v tomto zařízení vzduch, vodní pára nebo směs kyslíku a páry. Vyprodukovaný plyn obsahuje okolo 1-2 % dehtu. [14] [29]



Obr. 4.3 Schéma reaktoru se stacionární fluidní vrstvou [27].

4.3.2 Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou

Tyto typy reaktoru jsou efektivním zdrojem energie, protože mohou dosahovat výkonu stovek MW_t. Z důvodu jejich velikosti je nutností, aby byly stavěny v oblastech, kde nedochází k omezení přístupu paliva. Inertním materiálem fluidního lože je písek nebo dolomit a mohou se přidávat také katalyzátory. Cyklon se stává součástí samotného reaktoru, kde zavádí unášený inertní materiál a části paliva zpět do reaktoru, což zvyšuje míru konverze. Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou se v dnešní době staví jako autotermní nebo alotermní. Generátorový plyn pocházející z alotermního typu má dvakrát vyšší výhřevnost poskytující možnost využití plynových turbín ke generaci elektrické energie. [29]



Obr. 4.4 Schéma reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou [27].

4.4 Zplyňovací reaktory s unášivým proudem

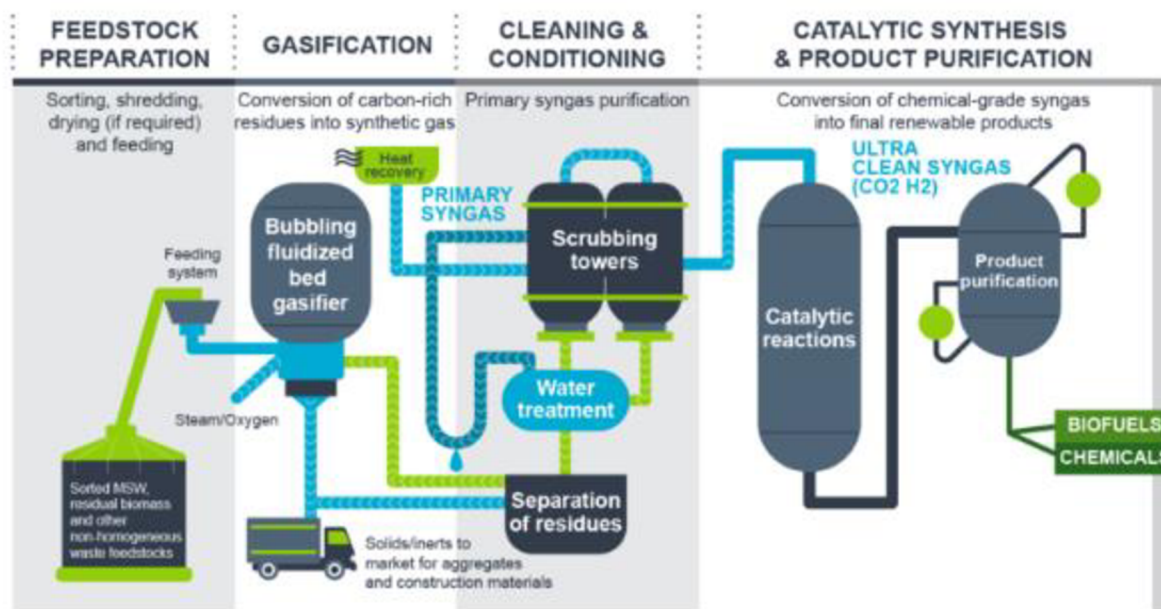
Tyhle reaktory jsou též nazývané jako cyklonové a vyznačují se vysokými hodnotami výkonu (100-1000 MW). Zde je nutná granulometrie paliva menší jak 1 mm. Jako palivo v reaktorech s unášivým proudem se nejčastěji využívá prachové uhlí nebo kapičky oleje. Dávkování paliva probíhá v horní části reaktoru společně se zplyňovacím médiem, kterým je obvykle směs kyslíku a páry. Doba zdržení paliva v reaktoru je velmi malá, většinou necelá sekunda. Teplota v reaktoru je vysoká a pohybuje se od 1300 °C do 1600 °C. Důsledkem této teploty je zajištěna vysoká čistota vyprodukovaného syntézního plynu, protože dochází k rozkladu dehtu. Další vlastností vysokých teplot je možnost odvodu popela z reaktoru v tekuté formě. Provoz těchto zařízení se realizuje pod zvýšeným tlakem pohybující se kolem 2 až 6 MPa. [37]

4.5 Konkrétní příklady zplyňovacích zařízení

Níže je uvedeno pár konkrétních příkladů zplyňovacích zařízení ve světě.

4.5.1 Enerkem

Zařízení od kanadské společnosti Enerkem pracuje ve čtyřech fázích: příprava odpadního paliva, zplyňování, čištění plynu a katalytická syntéza plynu. [24] Jelikož je tato technologie patentována, hledání informací ohledně přesného postupu zařízení jsou nedostupné. Oficiální stránky Enerkem jsou zdrojem základních a orientačních informací.



Obr. 4.5 Zobrazení zařízení Enerkem [24].

Než dojde k zásobení paliva do reaktoru, je nutné příchozí komunální odpad zpracovat. Inertní a recyklovatelné materiály budou odebrány a jakmile palivo dosáhne požadovaných parametrů je drceno a odesláno přes krmící systém do reaktoru.

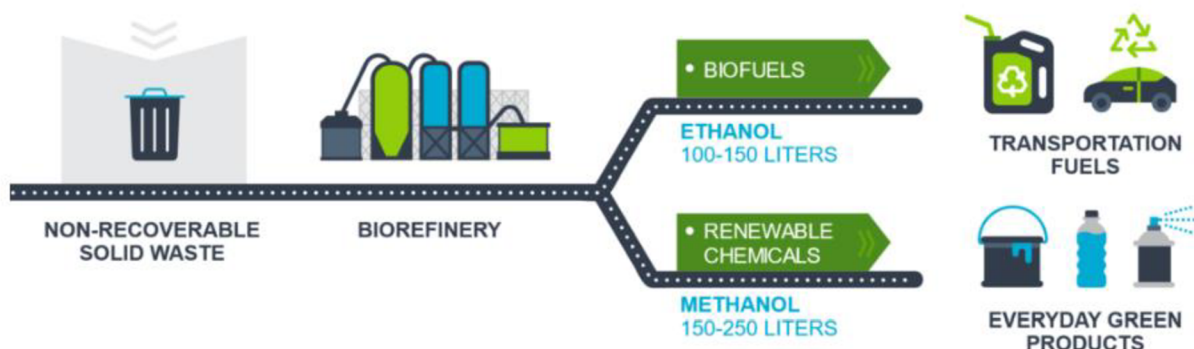
Rozdrcené palivo dovezené do reaktoru se stacionární fluidní vrstvou je rozloženo do základních reaktantů za pomoci procesu tepelného krakování. Zplyňovacím médiem je v tomto reaktoru pára a kyslík. Za daných podmínek reaktoru a reakcí základních reaktantů s párou/kyslíkem vzniká syntézní plyn. Syntézní plyn v této formě je velmi bohatý na oxid uhelnatý CO a vodík H₂, jež patří mezi důležité prvky v chemických reakcích. Dalším krokem je čištění.

Proces čištění nejdříve probíhá v cyklónu, kde jsou z plynu odlučovány tuhé částice, a pak přichází na řadu dvoustupňové praní. Ze surového syntézního plynu se stává syntézní plyn o vyšší chemické třídě a díky tomu je možné plyn přeměnit na kapalné palivo a chemikálie pro další aplikace.

Posledním krokem, jak už bylo zmíněno, je přeměna čistého syntézního plynu na metanol a kapalné palivo etanol, což se děje katalytickou syntézou plynu. [24]

4.5.1.1 Využití

Hlavním produktem ze zařízení Enerkem je etanol, který se využívá v biopalivu na provoz aut nebo jiných strojů. Chemikálie ve formě metanolu se uplatňují v každodenních produktech nebo jako rozpouštědlo, přísada do nemrznoucích směsí, surovina pro výrobu jiných organických látek, apod.



Obr. 4.6 Ilustrace využití produktů z Enerkem [25].

4.5.2 Advanced Plasma Power Ltd. (APP)

Dalším příkladem zařízení na zplyňování je od společnosti APP. Celý proces zařízení lze opět rozdělit do čtyř kroků: příprava paliva, zplyňování, rozklad dehtu a čištění.

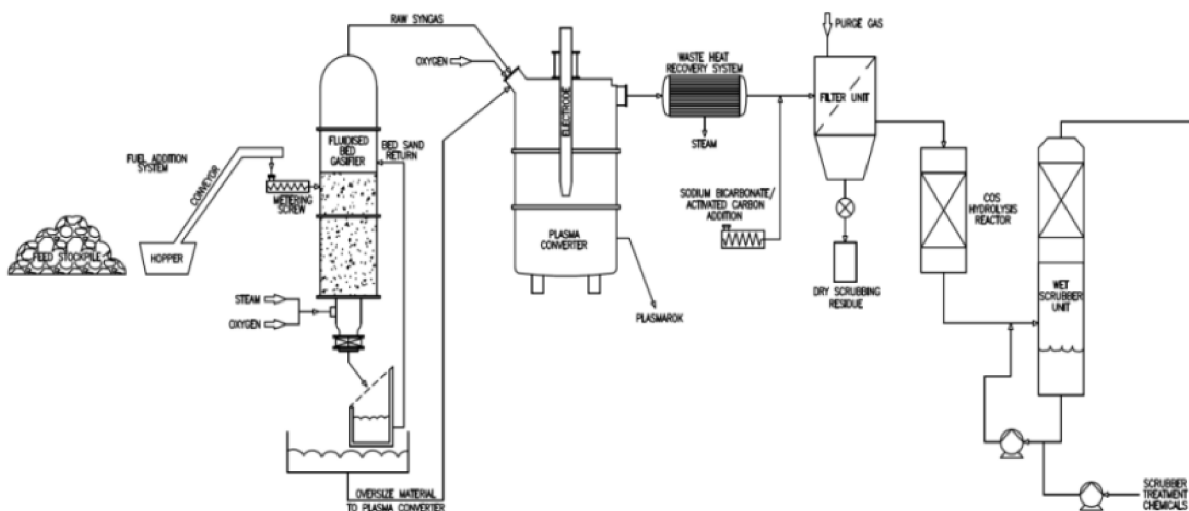
Jako vstupní palivo je možné použít biomasu a odpad. Zapotřebí je zpracování, které probíhá odstraněním kovů a jiných železných částí a následuje drcení. V tomto stavu je pravděpodobné, že je zdrcené palivo vlhké či mokré a pro vyschnutí slouží sušící pás. Sušící pás je zásoben energií prostřednictvím páry, která je produkována při procesu zplyňování. Vysušené palivo putuje do reaktoru.

V druhém kroku se jedná o zplyňování v reaktoru s fluidním ložem. Reaktor je poháněn párou a kyslíkem a operuje kolem teploty 700-800 °C, je patrné dle kapitoly 2.4.4, že tato hodnota teploty není dostatečná na rozklad dehtu. Tudiž vyprodukovaný plyn, jímž je opět surový syntézní plyn, obsahuje významné množství dehtu. Syngas (syntézní plyn) je tedy přemístěn do plazmového konvertoru.

Zde je syngas vystaven ultrafialovému záření, které má za důsledek rozklad dehtu. Neprobíhá tu pouze rozklad dehtu, ale je zde zpracován i mechanismus na zachycení částic obsažených ve vstupujícím plynu v podobě strusky. Struska je shromažďována na spodu plazmového konvertoru, odkud je po čase odlévána mimo konvertor a schlazena pro další aplikace jako tuhý materiál.

Plyn dále putuje do chladicího systému, kde je produkována pára pro zásobu energie sušícího pásu.

Nastává poslední krok složený ze suché metody čištění s užitím filtrů se vstřikem a mokré metody, ve které je plyn schlazen na malou teplotu a prán ve vodě o malém pH pro odstranění amoniaku. Následuje druhá pračka s cílem odstranění kyselých plynných emisí, což je uskutečněno absorpcí v alkalických činidlech, dle kapitoly 2.4.2. Čistý syntézní plyn je nyní možné použít pro generaci energie. [3]

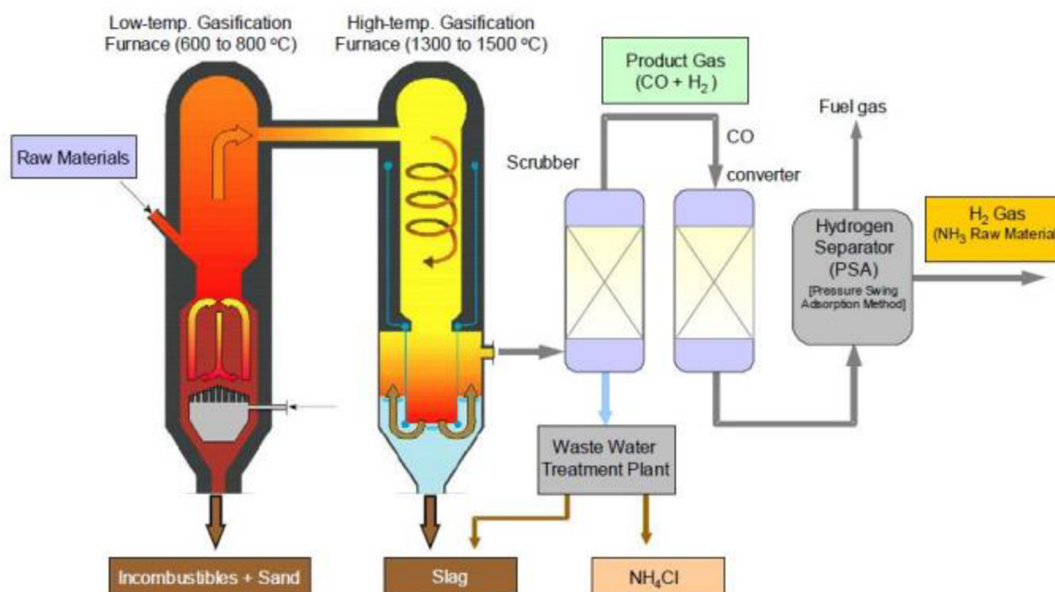


Obr. 4.7 Schéma zařízení APP [3].

4.5.3 Ebara Ube Process (EUP)

EUP je proces na výrobu chemikálií, vyvinut spoluprací korporace Ebara a společností Ube. Zařízení využívá dvoustupňového tlakového zplyňovacího systému, který přeměňuje odpadní plasty na plyn. Výsledný plyn je z velké části zastoupen vodíkem a oxidem uhelnatým. Dvoustupňový zplyňovač je složen z nízkoteplotního zplyňovače a vysokoteplotního zplyňovače. Oba dva pracují pod tlakem. Zplyňovacím médiem je kyslík a pára. Přeměněný plyn lze poté využít na syntézu amoniaku nebo na produkci dalších surových materiálů používaných v chemickém průmyslu. Dále lze plyn použít i jako zdroj energie.

Během procesu se recyklují anorganické látky (ve formě granulované strusky, využití v cementu) a kovy. Dioxiny vzniklé při zplyňování odpadních plastů jsou tepelně rozkládány ve vysokoteplotním zplyňovači při teplotách více jak 1300 °C, kde jsou ihned na to schlazeny na teplotu 200 °C. [30]



Obr. 4.8 Ebara Ube Process [3].

4.5.4 Další příklady

- Aries Clean Energy – Zařízení se nachází ve městě Lebanon, Tennessee. Do provozu bylo uvedeno v roce 2016. Denní kapacita je 64 tun paliva. Vyprodukovaný syntézní plyn je spalován, kde energie je spotřebována na ohřev vody. Teplá voda poté pohání tři ORC (Organic Rankine cycle) generátory s průměrným výkonem 420 kW. Během 2 259 provozních hodin bylo generováno více jak 460 000 kWh elektřiny. [31] [32]
- Sierra Energy – Společnost provozuje své zařízení ve státě Kalifornie. Vyvinula systém zplyňování nazýván FastOx®. Systém využívá teplo, páru a kyslík na rozklad odpadu na molekulární úroveň. Odpad projde kompletní přeměnou na konečné produkty bez hoření. Nejsou produkovány žádné toxické vedlejší produkty a taky žádné emise. Mezi další výhody patří malé provozní náklady, vysoká provozní teplota (4 000 °F, zhruba 2200 °C) a možnost aplikace produktů (elektřina, vodík, nafta, amoniak). Zařízení nazývané Pathfinder dokáže zpracovat 50 tun paliva za den a tabulka 4.1 představuje totální produkci za 24 provozních hodin. [33] [34]

Tab. 4.1 Totální produkce zařízení Pathfinder [34].

	Elektřina (MWhe)	Nafta (gal)	Vodík (kg)	Amoniak (kg)
Recyklovaný SKO	47,8	1697	3073	17400
Lékařský odpad	47,3	1653	3005	17050
Pneumatiky	64,3	2318	4308	24450
Biomasa	61,0	2072	3725	21100
Zbytky ze skartování	36,2	1302	2443	13850

5 Zplyňování odpadů v České republice

V České republice spalování silně převažuje. Důvodem je, že česká legislativa pouze rozlišuje mezi likvidací odpadu a energetickým využitím, kde už neklade ohled na aplikovaný termický proces. Tedy se na spalování a zplyňování vztahují stejné podmínky a emisní limity. Spalování je také více zažité a je obecně levnější a z hlediska řízení procesu stabilnější, tedy jednodušší než zplyňování. Výhoda zplyňovače je ale tehdy, kdy chceme používat palivo ke kogeneraci, protože je celá soustava se zplyňovačem podstatně jednodušší. Důvodem je, že při zplyňování je generovaný plyn ihned použit na pohon motoru/turbíny a generátoru. Oproti tomu u spalování je nejdříve vyprodukovaná pára a ta až následně pohání turbogenerátor. Celý tento parní okruh je tudíž u procesu zplyňování vyloučen. V současné době se v České republice vyskytují čtyři ZEVO (zařízení na energetické využití odpadu), kterými jsou všechny spalovny a proces zplyňování odpadů se převážně aplikuje ve výzkumné sféře.

I přes tyto fakta jsou zde projekty, které budou využívat odpadu k energetickému využití prostřednictvím procesu zplyňování. Vlivná je pro tyto projekty legislativa, která stanovuje zákaz skládkování veškerého využitelného komunálního odpadu v České republice do roku 2024. Projekty na zplyňování odpadu jsou plánovány společnostmi PGP Terminal, a.s. a Millenium Technologies.

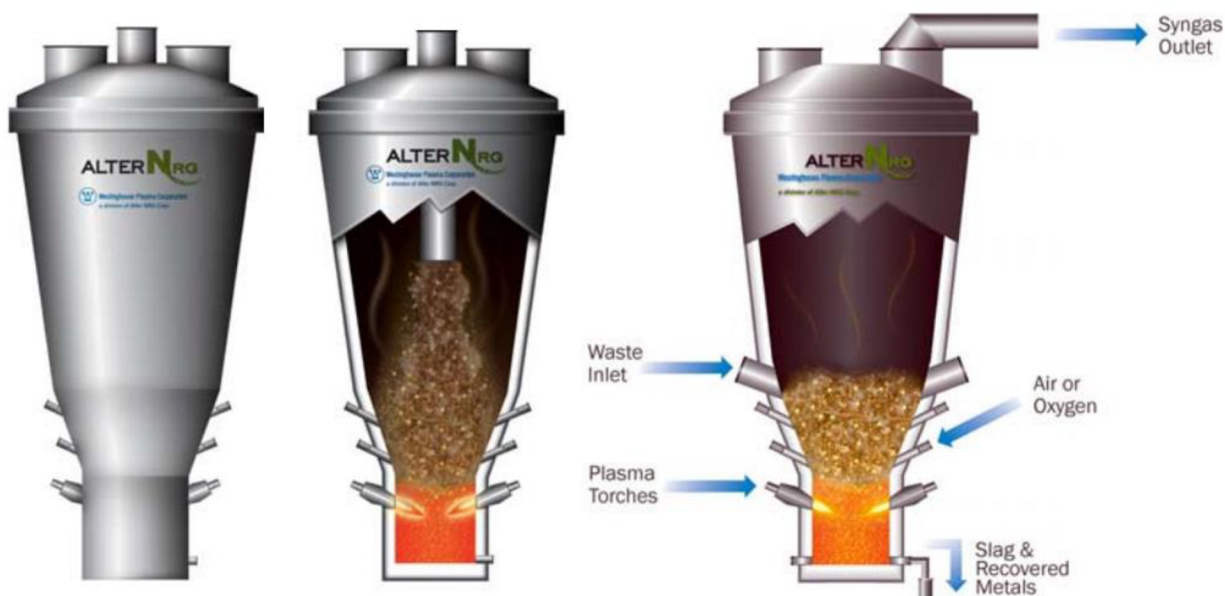
5.1 PGP Terminal, a.s.

Společnost PGP Terminal, a.s., která působí v Ostravě, je od roku 2012 výhradním zástupcem společnosti Westinghouse Plasma Corporation³. Drží licenční práva pro aplikaci technologie plazmového zplyňování na území České republiky a Slovenska. Cílem společnosti je vybudování zařízení na energetické využití odpadu prostřednictvím plazmového zplyňovače. [49]

Dokončení projektové přípravy plazmového reaktoru je plánováno na rok 2024/25, kde budou projekty nabídnuty konkrétním městům a obcím a dle názoru Ing. Petra Břenka ze společnosti PGP Terminal a.s. bude zařízení naprosto konkurenceschopné. Očekávaná kapacita zařízení by měla být kolem 50 až 100 tisíc tunu odpadu ročně. Je zde možnost tuto hranici lehce zvýšit, ale při hodnotách nad 100 tisíc tun nastává problém v dopravním systému svozu odpadu, nikoliv v systému technologickém.

Samotný proces plazmového zplyňování od společnosti PGP Terminal, a.s. bude fungovat podobně jako zařízení od společnosti APP uvedeno v podkapitole 4.5.2. Palivo je dodáváno do vrchní části reaktoru. Ve spodní části reaktoru se nachází plazmové hořáky, které vyvíjejí elektrický oblouk podobný blesku a teplota se pohybuje kolem 3000-5000 °C. Nedochozí zde ke spalování, ale k termickému rozkladu odpadu na molekulární úroveň. Produktem je syntézní plyn odveden horní částí reaktoru a dále vzniká inertní materiál pro stavebnictví (vitřifikát) odpichován ve spodní části. [50] [51] Schéma reaktoru lze vidět na obr. 5.1.

³ Společnost, která je světovým lídrem v oblasti technologie plazmového zplyňování různých typů odpadů.



Obr. 5.1 Schéma plazmového reaktoru Westinghouse Plasma Corporation [51].

5.1.1 Srovnání se spalováním

Jednou z klíčových vlastností, co rozlišuje plazmové zplyňování s klasickým procesem spalování je jejich teplota. Klasické spalovny na komunální odpad jsou provozovány za teploty 800-900 °C, kdežto teploty typické pro plazmové zplyňování se pohybují kolem 3000-5000 °C. Tyto vysoké teploty a následné rychlé ochlazení vyprodukovaného syntézního plynu mají za příčinu minimálního vzniku dioxinů. Mezi další výhody tohoto procesu patří:

- Různorodé palivo
 - Reaktor je schopen zpracovat heterogenní palivo s minimální přípravou
 - Lze také zpracovat palivo s velkým obsahem inertní složky a vlhkosti
- Dochází k téměř 100% konverze uhlíku
- Výrazné snížení emisí
- Produktem je syntézní plyn možný využít pro řadu aplikací
- Dalším produktem je struska (vitřifikát) s využitím ve stavebnictví
- Podpora zásady 3R – omezit (reduce), využít (reuse), recyklovat (recycle)

Jak bylo zmíněno ve výhodách uvedených výše, plazmové zplyňování má výrazně sníženou hodnotu vyprodukovaných emisí. Porovnání emisí se spalovnou lze vidět v následující tabulce 5.1. [51]

Tab. 5.1 Emise do ovzduší [51].

Emise	Limity pro novou spalovnu dle Vyhlášky č. 415/2012 Sb. -půlhodinový průměr	Emise dosažitelné aplikací nejlepší dostupné techniky (BAT) -půlhodinový průměr	Plazmový reaktor + kombinovaný cyklus
Částice	30 mg/m ³	1-20 mg/m ³	4 mg/m ³
Dioxiny a furany (PCDD/F)	0,1 ng TEQ/m ³	0,01-0,1 ng TEQ/m ³	méně jak 0,001 ng TEQ/m ³
Oxid siřičitý (SO ₂)	200 mg/m ³	1-150 mg/m ³	3 mg/m ³
Oxidy dusíku (NO _x)	400 mg/m ³	30-350 mg/m ³	72 mg/m ³

Chlorovodík (HCl)	60 mg/m ³	1-50 mg/m ³	9 mg/m ³
Oxid uhelnatý (CO)	100 mg/m ³	5-100 mg/m ³	23 mg/m ³
Rtuť (Hg)	0,05 mg/m ³	0,001-0,003 mg/m ³	0,001 mg/m ³

5.2 Millenium Technologies

Příkladem už vybudované jednotky na zplyňování biomasy/odpadů je od společnosti Millenium Technologies, uvedena do provozu v roce 2018. Jedná se o demonstrační jednotku plazmového zplyňování, tudíž je stále ve fázi projektu. Zařízení se nachází v oblasti Dubé na Českolipsku a současný výkon se pohybuje kolem 85 kW. V první fázi se výzkumný projekt zaměří na výzkum využití syntézního plynu pro výrobu elektrické energie v kogeneračních jednotkách.

Hlavním cílem společnosti Millenium Technologies je vybudování komerčně použitelných jednotek plazmového zplyňování, které se rozměrově budou lišit dle potřeb konkrétních zákazníků. Rozsah velikosti těchto jednotek by měl být v rozmezí od několika desítek kil za hodinu u nebezpečných odpadů a u komunálních odpadů či biomasy až po několik tun za hodinu. Je předpokládán zisk elektrické energie až 8 MWh u projektu, který by zpracovával za hodinu 5 tun vyříděného a vysušeného komunálního odpadu. Syntézní plyn je tomto případě palivem v kogenerační jednotce. [52]

Na obr. 5.2 je zobrazena demonstrační jednotka plazmového zplyňování nacházející se v Dubé od společnosti Millenium Technologies.



Obr. 5.2 Jednotka plazmového zplyňování [53].

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zapsána ve formě literární rešerše a zabývá se problematikou v oblasti zplyňování odpadů s následným využitím vyprodukovaného plynu, kterým je syntézní plyn.

V první kapitole je popsána charakteristika odpadu se zaměřením na komunální odpad. Dále je zhodnoceno jeho využití jako palivo v termických procesech na zpracování odpadu na základě jeho vlastností, zejména výhřevnosti. Navazuje druhá kapitola práce, kde je rozveden proces zplyňování, popis jeho jednotlivých fází, obsah znečišťujících látek ve vygenerovaném plynu a technologie pro jejich odstranění. Třetí kapitola se zabývá syntézním plynem, jeho složením a následnou aplikací ve spalovacích motorech, plynových turbínách nebo pro výrobu vodíku. Další kapitola pojednává o technologiích používaných na zplyňování odpadu. Je zde uvedeno jejich základní rozdělení, kde jsou poté stručně popsány jednotlivé typy zplyňovacích reaktorů. V druhé části této kapitoly jsou uvedeny a vysvětleny konkrétní příklady zplyňovacích zařízení ve světě. Na závěr je v poslední kapitole nastíněna problematika zplyňování odpadů v České republice, kde jsou prezentovány projekty s cílem vybudování zařízení na plazmové zplyňování odpadů.

V současné době je v České republice nejvíce rozšířeno skládkování komunálního odpadu a jsou zde pouze čtyři zařízení na energetické využití odpadu. Tato situace by se měla zlepšit do roku 2024, kde legislativa stanovuje zákaz skládkování veškerého využitelného komunálního odpadu. Pokud k tomuto dojde nebo bude odsunut termín na rok 2030 je ale otázkou. Podpora stávajících projektů na výstavbu zařízení na zplyňování odpadů je možnou cestou, jak tuto situaci zlepšit. Zplyňování, zejména plazmové zplyňování, je vhodnější možností ke spalování, protože dochází k menšímu dopadu na životní prostředí ve formě emisí. V každém případě je energetické využití odpadu vhodnou alternativou ke skládkování, jelikož dochází k výrazné redukci množství odpadu. Je ale v tomto ohledu nutné provést větší množství výzkumů a poprat se s problémy, které se pojí ke komunálnímu odpadu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Produkce, využití a odstranění odpadů* [online]. Český statistický úřad, 2017 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2017>
- [2] ČESKO. *Vyhláška č. 93/2016 Sb.: Vyhláška o Katalogu odpadů*. In: *Zákony pro lidi*. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93/zneni-20160401>
- [3] WALDHEIM, Lars. *Gasification of Waste for Energy Carriers: A review*, IEA Bioenergy, 2018. ISBN 978-1-910154-56-4.
- [4] BENEŠOVÁ, Libuše. *Skladba komunálního odpadu v ČR* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://www.czp.cuni.cz/czp/images/stories/2012/odpady/1-skladba_komunalniho_odpadu-benesova.pdf
- [5] Zákon č. 185/2001 Sb.: Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: *Zákony pro lidi*. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [6] *KOMUNÁLNÍ ODPAD JEDNOZNAČNÝ KRÁL MEZI NAŠIMI ODPADY* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/komunalni-odpad>
- [7] BALÁŠ, Marek, Zdeněk SKÁLA a Martin LISÝ. *Spalovny odpadu - odpad jako palivo*. 2014. [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/nakladani-s-odpady/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>
- [8] ČERMÁKOVÁ, Kateřina. *Studie materiálové skladby směsného domovního odpadu*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoko učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Martin Dočkal, Ph.D.
- [9] *Výhřevnost odpadu: Co to vlastně je?* [online]. Siegl, 2016 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://www.siegl.cz/blog/odpady/vyhrevnost-odpadu-co-to-vlastne-je>
- [10] KOLONIČNÝ, Jan. *Studie energetického využití komunálního odpadu v Moravskoslezském kraji: k projektu Nakládání s odpady v Moravskoslezském a Žilinském kraji*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3547-1.
- [11] *Infografika: Odpad jako zdroj energie. Jak je využíván v ČR a Evropě?* [online]. OEnergetice, 2018 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/zivotni-prostredi/infografika-energeticke-vyuziti-odpadu-evrope-ceske-republice>
- [12] FIEDOR, Jiří. *Odpadové hospodářství I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2573-1.
- [13] *Energetické využití odpadů: odpad je nevyčerpatelný zdroj energie : [tematická informační příručka]*. Praha: České ekologické manažerské centrum, 2010. ISBN 978-80-85990-15-7.
- [14] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. *Zplyňování - principy a reaktory* [online]. 2016 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>

- [15] HONUS, Stanislav. *NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY VÝROBY TEPELNÉ A ELEKTRICKÉ ENERGIE* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/07_Elektroenergetika_18-20/19_MMP/171_Nekonvencni_zpusoby_vyroby_energie---Honus.pdf
- [16] *Case studies: Industrial emissions rules in action* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/environment/industry/stationary/ied/legislation.htm>
- [17] *Čištění plynu* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/13%20CisteniPlynu.pdf
- [18] *Co jsou to spaliny* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.analyzatoryspalin.cz/spaliny/>
- [19] HOLÍNEK, Tomáš. Energetické využití odpadu - alternativa za fosilní paliva. *O Energetice* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/energeticke-vyuziti-odpadu-alternativa-za-fosilni-paliva>
- [20] *Technologie čištění spalin po spalování odpadů* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/ELO-pr8.pdf>
- [21] *TECHNOLOGIE KE SNIŽOVÁNÍ EMISÍ* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/2_tzl_filtrace_fin_opl_zz_0.pdf
- [22] EVROPSKÁ KOMISE: Integrovaná prevence a omezování znečištění, referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování. Červenec 2005
- [23] FRIEDEL, Pavel a Václav PEER. *Nežádoucí látky vznikající při zplyňování* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/14932-nezadouci-latky-vznikajici-pri-zplynovani>
- [24] Carbon recycling. *Enerkem* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://enerkem.com/process-technology/carbon-recycling/>
- [25] Environmental and social acceptability. *Enerkem* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://enerkem.com/process-technology/environmental-and-social-acceptability/>
- [26] Příspěvatelé Wikipedie, *Výhrěvnost* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 16. 06. 2019, 16:12 UTC, [citováno 17. 05. 2020] <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=V%C3%BDh%C5%99evnost&oldid=17370892>>
- [27] KLUS, Lukáš. *Zplyňování biomasy pro kogeneraci tepla a elektřiny* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/109330>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
- [28] JANŠA, Jan. *Zplyňování paliva získaného z odpadu v autotermním generátoru* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/138571>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [29] CHŁOND, Rafał Adam. *Zvyšování výhřevnosti a kvality plynu ze zplyňování biomasy* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/96308>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [30] Ube Industries and Ebara Corporation's Two-Stage Pressure Gasification System Wins Leading Science and Technology Award from Japanese Government. *UBE News* [online]. 20.4.2005 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://www.ube-ind.co.jp/ube/en/news/2005/2005_03.html
- [31] ARIES CLEAN ENERGY: LEBANON'S GASIFICATION PLANT IS BLENDING WASTE AND GENERATING SUSTAINABLE POWER. *Environment Leader* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.environmentalleader.com/projects_of_year/aries-clean-energy/
- [32] Lebanon Gasification Plant Reaches Milestone. *Aries Clean Energy* [online]. 1.11.2018 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://ariescleanenergy.com/article-lebanon-gasification-plant-reaches-milestone/>
- [33] *FastOx® gasification* [online]. Sierra Energy [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.sierraenergy.com/technology/fastox-gasification/>
- [34] *FastOx® Pathfinder* [online]. Sierra Energy [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.sierraenergy.com/technology/our-systems/>
- [35] LISÝ, M. Čištění energoplynu z biomasy v katalytickém vysokoteplotním filtru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 148 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
- [36] ELBL, P. Optimalizace podmínek zplyňování biologicky rozložitelných odpadů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [37] BASU, Prabir. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Burlington: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-12-374988-8.
- [38] *Wood gas as engine fuel*. Rome: Food and Agriculture of the United Nations FAO, 1986. ISBN 92-5-102436-7.
- [39] Synthesis gas / syngas. *ClarkeEnergy: A Kohler Company* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.clarke-energy.com/applications/synthesis-gas-syngas/>
- [40] *FastOx Gasification: Technical Overview* [online]. Sierra Energy [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://sierraenergy.com/wp-content/uploads/2020/05/Sierra-Energy-Technical-Sheet.pdf>
- [41] Gershman, Brickner & Bratton, Inc. *Gasification of Non-Recycled Plastics From Municipal Solid Waste In the United States* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://plastics.americanchemistry.com/Sustainability-Recycling/EnergyRecovery/Gasification-of-Non-Recycled-Plastics-from-Municipal-Solid-Waste-inthe-United-States.pdf>

- [42] Příspěvatelé Wikipedie, *Fischerova–Tropschova syntéza* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 1. 04. 2019, 16:35 UTC, [citováno 13. 06. 2020]
<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fischerova%E2%80%93Tropschova_synt%C3%A9za&oldid=17104589>
- [43] BRÍZA, Martin. *Návrh kogeneračního systému pro menší průmyslový objekt* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70082/F3-DP-2017-Briza-Martin-Navrh_kogeneracniho_systemu_pro_mensi_prumyslovy_objekt.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Vít Klein, Ph.D.
- [44] ING. SKOBLJA, Sergej. *Úprava složení plynu ze zplyňování biomasy*. Praha, 2004. Disertační práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta technologie ochrany prostředí.
- [45] *Mitsubishi Hitachi Systems Picked For Mexico Power Project* [online]. DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE, 2016 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://diesलगasturbine.com/mitsubishi-hitachi-systems-picked-mexico-power-project/>
- [46] *Konverze vodního plynu* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://www.vodik.wz.cz/vyroba/konverzePlynu.html>
- [47] *Výroba a použití vodíku* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/VODIK_vyroba_a_pouziti.pdf
- [48] Příspěvatelé Wikipedie, *Vodík* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 8. 06. 2020, 12:25 UTC, [citováno 16. 06. 2020]
<<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vodik&oldid=18671492>>
- [49] *Úvod: O nás* [online]. Ostrava: PGP Terminal [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.pgpt.cz/cz/o-nas.html>
- [50] JAROLÍMEK, Petr. *Projekt na bázi plazmového zplyňování je proces transformační, recyklační a bezodpadový, říká Petr Břenek* [online]. 20.1.2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/projekt-na-bazi-plazmoveho-zplynovani-je-proces-transformacni-recyklacni-a-bezodpadovy-rika-petr-brenek>
- [51] *EKOLOGICKÁ TRANSFORMACE KOMUNÁLNÍHO A JINÉHO TYPU ODPADU PRO ÚČELY MATERIÁLOVÉHO A NÁSLEDNÉHO ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ NA BÁZI PLAZMOVÉ TECHNOLOGIE SPOLEČNOSTI* [online]. Ostrava: PGP Terminal [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.pgpt.cz/prilohy/pgpt_cz_lowres-a5_150404_1438932310.pdf
- [52] PRAX, Martin. *Unikátní technologie pro boj s odpadem: česká firma zvládla plazmové zplyňování* [online]. Obnovitelně, 13.12.2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.obnovitelne.cz/clanek/652/unikatni-technologie-pro-boj-s-odpadem-ceska-firma-zvladla-plazmove-zplynovani/>

- [53] *VĚDECKO-TECHNICKÝ PARK DUBÁ* [online]. Millenium Technologies [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <http://www.millenium-technologies.cz/vtp-duba.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1 Produkce komunálního odpadu a odpadu z podniků v roce 2012 v ČR [7].
- Obr. 1.2 Složení komunálního odpadu v ČR 2015 [8].
- Obr. 1.3 Nakládání s komunálními odpady v roce 2017 [1].
- Obr. 2.1 Průběh reakcí v reaktoru [14].
- Obr. 2.2 Schéma procesů zplyňování [3].
- Obr. 2.3 Cyklón [17].
- Obr. 3.1 Schéma využití syntézního plynu [41].
- Obr. 3.2 Kogenerační jednotka s pístovým spalovacím motorem [27].
- Obr. 3.3 Plynová turbína [45].
- Obr. 4.1 Schéma protiproudového reaktoru [14].
- Obr. 4.2 Schéma reaktoru s křížovým tokem [14].
- Obr. 4.3 Schéma reaktoru se stacionární fluidní vrstvou [27].
- Obr. 4.4 Schéma reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou [27].
- Obr. 4.5 Zobrazení zařízení Enerkem [24].
- Obr. 4.6 Ilustrace využití produktů z Enerkem [25].
- Obr. 4.7 Schéma zařízení APP [3].
- Obr. 4.8 Ebara Ube Process [3].
- Obr. 5.1 Schéma plazmového reaktoru Westinghouse Plasma Corporation [51].
- Obr. 5.2 Jednotka plazmového zplyňování [53].

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1.1 Výhřevnost složek komunálního odpadu [7].
- Tab. 1.2 Prvkové složení komunálního odpadu dle BREF [3].
- Tab. 2.1 Emisní limity dle směrnice o průmyslových emisích [3].
- Tab. 3.1 Chemické složení syntézního plynu (Sierra Energy) [40].
- Tab. 4.1 Totální produkce zařízení Pathfinder [34].
- Tab. 5.1 Emise do ovzduší [51].