

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2017

**RENÁTA
STRMIŠKOVÁ**

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpala informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány v textu podle normy ČSN ISO 690.

V Praze dne 9. 6. 2017

.....

Anotační list

Jméno autora: Renáta Strmisková
Název DP: Návrh zařízení pro plazmové zplynování komunálního odpadu
Anglický název: Design of plant for plasma gasification of municipal waste
Akademický rok: 2016 / 2017
Ústav/Odbor: Ústav energetiky / Energetika
Vedoucí DP: doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

Bibliografické údaje:

Počet stran:	72
Počet obrázků:	22
Počet tabulek:	35
Počet příloh:	4

Klíčová slova: komunální odpad, plazmové zplynování, syntézní plyn

Keyword: municipal waste, plasma gasification, syngas

Anotace: Tato diplomová práce se zabývá dostupnými technologiemi na plazmatické zplynování komunálního odpadu. Po rešerši je pro jednu vybranou technologii sestaveno procesní schéma a určena hmotnostní a energetická bilance. Pro vystupující syntézní plyn je navrženo jeho energetické využití ve 3 variantách, včetně jejich porovnání.

Abstract: This thesis focuses on the available technologies for plasma gasification of municipal waste. Process diagram, energy and mass balance is determined for one selected technology, where three energy utilization variants of synthesis gas are designed and compared.

Poděkování

Chtěla bych poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji svému vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Tomáši Dlouhému Csc., za odborné vedení práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích.

Mé poděkování patří také mé rodině a blízkým přátelům, za pomoc a podporu během studia.

Seznam použitého značení

Symbol	Jednotka	Název
c	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
l	m	délka
\dot{m}	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	hmotnostní tok
m	kg	hmotnost
M_m	$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$	molární hmotnost
n	mol	látkové množství
P	W	výkon
p	Pa	tlak
P_{el}	W	elektrický výkon
P_i	W	příkon
p_{kon}	Pa	tlak v kondenzátoru
p_{NN}	Pa	tlak v napájecí nádrži
P_{tep}	W	tepelný výkon
Q	J	teplo
Q_i	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}, \text{J}\cdot\text{m}^{-3}$	výhřevnost
R	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$	univerzální plynová konstanta
t	$^{\circ}\text{C}$	teplota
t_k	$^{\circ}\text{C}$	teplota kondenzátu
t_{kon}	$^{\circ}\text{C}$	teplota vody v kondenzátoru
t_{NN}	$^{\circ}\text{C}$	teplota vody v napájecí nádrži
t_o	$^{\circ}\text{C}$	teplota odběrové páry
t_{v1}	$^{\circ}\text{C}$	teplota vody na vstupu do oběhu
v	m^3	objem
z	-	počet regeneračních ohříváků
Δt_{kon}	$^{\circ}\text{C}$	tepelný spád v kondenzátoru
Δt_{NTO}	$^{\circ}\text{C}$	teplotní spád mezi odběrovou párou a vodou na nízkotlakém ohříváku
Δt_o	$^{\circ}\text{C}$	teplotní rozdíl mezi odběrovou párou a kondenzátem
Δt_v	$^{\circ}\text{C}$	ohřátí chladicí vody
Δt_{VTO}	$^{\circ}\text{C}$	teplotní spád mezi odběrovou párou a vodou na vysokotlakém ohříváku

η	-	účinnost
$\eta_{\text{oběhu - čistá}}$	-	čistá účinnost oběhu
$\eta_{\text{oběhu - hrubá}}$	-	hrubá účinnost oběhu
$\eta_{\text{výroby el. energie}}$	-	účinnost výroby elektrické energie
$\eta_{\text{výroby tep. energie}}$	-	účinnost výroby tepelné energie
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	hustota

Obsah

1. ÚVOD	10
2. KOMUNÁLNÍ ODPAD	12
2. 1. Definice komunálního odpadu	12
2. 2. Složení komunálního odpadu	12
2. 2. 1 Vliv jednotlivých podskupin na výhřevnost	14
2. 2. 2 Prvkové složení komunálního odpadu	15
2. 3 Nebezpečný odpad	16
3. ZEVO MALEŠICE	17
3. 1 Historie spalování odpadu v Praze	17
3. 2 Spalovna odpadu v Malešicích	17
4. PLAZMOVÉ PROCESY	19
4. 1 Co je plazma?	19
4. 2 Princip plazmového zplynování	19
4. 3 Výhody plazmového zplynování	20
4. 4 Plazmové procesy	20
4. 4. 1 Westinghouse (Alter NRG)	21
4. 4. 2 Europlasma (C. H. O. - Power)	25
4. 4. 3 Advanced Plasma Power (Tetronics)	28
4. 4. 4 Plasco Energy (Phoenix Solutions Company)	29
4. 5 Vyhodnocení plazmových technologií pro zplynování komunálního odpadu	31
4. 6 Návrh procesního schématu na zplynování komunálního odpadu	32
5. SYNTÉZNÍ PLYN	35
5.1 Složení syntézního plynu	35
5.2 Hmotnostní a energetická bilance plazmového zplynování	46
6. VYUŽITÍ SYNTÉZNÍHO PLYNU	48

6.1 Varianta 1: oběh s kondenzační turbínou	48
6.2 Varianta 2: oběh s protitlakou turbínou.....	51
6.3 Varianta 3: oběh s plynovou turbínou	53
6.4 Vlastní spotřeba na provoz zplynovacího generátoru	55
6.5 Porovnání jednotlivých variant	56
6.5.1 Porovnání z hlediska vlastností navržených oběhů.....	56
6.5.2 Porovnání vlastností z hlediska celkového zařízení	57
6.6 Návrh nejvhodnějšího využití syntézního plynu	60
7. ZÁVĚR	61
8. ZDROJE.....	63
9. SEZNAMY	66
9.1 Seznam obrázků	66
9.2 Seznam grafů.....	67
9.3 Seznam tabulek.....	67
9.4 Seznam příloh.....	68

1. ÚVOD

Jak správně nakládat se vzniklým odpadem je v dnešní době velmi diskutované téma. Odpady vznikají téměř při každé lidské činnosti. Speciálně komunální odpad a kaly z čistíren odpadních vod jsou produktem každého člověka. Každoročně je v České republice vyprodukováno přes 3 milióny tun komunálního odpadu, z toho je téměř 1,8 milionů tun odpadu skládkováno, 850 tisíc tun odpadu recyklováno a necelých 600 tisíc tun odpadu ročně je využito spalováním s využitím tepla. I po dokonalém vytrídění recyklovaných složek z odpadu zůstane poměrně velká část z tohoto odpadu, kterou je potřeba zpracovat jiným způsobem. V současné době se u nás nachází celkem 4 spalovny komunálního odpadu a to v Praze, v Brně, v Liberci a nově od roku 2016 i spalovna v Chotíkově u Plzně. Spalovny v Praze a v Liberci jsou vybaveny kogenerační jednotkou a je tedy možné vyrábět z odpadu teplo i elektřinu současně. Spalovna v Brně vyrábí pouze teplo. V České republice má od roku 2024 platit zákaz skládkování směsného komunálního odpadu a recyklovatelných odpadů, proto bude zapotřebí upravit stávající formu nakládání s odpady. Jednou z možností by mohlo být i plazmatické zplynování komunálního odpadu s produkcí čistého syntézního plynu. Plazmatické zplynování se vyznačuje možností různorodé vsázky a téměř 100 % konverzí uhlíku. Další výhodou je vysoká teplota ve zplynovacím reaktoru, což vede k rozkladu organických a části neorganických složek odpadu na jednoduché plynné a kapalné sloučeniny. Z reaktoru vystupuje ve spodní části sklovitá struska, která je nevyluhovatelná a nekontaminuje půdu ani vodu, neboť dochází k její vitrifikaci (zafixování toxických odpadů). Skelnou fázi bez toxických odpadů z této strusky lze dále využít např. ve stavebnictví jako náplň do skelné vaty. Hlavním produktem z plazmatického zplynování je syntézní plyn, který můžeme dále energeticky využívat. Po vyčištění má tento plyn při spalování stejné dopady na životní prostředí jako spalování zemního plynu.

Cílem této práce je navrhnout zařízení pro plazmatické zplynování směsného komunálního odpadu, kde hlavní vystupující složkou z procesu zplynování je vyčištěný syntézní plyn. Pro tento syntézní plyn bude výpočty ověřeno jeho nejlepší energetické využití.

V této práci je nejprve rozebráno detailní složení komunálního odpadu v Praze a vliv jednotlivých složek odpadu na jeho výhřevnost. Stručně je zde uveden také současný

stav spalovny v Malešicích. Dále následuje rešerše nabízených technologií na plazmatické zplynování odpadu, včetně výčtu dosud vystavených zařízení po světě, zakončená výběrem nejvhodnější technologie pro použití v Praze – Malešicích. Následně je navrženo procesní schéma této vybrané plazmové zplynovací technologie. Další kapitolou je výsledný syntézní plyn, kde je spočítáno prvkové složení tohoto plynu a určena jeho výhřevnost. Na tyto výpočty navazuje hmotnostní a energetická bilance, ze které je poté vypočítaná samotná účinnost zplynění. Poté je zde řešeno nejvhodnější využití syntézního plynu. V práci jsou porovnány tři varianty využití a to spálení syntézního plynu v plynovém kotli s výrobou elektřiny na kondenzační parní turbíně, s výrobou elektřiny a tepla na protitlaké parní turbíně a třetí varianta je při spálení syntézního plynu ve spalovací komoře se vstupem spalin na plynovou turbínu, za plynovou turbínou je zařazen kotel na odpadní teplo, který vyrábí horkou vodu na vytápění nebo ohřev teplé užitkové vody. Na závěr jsou jednotlivé varianty porovnány v tabulkách dle různých hledisek a navržena nejvhodnější varianta energetického využití daného syntézního plynu.

2. KOMUNÁLNÍ ODPAD

2. 1. Definice komunálního odpadu

Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. definuje komunální odpad jako:

„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“. [1]

Z toho vyplývá, že za komunální odpad je tedy možno považovat všechny odpad pocházející z domácností.

Pro účely této práce bude důležité stanovit zejména složení komunálního odpadu, pro určení výhřevnosti tohoto odpadu.

2. 2. Složení komunálního odpadu

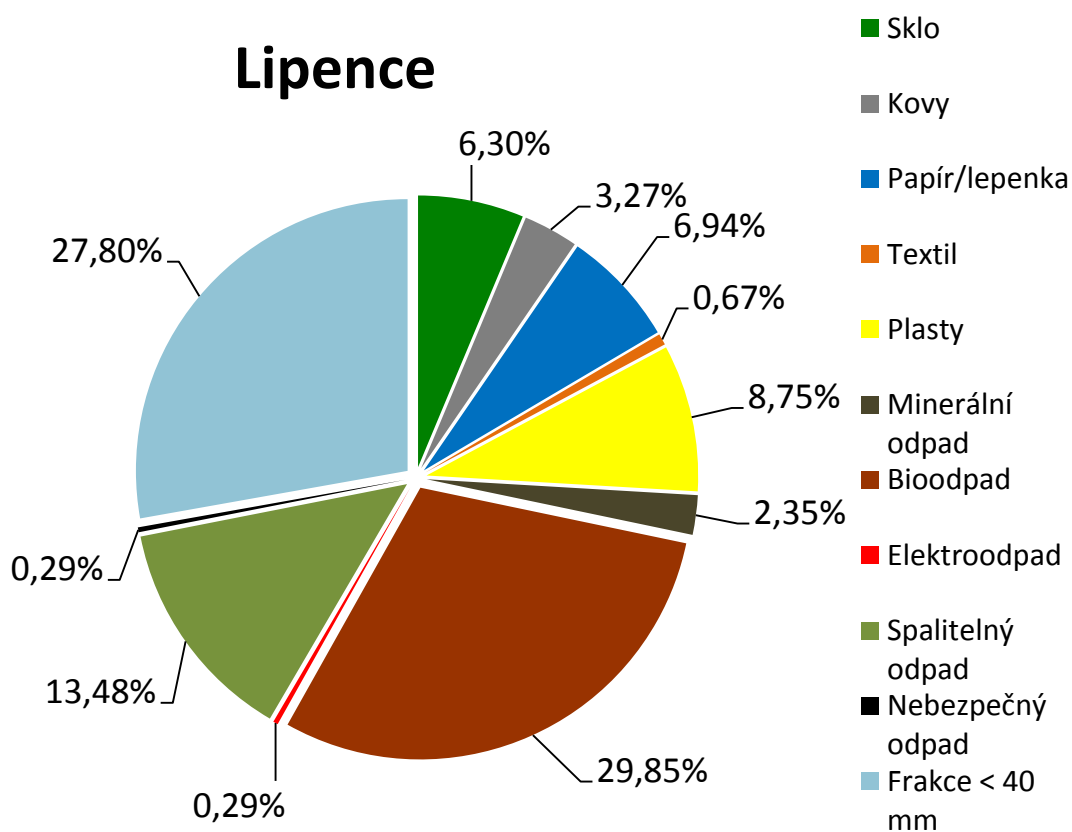
Komunální odpad z domácností je velmi nehomogenní směs, protože se skládá z různých materiálů. Pro stanovení detailního složení je proto nutné udělat rozbor odpadu. Na složení odpadu má vliv mnoho faktorů, např. roční období nebo místo, kde odpad vzniká. Proto není vždy jednoduché přesně složení odpadu definovat.

Rozbor odpadu je prováděn ve čtyřech ročních obdobích a to tak, že ze vzorku navezeného odpadu je metodou kvartace odebrán podvzorek o celkové hmotnosti přes 200 kg. Složení odpadu je poté zjišťováno metodou síťové analýzy a ručním dotřídováním do předem stanovených souborů látkových skupin. Pro síťovou analýzu je použito síto o velikosti ok 40 x 40 mm. Frakce, která je větší než 40 mm, je zcela podrobena látkovému rozboru. Frakce menší než 40 mm se dále látkově netřídí. [2]

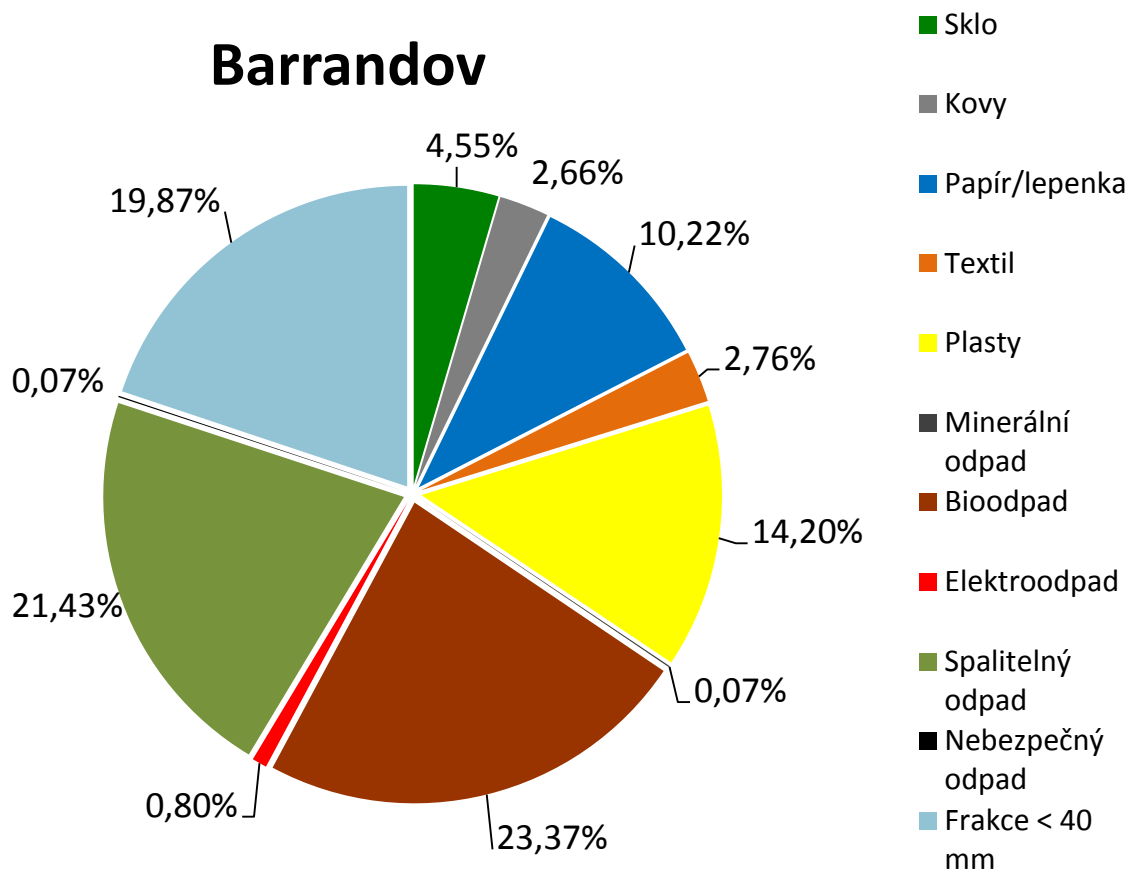
Další důležité hledisko je také typ zástavby. Rozlišujeme dva typy a to zástavbu venkovskou a sídlištní. Venkovská zástavba je tvořena rodinnými domy s převažujícím podílem lokálního vytápění pevnými palivy a tedy i větší možnosti spalování odpadu v domovních topeništích. Zastoupení objektů služeb a drobných živnostenských provozoven je nevýznamné. Oproti tomu je sídlištní zástavba tvořena zástavbou bytových domů s centralizovaným zásobováním teplem bez možnosti jakéhokoliv využití odpadů v místě jeho vzniku. Zastoupení objektů služeb a drobných živnostenských provozoven je nevýznamné. [2]

Komunální odpad se při rozboru třídil do několika podskupin a to na papír/lepenku, plasty, sklo, kovy, textil, minerální odpad, nebezpečný odpad, elektroodpad, bioodpad, spalitelný odpad a frakci menší než 40 mm. [2]

Pro příklad jsou zde uvedeny dva grafy zpracované firmou AGRO-EKO Consulting, a.s., ukazující složení komunálního odpadu. Na prvním grafu je znázorněno složení komunálního odpadu pocházejícího z venkovské zástavby městské části Lipence z období podzim 2015 a na druhém grafu sídlištní zástavba Barrandov, kde se rozbor komunálního odpadu konal v zimním období na přelomu roků 2015/2016.



Graf č. 1: Složení komunálního odpadu pocházející z venkovské zástavby městské části Lipence, podzim 2015 [2]



Graf č. 2: Složení komunálního odpadu pocházející ze sídlištní zástavby městské části Barrandov, zima 2015/2016 [3]

Porovnáním těchto grafů zjistíme, že rozdílný je zejména podíl frakce < 40 mm, který je výrazně vyšší u odpadu z venkovské zástavby, což souvisí s lokálním vytápěním rodinných domů. S podílem frakce přímo souvisí také podíl spalitelného odpadu. Ve venkovské zástavbě je taktéž vyšší podíl bioodpadu, který je způsoben biologickým odpadem ze zahrad.

2. 2. 1 Vliv jednotlivých podskupin na výhřevnost

Výhřevnost komunálního odpadu je závislá na podílech jednotlivých podskupin i na celkové vlhkosti tohoto odpadu, proto je složité ji přesně stanovit.

V komunálním odpadu rozlišujeme podskupiny, které mají pozitivní vliv na jeho výhřevnost, jako jsou např. papír nebo plasty, a podskupiny, které mají negativní vliv na výhřevnost odpadu a to sklo nebo bioodpad.

Papír i plasty výhřevnost odpadu zvyšují, ale zároveň je papír nasákový a náchylný na vlhkost, která potom výslednou výhřevnost snižuje. Oproti tomu plasty do sebe vodu

nevsakují a podílí se na zvyšování výhřevnosti. Nepříznivé však je, pokud se v odpadu vyskytne např. plastová láhev naplněná vodou. Tato voda způsobuje zhášení plamene a má negativní dopad na celkovou výhřevnost.

Na druhé straně vysoký podíl skla nebo vlhkého bioodpadu mají nepříznivý vliv na výhřevnost odpadu. V sídlištní zástavbě se v bioodpadu vyskytuje zejména kuchyňský odpad. Ten je ve své podstatě samostatně takřka nespalitelný neboť obsahuje vysoký podíl vlhkosti. Ve venkovské zástavbě se v bioodpadu vyskytuje nejen kuchyňský odpad, ale i dřevní a travnaté zbytky ze zahrady.

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé druhy odpadu a jejich výhřevnost, pokud jsou spalovány samostatně.

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
Štěpka, dřevo	12,4
Sklo	0,2

Tab. č. 1: Výhřevnost jednotlivých složek komunálního odpadu [4]

Výhřevnost komunálního odpadu se v závislosti na jeho složení pohybuje v rozmezí 7,5 až 10,5 MJ/kg. [4]

2. 2. 2 Prvkové složení komunálního odpadu

Prvkové složení je důležité zejména kvůli dalším stechiometrickým výpočtům. Sledované chemické prvky v odpadu jsou uhlík, vodík, kyslík, síra a dusík. V menší míře je zastoupen také fluor a chlor.

V tabulce (Tab. č. 2) je uvedeno prvkové složení komunálního odpadu v hmotnostních procentech.

Prvek	Množství [% hm]
Uhlík	18 - 40
Vodík	1 - 5
Dusík	0,2 - 1,5
Kyslík	15 - 22
Síra	0,1 - 0,5
Fluor	0,01 - 0,035
Chlor	0,1 - 1

Tab. č. 2: Příklad prvkového složení komunálního odpadu (v sušině) [4]

Z tabulky je patrné, že odpad obsahuje kromě hořlavých složek také řadu složek nebezpečných. Jedná se především o síru, chlor, fluor a další těžko rozložitelné organické látky a těžké kovy. Kromě síry se jedná o látky, které nejsou v klasických pevných palivech obsaženy nebo jsou v nich jen ve stopovém množství. Tento fakt vede zejména k vysokému nároku na čištění spalin při použití komunálního odpadu jako paliva.

2.3 Nebezpečný odpad

Pod pojmem nebezpečný odpad si lze představit jakýkoliv odpad, který má negativní vliv na životní prostředí, zdraví lidí i zvířat nebo při jeho manipulaci hrozí nějaké další nebezpečí. Nebezpečný odpad je tedy takový odpad, který vykazuje jednu nebo více z uvedených vlastností: výbušnost, oxidační schopnost, vysoká hořlavost, dráždivost, škodlivost zdraví, toxicita, karcinogenita, žíravost, infekčnost, schopnost uvolňovat vysoce toxické nebo toxické plyny ve styku s vodou, vzduchem nebo kyselinami nebo schopnost uvolňovat nebezpečné látky do životního prostředí při odstraňování. S nebezpečným odpadem proto nelze nakládat stejně jako s běžným komunálním odpadem, tzn. nelze ho ukládat do otevřených skládek, ani spalovat v běžných spalovnách. Nebezpečný odpad je v současné době likvidován ve speciálních spalovnách nebezpečného odpadu nebo se recykluje ve specializovaných firmách. Mezi nebezpečný odpad patří především: syntetické barvy a laky, syntetická ředidla, elektrické baterie, ropné produkty, oleje, kyseliny, lepidla, zdravotnický materiál (znečištěné obvazy, jehly), zářivky a jiný odpad obsahující rtuť apod. Celková produkce nebezpečných odpadů v České republice je odhadována na 1,6 milionů tun ročně. [5]

3. ZEVO MALEŠICE

3.1 Historie spalování odpadu v Praze

V Praze byla první spalovna postavena ve Vysočanech během hospodářské krize v letech 1930–1933. Do provozu byla uvedena v roce 1934, poblíž někdejší tramvajové zastávky Spalovna u Poděbradské ulice. Spalovna měla dva kotle o kapacitě 200 tun za den a odpad spalovala za přidání práškového uhlí. Páru vzniklou při spalování odpadu dodávala dálkovým parovodem okolním podnikům a rovněž ji využívala k výrobě elektrické energie dvěma turbogenerátory o výkonu po 5 MW. V průběhu provozu prodělala velkou rekonstrukci v letech 1959 až 1982. V posledních letech spalovala převážně uhlí a fungovala jako teplárna pro oblast Vysočan. V provozu byla do 6. 6. 1997. [6]

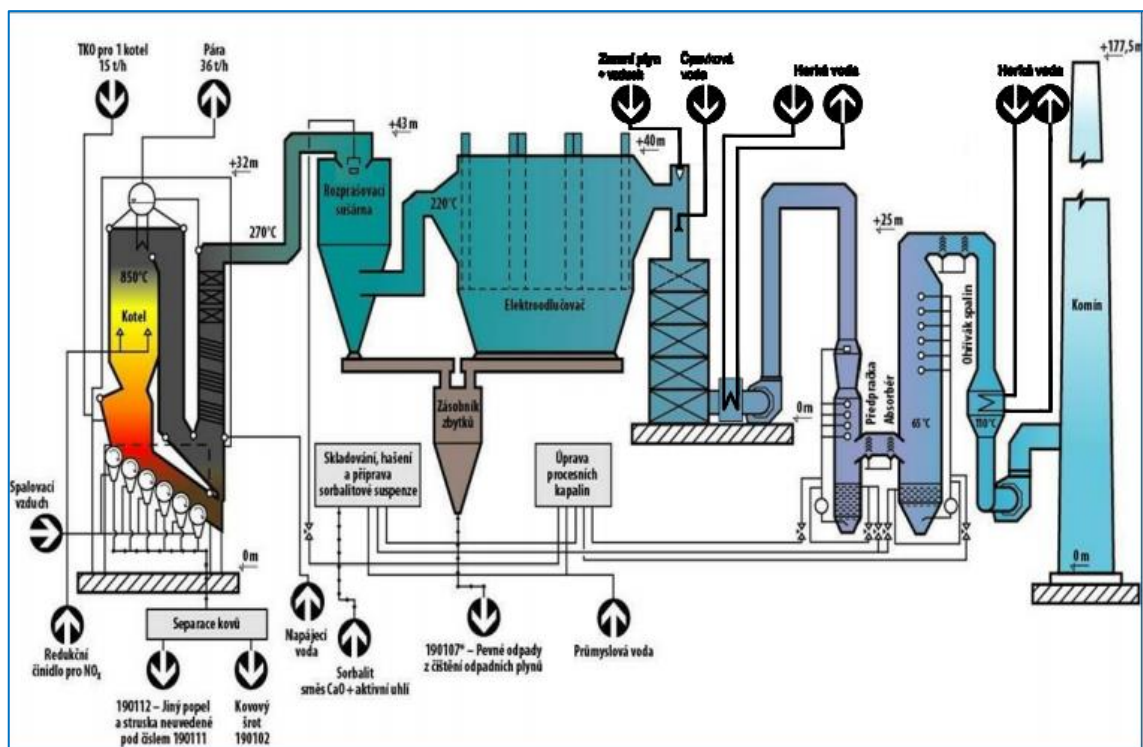
3.2 Spalovna odpadu v Malešicích

Spalovna odpadu ZEVO (Zařízení na energetické využití odpadu) v pražských Malešicích byla uvedena do provozu v říjnu roku 1998.

Technologie se skládá ze 4 kotlů s bubnovým roštem. Jeden z těchto 4 kotlů je však vždy odstaven z důvodu zálohy či rekonstrukce. Každý kotel má kapacitu 15 tun komunálního odpadu za hodinu. Kotle pracují s maximálním výkonem 36 t/hod páry o teplotě 235 °C a tlaku 1,37 MPa. Jako stabilizační palivo se používá zemní plyn. Kotle jsou řešeny jako jednobubnové s přirozenou cirkulací. Mají 3 tahy s membránovou stěnou. Ve druhém tahu se nachází konvekční kotlová plocha, tj. část výparníku a ve třetím tahu je přehřívák, ohřívák vody a ohřívák vzduchu. Touto technologií se zpracovává cca 80 % komunálního odpadu z Prahy. Za rok je možno zpracovat až 310 000 tun komunálního odpadu, z důvodu odstávky jednoho z kotlů je to však 210 000 tun ročně. [7]

Roční bilance materiálů a energie stanovená pro tuto spalovnu je následující. Na vstupu máme přes 213 tisíc tun odpadu a na výstupu 1200 TJ tepelné energie, téměř 50 tisíc tun škváry, 5 tisíc tun popílku, 3 tisíce tun železného šrotu a více než 1 miliardu m³ spalin. [7]

Jak je zmíněno výše, tyto spaliny je potřeba vyčistit, proto se zde nachází velmi komplexní a nákladné zařízení. Tato zařízení se v průběhu let vyvíjely podle postupně vyšších nároků kladených na čistotu spalin.



Obr. č. 1: Schéma zařízení na energetické využití odpadu Malešice [8]

Na obrázku (Obr. č. 1) je vidět, kudy spaliny prochází. Od odprašování přes odsiřování, odstraňování NO_x a kyselin, např. HCl, až po odstraňování perzistentních organických látek (POP), rtuti a dioxinů PCDD a PCDF. Toto schéma je taktéž uvedeno samostatně v příloze č. 4 pro lepší čitelnost.

V tabulce (Tab. č. 3) jsou uvedeny jednotlivé technologie používané pro odlučování emisí spolu s rokem uvedení do provozu. U vystupujících spalin jsou poté kontinuálně nebo jednorázově měřeny tyto hodnoty emisí.

Proces	Odlučovaná emise	Technologie	Zprovoznění
Elektrostatické odprašení	Prach < 10 pm	Elektroodlučovač	Původní projekt
Odstředivé odprašení	Prach > 10 pm	Cyklón, sušárna	1997
Kyselá mokrá vypírka	HCl, HF, kovy	Mokrá Ca vypírka	1997
Zásaditá mokrá vypírka	SO _x	Mokrá Ca vypírka	1997

SNCR NO_x	NO _x	SNCR v kotli	2000
Adsorpce na akt. Uhlí	POP, Hg	Adsorpce na akt. uhlí	2000
SCR DeDiox	PCDD/F	Katalyzátor	2007
SCR DeNO_x	NO _x	Katalyzátor	2010

Tab. č. 3: Chronologie spouštění technologií na čištění spalin [9]

4. PLAZMOVÉ PROCESY

4.1 Co je plazma?

Plazma je vysoce ionizovaný plyn obsahující atomy, které ztratily jeden nebo více elektronů. Atomy jsou tedy elektricky nabitě a aktivní. Jelikož se plazma chová jinak než běžné kapalně, pevně nebo plynné skupenství hmoty, hovoří se někdy o čtvrtém skupenství hmoty. Příkladem vzniku plazmy v přírodě je výboj blesku, při kterém může teplota přesáhnout i 7000 °C. [2]

4.2 Princip plazmového zplynování

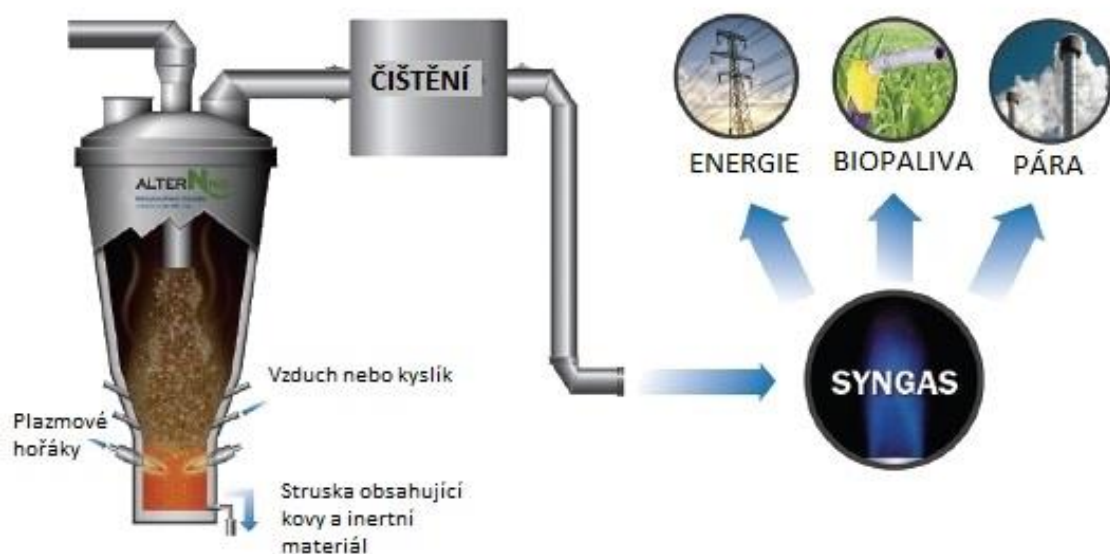
Při plazmovém zplynování používáme jako vstupní veličinu odpad, a to jak běžný komunální odpad, bioodpad, kaly z čistíren odpadních vod, tak i nebezpečný odpad, který bychom při běžném spalování použít nemohli. Před samotnou vsázkou odpadu do zplynovacího reaktoru je nejdůležitější jeho úprava na požadované parametry. Bioodpad a kaly z čistíren odpadních vod je nutné vysušit, pevný odpad rozdrtit, případně i granulovat pro lepší manipulaci a regulaci přísunu.

Odpad je dávkován do zplynovacího reaktoru, kde probíhá samotné zplynování a vitrifikace. Reaktor je opatřen plazmovými hořáky, obsahující grafitové elektrody. Na tyto elektrody je přiveden proud a vzniká tak mezi nimi elektrický oblouk. Do oblouku se pouští plazmový plyn jako argon, dusík nebo vzduch. Nejčastěji je používán právě vzduch a to díky jeho dostupnosti. Plazmový plyn se v elektrickém poli transformuje na plazmu. Dosahovaná teplota uvnitř a v okolí oblouku dosahuje hodnot 2 000 až 10 000 °C. Obrovskou výhodou je rozklad organického a části neorganického odpadu na jednoduché plynné a kapalně sloučeniny.

Výstupní veličinou je syntézní plyn (syngas), jehož hlavními složkami jsou vodík a oxid uhelnatý. V menší míře jsou zastoupeny oxid siřičitý, chlorovodík a vodní pára.

Před použitím syntézního plynu je nutné ho dostatečně vyčistit. Čištěním z něj odstraňujeme oxidy síry, kyselinu chlorovodíkovou, prachové částice, těžké kovy nebo případnou vlhkost.

Odpad vycházející ve spodní části reaktoru obsahuje složky, které se netransformují na plyn. Jedná se o kovovou slitinu a strusku. Struska je následně vitrifikována. Vitřifikací (zeskelnatěním) totiž dosáhneme dokonalého zafixování toxických odpadů. Ze vstupních surovin tedy kromě syntézního plynu získáme také skelnou fázi, kterou můžeme dále využít např. ve stavebnictví. [11]



Obr. č. 2: Plazmový zplynovací reaktor [11]

4. 3 Výhody plazmového zplynování

Mezi hlavní výhody plazmového zplynování patří nepochybně možnost různorodé vsázky. Zplynovat můžeme nejen běžný komunální odpad, ale například i nebezpečný odpad. Při zplynování dochází téměř k 100 % konverzi uhlíku. Další výhodou je sklovitá struska, která je nevyluhovatelná a nekontaminuje půdu ani vodu. Samotný syntézní plyn lze vyrobit podle požadavků na jeho další zpracování a jeho spalování po vyčištění má stejné dopady na životní prostředí jako spalování zemního plynu. [12]

4. 4 Plazmové procesy

Technologie k vytváření plazmy jsou v současné době nabízeny především těmito čtyřmi společnostmi: Europlasma, Westinghouse, Phoenix Solution Company (PSC) a Tectronics. Každá společnost má svoji technologii pro plazmové zplynování

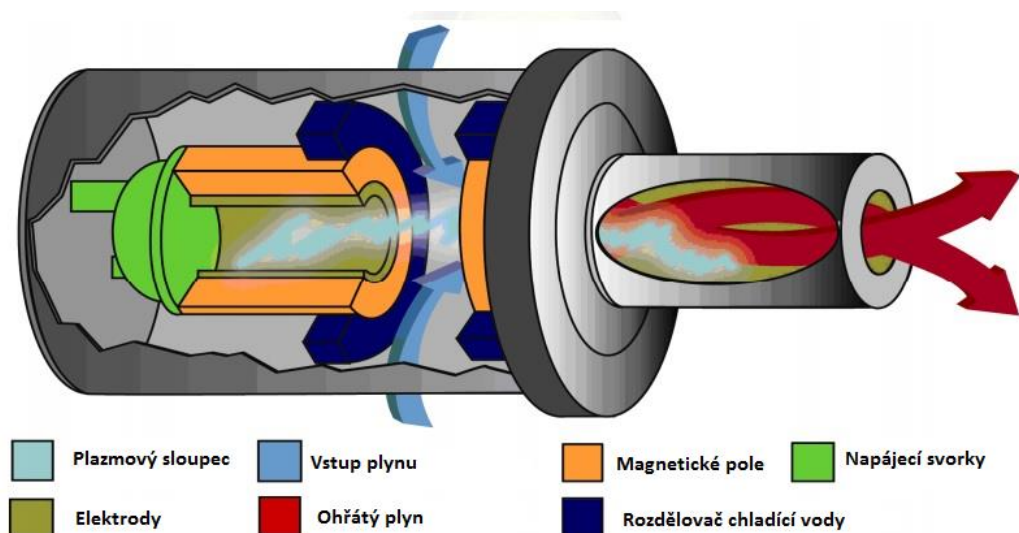
a vystavěné zařízení po celém světě. Řada zařízení pro plazmové zplynování v průmyslovém měřítku je umístěna převážně v Asii a v Americe. V následujících podkapitolách budou detailněji tyto technologie rozepsány.

4. 4. 1 Westinghouse (Alter NRG)

Společnost Westinghouse Plasma Corporation je dceřinou společností firmy Alter NRG. Jedná se o kanadskou firmu představující technologii, která umožňuje efektivně využít energii ze směsného komunálního odpadu při minimálním zatížení životního prostředí. Jejich cílem je získat čistou energii ve formě elektrické energie, syntézního plynu nebo etanolu z vyříděného odpadu. Společnost je v současnosti zastoupena na trhu s plazmovým zplynováním s kapacitami 40 – 620 tun za den pevného komunálního odpadu, respektive 30 – 540 tun za den nebezpečného odpadu. Využití kyslíku jako zplynovacího média je o kapacitě až 1000 tun za den. [14]

4. 4. 1. 1 Technologie

Proces zplynování vyvinutý touto společností je založen na protiproudém generátoru, ve kterém je požadovaná tepelná energie dodaná od plazmových hořáků. Teploty uvnitř plazmové trysky se pohybují mezi 5000 a 7000 °C a průměrná teplota v reaktoru je asi 2000 °C. [15]

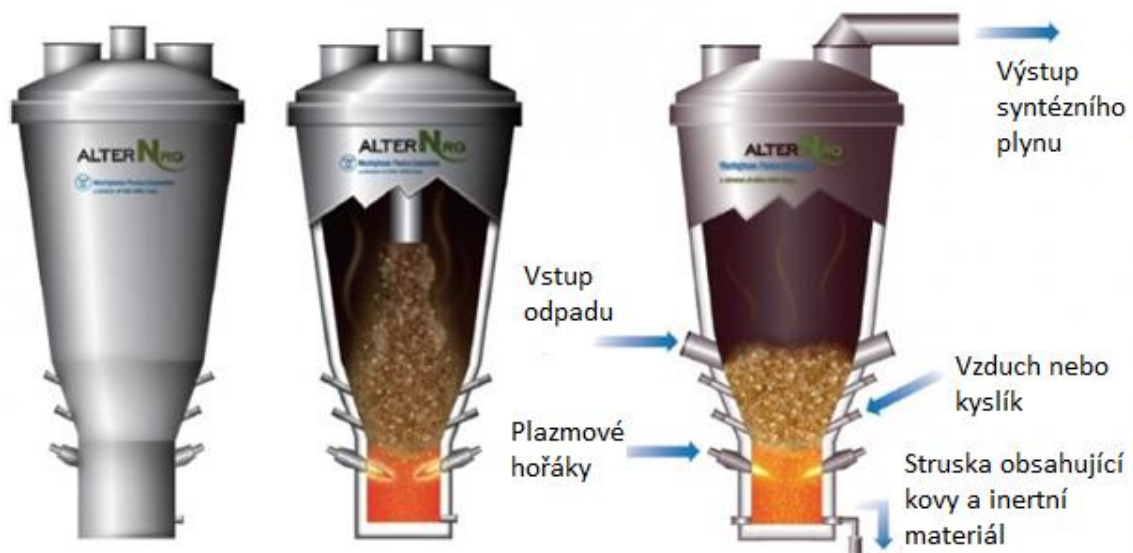


Obr. č. 3: Plazmový hořák Westinghouse Plasma Gasification [13]

Konstrukce plazmového zplynovacího reaktoru je založená na principu konstrukce vysoké pece. Jedná se o ocelovou nádobu se žáruvzdornou vyzdívkou. Spodní část tohoto reaktoru je chlazená vodou. Reaktor je schopen generovat vysokou provozní teplotu a redukovat rychlost výstupního plynu. Dlouhé doby setrvání uvnitř reaktoru

zajišťují štěpení dehtujících látek a minimalizaci množství prachových částic unášených syntézním plynem. Organické složky zpracovávaného odpadu se převedou na syntézní plyn s vysokou energií, opouští reakční komoru v horní části a poté se ochladí a čistí se pro další využití. Čištění syntézního plynu zahrnuje kalení, drhnutí s hydroxidem sodným, elektrostatický odlučovač tuhých částic a filtr s aktivním uhlíkem. Anorganické složky se roztaví při vysokých teplotách ve spodní části reaktoru. Tato struska o teplotě asi 1650 °C, se vypouští v dolní části. Jedná se o inertní odpadní složky a kovy. Železné kovy se oddělí a inertní frakce se používá jako stavební materiály. [15]

Vstupním materiálem je tuhý komunální odpad, odpadní pneumatiky, drcená lehká frakce, biomasa a nebezpečný odpad. [15]



Obr. č. 4: Plazmový reaktor Westinghouse Plasma Corporation [15]

4. 4. 1. 2 Stav vývoje

V současné době má tato společnost instalována 4 zařízení v komerčním provozu. Jedná se o tato zařízení:

- **MEPL, Pune, Indie (2009)**
– zařízení zpracovává nebezpečné odpady z více než 30 průmyslových odvětví v Indii s kapacitou 72 tun za den
- **Mihama-Mikata, Japonsko (2002)**
– zařízení zpracovává 20 t/d tuhého komunálního odpadu z měst Mihama a Mikata a k tomu 4 t/d čistírenských kalů

- veškerá struska z tohoto zařízení je s výhodou použita jako kamenivo pro beton nebo dlažební kostky
- - zařízení trvale neplní emisní požadavky
- **Wuhan, Hubei, Čína (2013)**
 - zařízení zpracovává biomasu s kapacitou 150 t/d
- **Shanghai, Čína (2014)**
 - zařízení zpracovává zdravotnický odpad

Navíc zařízení **EcoValley** (uvedené do provozu v roce 2003), které se nachází v blízkosti městečka **Utashinai** na ostrově Hokkaido v **Japonsku** bylo odstaveno z provozu kvůli nedostatku vstupních surovin vlivem ztráty dlouhodobých smluv. [16]

Demonstrační zařízení **Westinghouse Plasma Center** je umístěno v **Madisonu** ve **Spojených státech amerických** a vystaveno bylo v roce 1984. Slouží pro výzkumné účely. Má kapacitu 48 t/d odpadu a vyrábí syntézní plyn. V tomto zařízení bylo testováno více než 100 různých odpadních frakcí. Společnost Alter NRG se neustále snaží vylepšit technologii zplynování na základě výsledků získaných z tohoto demonstračního zařízení a na základě zkušeností v provozních zařízeních. [16]



Obr. č. 5: Demonstrační zařízení Westinghouse Plasma Center v Madisonu ve Spojených státech amerických [16]

Zkušební provozem je zatěžováno zařízení **Tees Valley Renewable Energy Facility I** nacházející se ve **Velké Británii** s kapacitou 1000 tun odpadu za den.

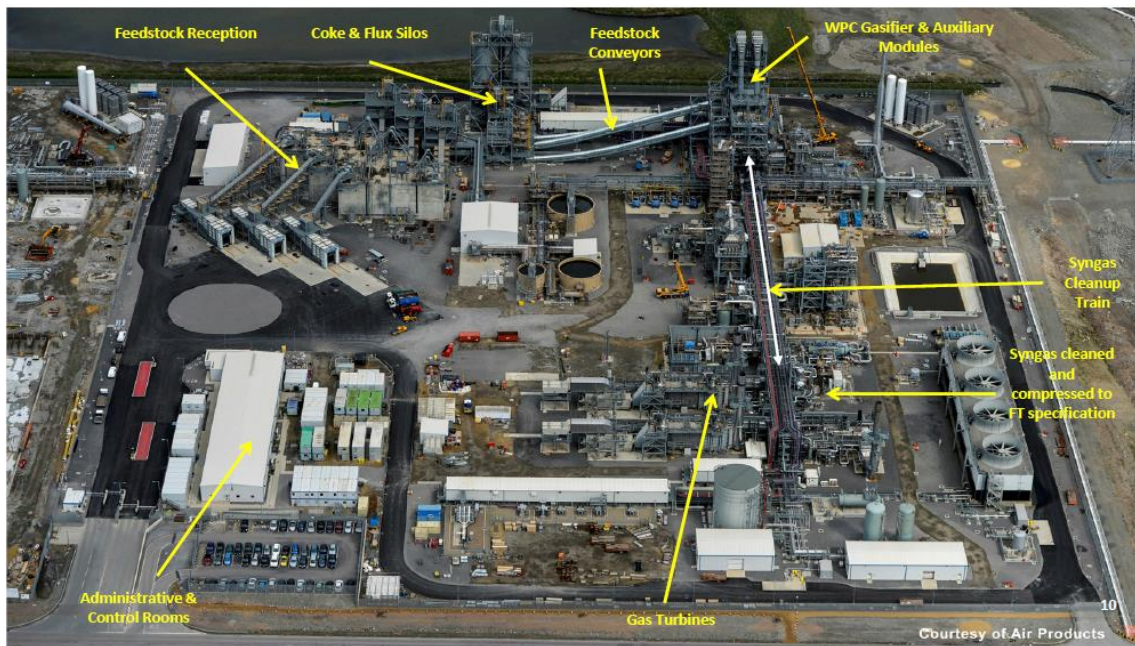


Obr. č. 6: Zařízení Tees Valley Renewable Energy Facility I [16]

Navíc je zde ve výstavbě také druhé zařízení **Tees Valley Renewable Energy Facility II** se stejnou kapacitou. Toto zařízení je v současné době ze 75 % dokončené. Po uvedení do provozu budou obě zařízení vyrábět celkem 100 MW elektrické energie, která je schopna bezpečně poskytovat energii z odpadu pro 100 000 domů. [16]



Obr. č. 7: Letecký pohled na zařízení Tees Valley Renewable Energy Facility I a II [16]



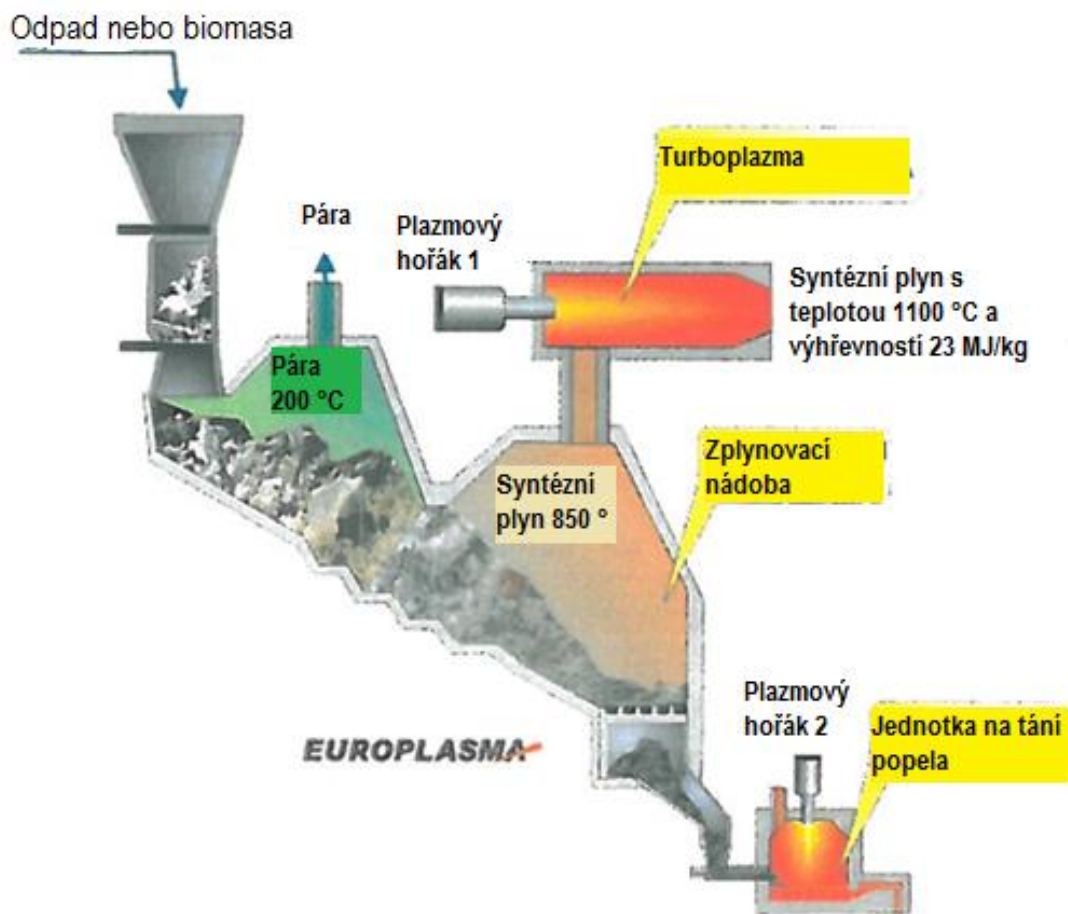
Obr. č. 8: Letecký pohled na Tees Valley Renewable Energy Facility I v roce 2015 [13]

4. 4. 2 Europlasma (C. H. O. - Power)

Skupina společností Europlasma, skládající se z Inertam, Torch & Process, C. H. O. – Power a Europe Environment, nabízí plazmové hořáky a reaktory pro různé aplikace. V současné době obchoduje Europlasma na trhu s třemi různými produkty. Jedním z nich je reaktor na zeskelnatění popílku nabízený Europlasmou, dále proces na zeskelnatění odpadů obsahujících azbest od společností Inertam a třetí je proces na zplynování tuhého komunálního odpadu od společnosti C. H. O. Power. Vzhledem k zaměření této práce bude podrobněji popsáno pouze zplynování tuhého komunálního odpadu od společnosti C. H. O. Power. [17]

4. 4. 2. 1 Technologie

V první fázi je přetříděný a rozdrčený odpad zplynován v pevném loži na roštu. Tento rošt je rozdělen na sušící a zplynovací zónu. Výfukové páry ze sušící zóny jsou zahřívány v kotli na odpadní teplo a vráceny na rošt. Ve druhé fázi zpracování podstupuje odděleně syntézní plyn a pevný zbytek následnou úpravu. Pomocí termického plazmatu se syntézní plyn zahřívá na teplotu vyšší než 1200 °C, což má za následek rozklad složitých sacharidů. Toto je nezbytné pro použití syntézního plynu v plynové turbíně. Získáme tak čistý syntézní plyn. Pevný zbytek se poté roztaví v druhé plazmové komoře a odvádí se z procesu. [19]



Obr. č. 9: Schéma technologie Europlasma ke zplynování odpadu [19]

Plazmový hořák transformuje elektrickou energii na energii tepelnou, která může dosáhnout teploty až 5000 °C. Spalování s plazmovým hořákem umožňuje úplné zničení odpadu. Organické sloučeniny jsou kompletně převedeny na syntézní plyn a anorganické sloučeniny jsou transformovány do inertního skla, které může být dále zhodnoceno a prodáváno jako kamenivo nebo podklad pro stavbu silnic. [20]



Obr. č. 10: Plazmový hořák od firmy Europlasma [20]

4. 4. 2. 2 Stav vývoje

Komerční zařízení od společnosti C. H. O. Power se nachází ve městě Morcenx na jihozápadu Francie. Zařízení má výkon 11 MWe a zpracuje 55 000 tun komerčního a průmyslového odpadu a biomasy za rok. Což pokryje spotřebu zhruba 45 000 obyvatel. Biomasa je tvořena dřevní štěpkou z lesů v okolí Landes a přetříděný odpad je svážen ze sběren v této oblasti. V tomto zařízení je následně odpad znovu vytríděn a recyklován a zbytek zplynován ve zplynovacím reaktoru. [17]



Obr. č. 11: Zařízení CHO Power ve městě Morcenx ve Francii [17]

Ve fázi výstavby se nachází projekt C. H. O. Tiper na západě Francie v blízkosti města Tours. Instalovaný výkon je stejný jako u projektu Morcenx, tedy 11 MWe. Jako palivo zde bude využito zbytkového odpadu a biomasy z regionu (např. lepenky, dřeva, plastů, pilin...). Před vstupem do zplynovacího generátoru je palivo vytríděno a rozdrceno, pro získání homogenního paliva. Tato směs se zavádí do zplynovače. Výsledný plyn se zahřívá na vysokou teplotu tzv. rafinace, kvůli kompatibilitě s elektrickými generátory. Potom se ochladí a zfiltruje se. Výsledkem je syntézní plyn komerční kvality. Čistý plyn je potom používán především v plynových turbínách pro výrobu elektrické energie. Teplo z procesu se izoluje ve formě páry na výrobu další elektrické energie v parní turbíně. Odpadní teplo z celého zařízení se používá v suché peci. Instalovaný výkon 11 MWe odpovídá spotřebě cca 45 000 obyvatel. Spuštění zařízení je předběžně naplánováno na rok 2019. Celková investice byla předběžně stanovena na 45 milionů eur. [18]



Obr. č. 12: Grafický návrh C.H.O. Tiper [18]

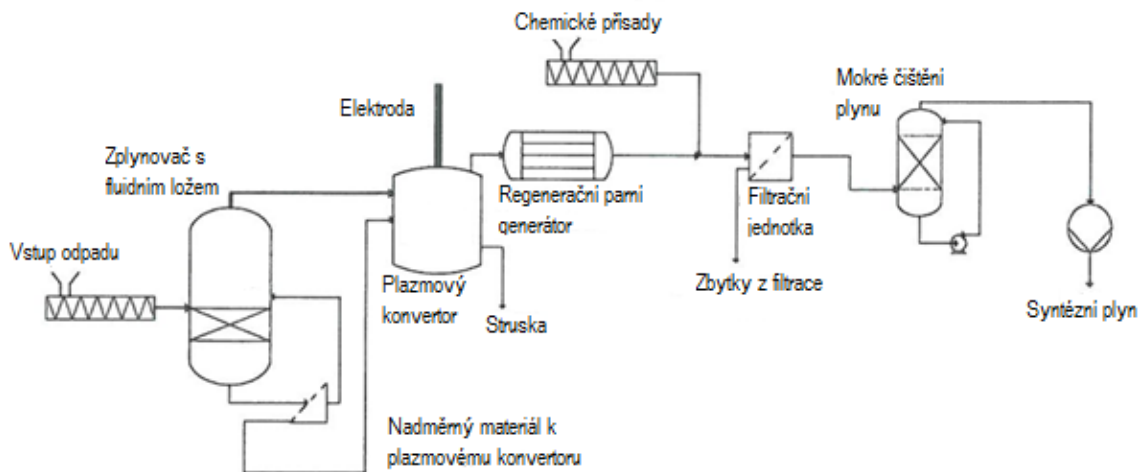
Ve Francii jsou dále naplánována další dvě obdobná zařízení a to C. H. O. Locminé s plánovaným spuštěním v roce 2020 a C. H. O. Brocéliande. Obě s investicí 48 milionů eur. [18]

4. 4. 3 Advanced Plasma Power (Tetronics)

Britská společnost Tetronics je zastoupena na trhu s plazmovými procesy k zeskelnatění nebezpečného odpadu jednoduché frakce. Od roku 2005 Tetronics nabízí technologii zplynování plazmy pod názvem Gasplasma prostřednictvím společnosti Advanced Plasma Power. Tento proces je určen pro zplynování směsného komunálního odpadu. Jedná se o dvoustupňový proces s běžnou zplynovací fází. Po zplynovací fázi následuje plazmová konverze použitá pro následné zpracování syntézního plynu, aby se roztrhly organické sloučeniny a dehty obsažené v plynu. [21]

4. 4. 3. 1 Technologie

Gasplasma proces je schematicky znázorněn na následujícím obrázku (Obr. č. 13). Palivo vyrobené z odpadu se převede působením zplynovacích činidel (páry a kyslíku) ve stacionární fluidní vrstvě při teplotách 750 až 850 ° C. Poměr vzduchu v procesu zplynování je 0,3. V navazujícím druhém zplynovacím stupni vytvořeném jako plazmový konvertor jsou komplexní organické sloučeniny a dehty rozloženy při teplotách vyšších než 5000 ° C. Plyn opouští konvertor při teplotě 1000 až 1200 ° C, poté se kvůli jeho vyčištění ochladí na 200 ° C. Syntézní plyn je čištěn pro odstranění prachu a kyselých plynů. Plazmový konvertor se podobá cyklonu. Velká část popílku z fluidního lože je tady oddělena a roztavena plazmou. Zbytek je vypouštěn ve spodní části fluidního lože a je rovněž veden do plazmového konvertoru pro následnou úpravu. [19]



Obr. č. 13. Schematicky znázorněný proces Gasplasma [19]

Čistý plyn může být použit buď v elektrárně nebo v plynovém motoru nebo za předpokladu dostatečného čištění v palivových člancích. Pilotní zařízení je vybaveno plynovým motorem. [19]

4. 4. 3. 2 Stav vývoje

Pilotní zařízení společnosti Advanced Plasma Power se nachází ve Velké Británii na okraji města Swindon. Toto zařízení je v provozu od roku 2008 a jeho kapacita je na úrovni 100 000 tun odpadu ročně. [19]

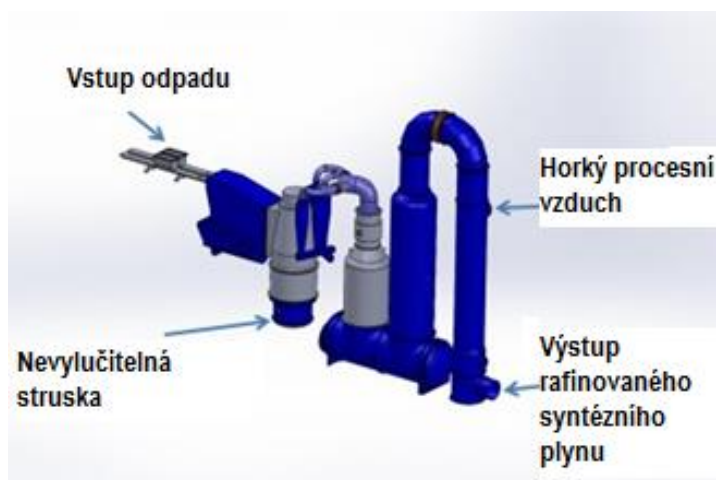
4. 4. 4 Plasco Energy (Phoenix Solutions Company)

Kanadská společnost Plasco Energy vyvinula dvoustupňový proces pro generování syntézního plynu z předupraveného tuhého komunálního odpadu. Tento proces se skládá z klasického zplynování odpadu v pevném loži s první plazmovou fází určenou k následnému zpracování syntézního plynu a s druhou fází pro následnou úpravu zbytků po zplynování. Uspořádání procesních kroků se podobá C. H. O. postupu, který je popsán výše. Plasco Energy spolupracuje s Phoenix Solutions Company (PSC), který je jedním z předních poskytovatelů tepelných plazmových systémů. [22]

4. 4. 4. 1 Technologie

Před použitím se musí komunální odpad stabilizovat. Jde zejména o oddělení inertního materiálu a drcení. Stabilizovaný materiál se přivádí do první zplynovací fáze. Jedná se o konverzní komoru se šikmou podlahou. Jako zplynovací médium se používá vzduch, který proudí skrz podlahu zdola. Abychom dostali potřebnou energii

pro zplynování, ohřívá se vzduch ve výměníku tepla, který je umístěný uvnitř syntetického plynového stabilizátoru. Z tohoto důvodu jsou procesní teploty vyšší než 800 °C. Ve druhém stupni se syntézní plyn a zbytek po zplynování oddělí pro následné zpracování. Použitím tepelné plazmy se plyn zahřeje na více než 1200 °C a tím se složité sacharidy obsažené v plynu rozloží. Pevné zbytky se roztaví ve druhé plazmové komoře a odvádí se z procesu. Organické sloučeniny z prvního kroku se přemění úplně. Minerální odpadní složky se roztaví a zeskelnatí. Čištění plynu je umístěné za plazmatickou fázi. Čištění zahrnuje odstranění prachu, odstraňování těžkých kovů, chlazení a konečné čištění. Vyčištěný syntézní plyn se používá k výrobě elektrické energie ve spalovacím motoru. [19]



Obr. č. 14: Technologie Plasco Energy [22]

4. 4. 4. 2 Stav vývoje

Demonstrační zařízení společnosti Plasco Energy se nazývá Plasco Trail Road. V roce 2006 se společnost Plasco Energy domluvilo s městem Ottawa na výstavbě tohoto malého zařízení, o velikosti zhruba 1,2 hektarů, v blízkosti stávající skládky. Toto zařízení mělo sloužit především jako demonstrační zařízení. Do provozu bylo zařízení uvedeno v roce 2008. V roce 2014 byla tato technologie uvedena na trh. Zařízení bylo projektováno na kapacitu 85 tun za den, ale po spuštění do provozu byla tato kapacita pouze zhruba 5 tun za den a i proto začalo v roce 2015 jeho odstavení z provozu. Další zařízení od této společnosti bylo provozováno ve španělském městě Castell Galli od roku 2003. [22]

4. 5 Vyhodnocení plazmových technologií pro zplynování komunálního odpadu

V současné době plazmovou technologií na zplynování komunálního odpadu nabízí výše zmíněné 4 společnosti.

Technologie společnosti Westinghouse se skládá z ocelového reaktoru se žáruvzdornou vyzdívkou, spodní část tohoto reaktoru je chlazená vodou. V tomto reaktoru se nachází přívod oksylichovadla (vzduchu) a plazmové hořáky, které jsou schopny generovat vysokou teplotu a tím rozložit organické látky na syntézní plyn. Ten je nutné po výstupu z reaktoru vyčistit. V procesu čištění probíhá kalení a drhnutí s hydroxidem sodným, dále jsou tu zařazeny elektrostatický odlučovač a filtr s aktivním uhlíkem. Anorganické látky se roztaví ve spodní části a vznikne tak struska o teplotě asi 1650 °C, který se vypouští ve dně reaktoru. Struska obsahuje inertní odpadní složky a kovy. Kovy jsou odděleny a inertní frakci je možné dále využít jako stavební materiál. Tato společnost má demonstrační zařízení v USA, 4 zařízení v komerčním provozu (dvě v Číně, v Indii a v Japonsku), další zařízení v Japonsku, které bylo ale kvůli nedostatku vstupních surovin odstaveno a ve zkušebním provozu respektive ve fázi výstavby dvě zařízení ve Velké Británii. Lze tedy předpokládat největší zkušenosti a progres této společnosti.

Společnost Europlasma nabízí zplynování tuhého komunálního odpadu probíhající v pevném loži na roštu. Tento rošt je rozdělen na sušící a zplynovací zónu. Ze zplynovací zóny plyn o teplotě 850 °C vstupuje do plazmového prostoru, kde je pomocí plazmových hořáků přeměněna elektrická energie na energii tepelnou, teplota přesahuje 1200 °C. Organické sloučeniny jsou převedeny na syntézní plyn, anorganické sloučeniny jsou transformovány do inertního skla. To lze dále využít jako kamenivo nebo podklad pro stavbu silnic. Společnost má v komerčním provozu zařízení Morcenx ve Francii, ve výstavbě se nachází zařízení Tiper ve Francii a v plánu jsou další dvě zařízení opět ve Francii. Lze tedy říct, že tato společnost s technologií na zplynování odpadu má vystavěna zařízení pouze v jedné zemi a nemá zkušenosti s výstavbou v zahraničí.

Technologie od společnosti Advanced Plasma Power (Tetronics) je založena na stacionární fluidní vrstvě s teplotou 750 – 850 °C, kdy je poměr vzduchu v procesu 0,3. Organické sloučeniny a dehty jsou rozloženy při teplotě vyšší než

5000 °C, výsledkem je syntézní plyn s teplotou 1000 – 1200 °C. Tento plyn je dále ochlazen na teplotu cca 200 °C, aby mohl být vyčištěn od prachu a kyselých plynů. Větší část popílku jde z fluidního lože do konvertoru, kde dojde k oddělení a roztavení plazmou. Zbytek, který je vypouštěn ve spodní části fluidního lože, jde opět do konvertoru, kde dojde k jeho úpravě. Pilotní zařízení od této společnosti se nachází ve Velké Británii.

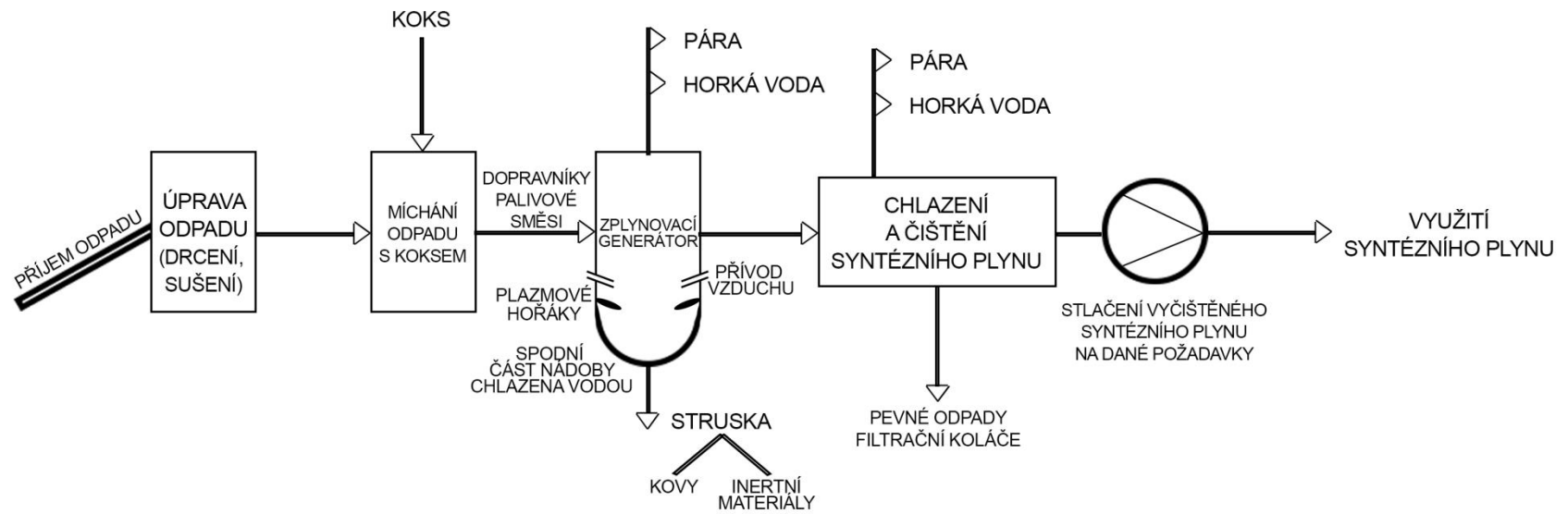
Čtvrtá společnost, Plasco Energy, má technologii založenou na dvou fázích. První fáze je konverzní komora se šikmou podlahou. Vzduch zde proudí zdola skrz podlahu. Uvnitř syntetického plynového stabilizátoru se nachází výměník, který ohřátím pomáhá dosáhnout potřebné energie pro zplynování (teplota je vyšší než 800 °C). Ve druhé fázi dochází k oddělení syntézního plynu a zbytku po zplynování. Syntézní plyn je dále zahříván na teplotu více než 1200 °C, kdy dojde k rozložení sacharidů. Čištění plynu zahrnuje odstranění prachu, těžkých kovů, chlazení a konečné čištění. Pevné zbytky jsou roztaveny a odvedeny z procesu. Malé demonstrační zařízení bylo vystaveno ve městě Ottawa, kvůli nízké kapacitě zpracovávaného odpadu však došlo v roce 2015 k odstavení z provozu. Další zařízení bylo vystaveno ve Španělsku.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem navrhuji jako nejvhodnější technologii, pro využití v Praze v Malešicích, technologii Westinghouse. Pro tuto technologii jsem se rozhodla zejména kvůli široké škále vystavených zařízení po světě a také kvůli funkční a odzkoušené technologii na zplynování komunálního odpadu.

4. 6 Návrh procesního schématu na zplynování komunálního odpadu

Pro vybranou technologii je na obrázku (Obr. č. 15) navrženo procesní schéma. Před samotným plazmovým zplynováním je důležitá úprava odpadu zahrnující zejména drcení, případně granulování pro lepší manipulaci a také vysušení. Po smíchání s koksem je možné tuto směs dopravovat do zplynovacího reaktoru. Pro dobré vysušení odpadu je možné využít teplo obražené v páře nebo v horké vodě vznikající v reaktoru a také teplo z chlazení syntézního plynu před vyčištěním. Toto teplo by mohlo být využito i pro externí dodávku tepla, ale takovéto využití sebou nese nemalé náklady na vybudování tepelné sítě. Zplynovací reaktor je speciální nádoba, která je obložena vysoce kvalitním materiálem odolným proti vysokým teplotám a abrazi. Tato nádoba v sobě zahrnuje plazmové hořáky, chladicí a kontrolní systém těchto hořáků, přívod vzduchu, hrdlo přivádějící odpad a systém na odvádění strusky. Zplynovací reaktor je

ve spodní části chlazen vodou. Z tohoto reaktoru vychází syntézní plyn o vysoké teplotě (zhruba 1250 °C), který musí být před samotným čištěním zchlazen. Ze samotného chlazení vyjde odpad v podobě filtračních koláčů a pevných odpadů. Po potřebném vyčištění se syntézní plyn stlačuje na dané požadavky a poté dále využívá. Využití syntézního plynu může být různé, např. spalování v plynovém kotli, použití v paroplynovém cyklu, v plynovém motoru apod.

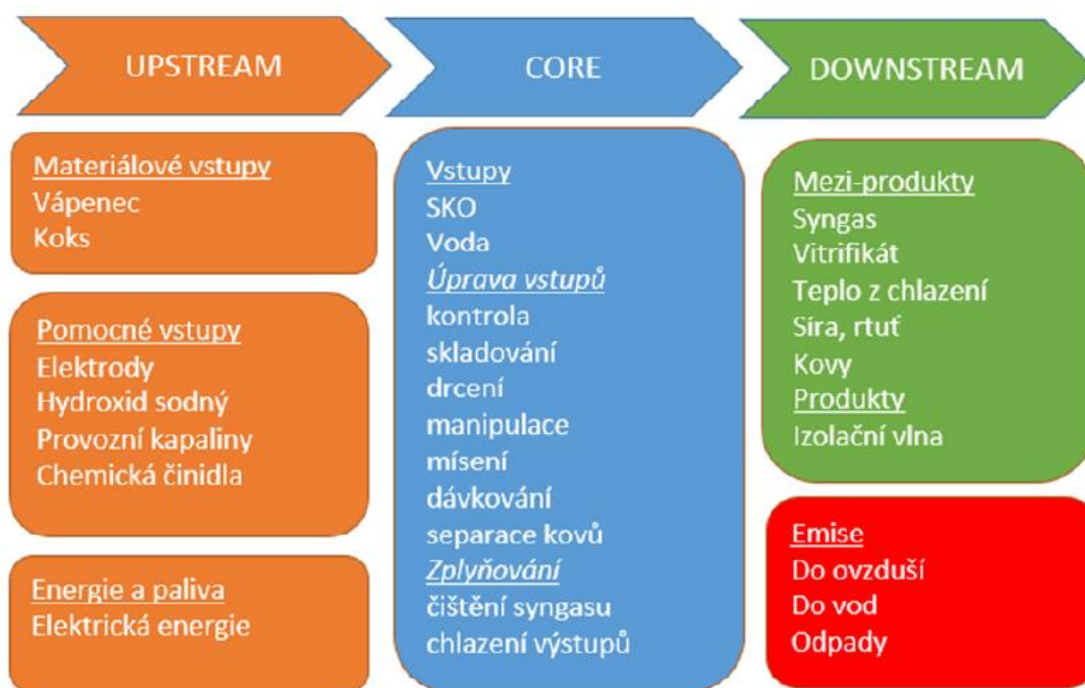


Obr. č. 15: Procesní schéma plazmové technologie na zplynování komunálního odpadu

5. SYNTÉZNÍ PLYN

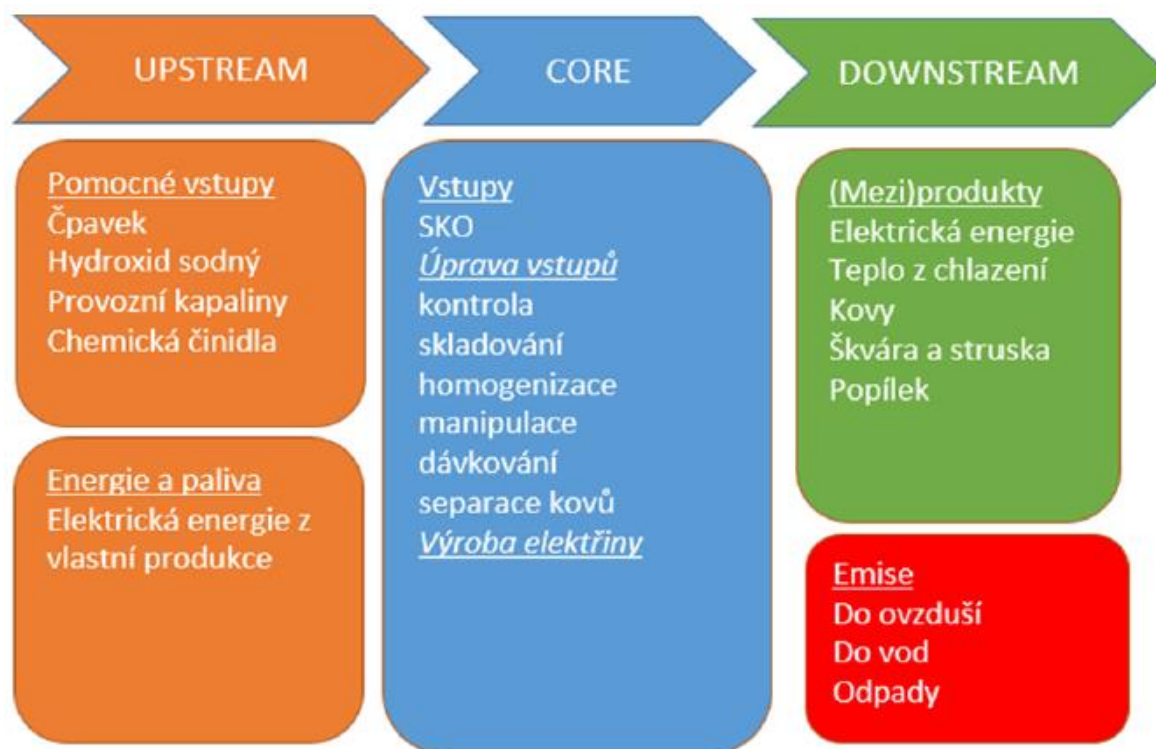
5.1 Složení syntézního plynu

Výstupem z plazmového zplynování je jako primární surovina syntézní plyn, který budeme dále energeticky využívat. K tomu abychom mohli rozhodnout o nejlepším způsobu využití tohoto syntézního plynu je potřeba znát jeho množství a detailní složení. Jednotlivé vstupy a výstupy je dobré vztahovat ke stanovené funkční jednotce. Protože hlavní funkcí posuzovaného produktu je využití směsného komunálního odpadu (SKO), funkční jednotka bude 1 tuna využitého SKO. Celý proces plazmového zplynování lze rozdělit na vstupy před procesem (upstream), samotný proces (core) a veškeré výstupy z procesu (downstream). Na následujícím obrázku (Obr. č. 16) jsou jednotlivé složky na vstupu i výstupu uvedeny.[23]



Obr. č. 16: Vstupy a výstupy při plazmovém zplynování směsného komunálního odpadu [23]

Pro porovnání jsou na obrázku č. 17 uvedeny vstupy a výstupy i pro stávající technologii spalování SKO v ZEVO.



Obr. č. 17: Vstupy a výstupu při spalování směsného komunálního odpadu [23]

Všechny vstupy do plazmového reaktoru jsou uvedeny v následující tabulce vztažené na funkční jednotku 1 t SKO. Jedná se o hmotnostně – energetickou bilanci, která bude dále využita pro výpočty nejlepší varianty využití syntézního plynu z procesu zplynování.

VSTUPY	
Materiály	
SKO	1000 kg
vápenec	153,2 kg
koks	42,73 kg
hydroxid sodný	6,3394 kg
mazací olej	0,042 kg
regulační olej	0,0077 kg
oxid uhličitý	0,0028 kg
činidlo	0,0088 kg
elektrody	0,0044 kg

Energie, paliva	
zemní plyn	0,9323 m ³
elektrina	436,0623 kWh
Voda	
chladicí (užitková) voda	94,095 kg

Tab. č. 4: Vstupy do procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztahované na 1 t SKO [23]

Jako pomocné složky jsou zde koks a vápenec. Základní podmínkou pro zajištění stabilního provozu plazmového reaktoru jsou dodávky koksu do nádoby reaktoru, který působí jako katalyzátor a tvoří lože pro odpad. Koks také poskytuje širší plochu pro přenos tepla vně reaktoru, což zvyšuje účinky tepelného štěpení. Samospékáním poskytuje koks propustnou vrstvu pro anorganický odpad, přes kterou proniká roztavená struska ven z nádoby reaktoru. Vápenec je přidáván do odpadu pro snížení teploty tavení strusky a pro stabilizaci chemických vlastností sklovité strusky.

Na výstupu z procesu plazmového zplynování je primární složkou vyčištěný syntézní plyn a další sekundární složky. Intenzita čištění syntézního plynu závisí na jeho dalším využití. Například při spalování syntézního plynu v plynovém kotli nevyžaduje plyn až takovou čistotu jako při použití v plynovém motoru. Hmotnostně - energetická bilance výstupů je opět uvedena v následující tabulce (Tab. č. 5), kde jsou detailněji rozepsány také hodnoty emisí do ovzduší a vod.

VÝSTUPY	
syngas (neodvodněný)	1413,68 m ³
skelná vlna z vitrifikátu	316,85 kg
pára – teplo	1,2038 GJ
horká voda – teplo	0,4619 GJ
síra	3,0267 kg
rtuť	0,7567 kg
kovy	24,4832 kg
Odpady	
pevné odpady z čištění odpadních plynů	19,8798 kg
filtrační koláče z čištění odpadních plynů	19,8798 kg

Emise do ovzduší	
tuhé znečišťující látky (TZL)	0,017032293 kg
dioxiny a furany (PCDD/F)	3,64978E-12 kg
oxid siřičitý (SO₂)	0,012165924 kg
oxid dusíku (NO_x)	0,300498316 kg
chlorovodík (HCl)	0,037714364 kg
oxid uhelnatý (CO)	0,096110798 kg
rtuť	3,64978E-06 kg
Emise do vod	
NL	0,004307 kg
rtuť	0,000004 kg
kadmium	0,000007 kg
thalium	0,000007 kg
arsen	0,000022 kg
olovo	0,000029 kg
chrom	0,000072 kg
měď	0,000072 kg

Tab. č. 5: Výstupy z procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztažené na 1 t SKO [23]

Všechny vstupy a výstupy byly vztaženy na 1 tunu SKO, proto je třeba dále stanovit kapacitu, na kterou bude zařízení na zplynování SKO navrženo. V celé Praze je vyprodukováno 1000 tun SKO denně. Veškerý odpad však nelze využít a před samotným zplynováním je nutná jeho předúprava. Dále je třeba odpad zpracovávat na vícero zařízeních i pro případ poruchy či odstávky. Proto na jednu jednotku bylo stanoveno zpracování $\frac{1}{4}$ z celkového množství SKO, to znamená, že navrhovaná kapacita jednoho zařízení je 250 tun SKO za den.

Dále je uvedena tabulka hmotnostně - energetických bilancí pro nově stanovené množství SKO.

VSTUPY	
Materiály	
SKO	250 000 kg
vápenec	38 300 kg
koks	10 682,5 kg
hydroxid sodný	1 584,85 kg
mazací olej	10,5 kg
regulační olej	1,925 kg
oxid uhličitý	0,7 kg
činidlo	2,2 kg
elektrody	1,1 kg
Energie, paliva	
zemní plyn	233,075 m ³
elektrina	109 015,575 kWh
Voda	
chladicí (užitková) voda	23 523,75 kg

Tab. č. 6: Vstupy do procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztažené na 250 t SKO

Výstupy z plazmatického zplynování 250 tun SKO tedy budou následující.

VÝSTUPY	
syngas (neodvodněný)	353 420 m ³
skelná vlna z vitrifikátu	79 212,5 kg
pára – teplo	300,95 GJ
horká voda – teplo	115,475 GJ
síra	756,675 kg
rtuť	189,175 kg
kovy	6 120,8 kg
Odpady	
pevné odpady z čištění odpadních plynů	4969,95 kg
filtrační koláče z čištění odpadních plynů	4969,95 kg

Emise do ovzduší	
tuhé znečišťující látky (TZL)	4,25807325 kg
dioxiny a furany (PCDD/F)	9,12445E-10 kg
oxid siřičitý (SO₂)	3,041481 kg
oxid dusíku (NO_x)	75,124579 kg
chlorovodík (HCl)	9,428591 kg
oxid uhelnatý (CO)	24,0276995 kg
rtuť	3,64978E-06 kg
Emise do vod	
NL	0,004307 kg
rtuť	0,000004 kg
kadmium	0,000007 kg
thalium	0,000007 kg
arsen	0,000022 kg
olovo	0,000029 kg
chrom	0,000072 kg
měď	0,000072 kg

Tab. č. 7: Výstupy z procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztažené na 250 t SKO

Dále je potřebné stanovit procentuální složení syntézního plynu. V tabulce (Tab č. 8) je uvedeno procentuální složení syntézního plynu ze zplynování odpadu. U tohoto zařízení se však předpokládá zplynování převážně průmyslového odpadu, zejména plastových obalů, proto je u výsledného syntézního plynu větší podíl např. chlóru. Veškerá data k tomuto zařízení byla získána od vedoucího této diplomové práce.

Zařízení na plazmatické zplynování převážně průmyslového odpadu bude zpracovávat palivo následujícího složení.

LÁTKA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% HMOT]
Popel	10,70
H	4,20
C	34,83
S	3,23
N	0,73
Cl	0,31

O₂	19,01
H₂O	26,99
CELKEM	100,00

Tab. č. 8: Procentuální složení zpracovávaného odpadu

Ze zplynovacího reaktoru poté vychází syntézní plyn následujícího složení.

SLOUČENINA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% HMOT]
CO	53,01
CO₂	8,40
H₂	3,29
N₂	25,37
H₂S	1,87
H₂O	7,73
COS	0,18
HCl	0,15
CELKEM	100,00

Tab. č. 9: Procentuální složení výsledného syntézního plynu

Plyn tohoto složení má stanovenou výhřevnost 8,125 MJ/kg. Tento plyn je však třeba ještě vyčistit. Účinnost čištění je uvedena v následující tabulce.

LÁTKA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% HMOT]
H₂S	98
HCl	99
H₂O	80
COS	99,9

Tab. č. 10: Dosažitelná účinnost při čištění syntézního plynu

Za technologií čištění vychází syntézní plyn následujícího složení.

SLOUČENINA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% HMOT]
CO	58,23
CO₂	9,23
H₂	3,61
N₂	27,87
H₂S	0,04
H₂O	1,02

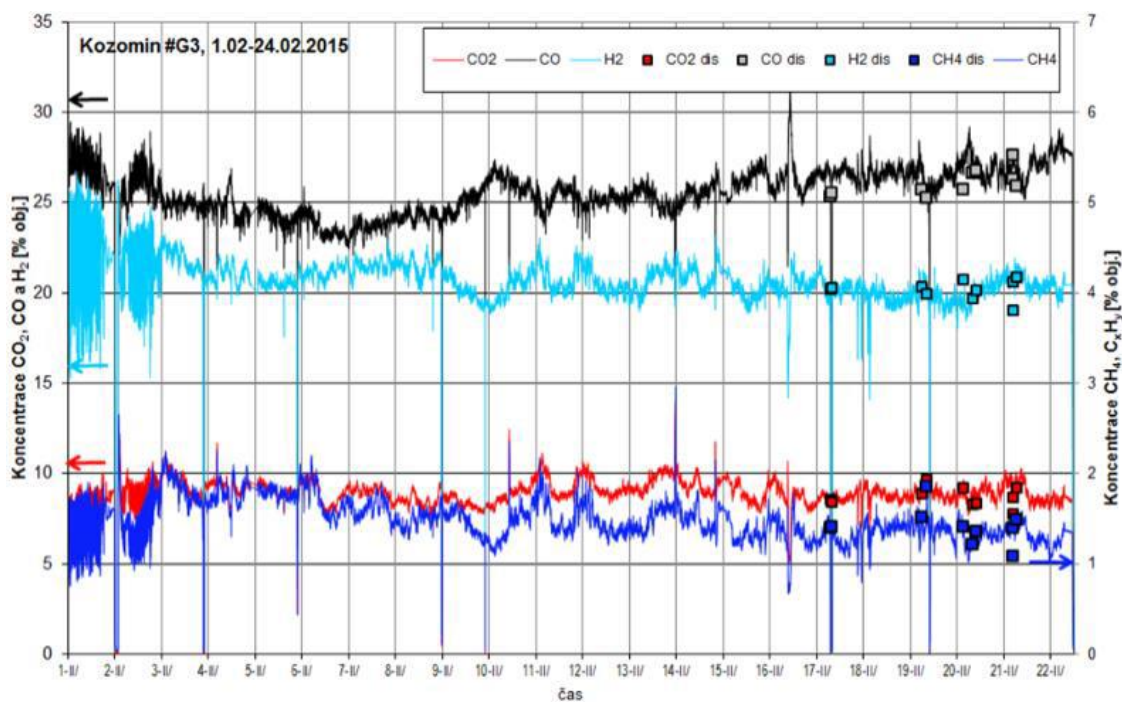
COS	0,00
HCl	0,00
CELKEM	100,00

Tab. č. 11: Procentuální složení vyčištěného syntézního plynu

Výhřevnost takto vyčištěného syntézního plynu je 8,913 MJ/kg.

Protože předchozí tabulka uvádí složení syntézního plynu při zplynování průmyslového odpadu s převahou plastových obalů, které je odlišné od složení syntézního plynu ze zplynování SKO, bude nutné složení syntézního plynu ještě upravit.

Jako další příklad tu máme složení syntézního plynu ze zplynování biomasy. Lze předpokládat, že ve SKO se bude nacházet i bioodpad. Na následujícím obrázku jsou uvedena data naměřená ze zplynování biomasy, obsahující procentuální složení výsledného syntézního plynu.



Obr. č. 18: Záznam vybraných složek plynu (analyzátor ABB) při provozu GP750 – G3 na jednotce v Kozomině [24]

Z grafu lze určit následující hodnoty jednotlivých složek plynu:

SLOUČENINA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% OBJ]
CO	26
CO2	10
H2	20
CH4	1,6
N2	42,4
CELKEM	100

Tab. č. 12: Procentuální složení plynu ze zplynování biomasy na jednotce v Kozomině

Zbývající část do 100 % tvoří dusík (N₂).

Tato data jsou uvedena v objemových procentech, proto pro porovnávání s daty ze zplynování průmyslového odpadu bude nutné počítat v obou případech s objemovými procenty, tzn. přepočítat data ze zplynování průmyslového odpadu.

Přepočet se provádí pomocí hustot jednotlivých složek při normálních podmínkách, tzn. při tlaku $p = 101\,325$ Pa a teplotě $T = 0$ °C (273,15 K) s využitím stavové rovnice.

$$p \cdot v = n \cdot R \cdot T \quad (5.1)$$

Kde R je univerzální plynová konstanta, jejíž hodnota je $R = 8,314$ J/K·mol a n je látkové množství a vypočítá se ze vztahu:

$$n = \frac{m}{Mm} \quad (5.2)$$

Kde Mm je molární hmotnost pro jednotlivé prvky a sloučeniny.

Jakmile budeme znát tyto hustoty, musíme vypočítat objem jednotlivých složek v plynu dle vztahu:

$$v_i = \frac{m_i}{\rho_i} \quad (5.3)$$

Kde dolní index i značí jednotlivé složky.

Součtem všech objemů složek směsi v plynu v_i získáme celkový objem směsi V :

$$V = \sum_{i=1}^n v_i \quad (5.4)$$

V následující tabulce (Tab. č. 13) jsou uvedeny hodnoty hustot, molárních hmotností a objemů pro jednotlivé složky syntézního plynu ze zplynování průmyslového odpadu.

SLOUČENINA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% HMOT]	MOLÁRNÍ HMOTNOST [g/mol]	HUSTOTA [kg/m ³]	OBJEM [m ³]
CO	58,23	28,010	1,250	0,466
CO ₂	9,23	44,010	1,963	0,047
H ₂	3,61	2,016	0,090	0,401
N ₂	28,87	28,012	1,250	0,223
H ₂ S	0,04	34,081	1,521	0,0003
H ₂ O	1,02	18,015	0,804	0,013
CELKEM	100			V = 1,150

Tab. č. 13: Hodnoty potřebných veličin pro jednotlivé složky syntézního plynu ze zplynování průmyslového odpadu

Objemový podíl pak získáme z následujícího vztahu.

$$\% \text{ obj.} = \frac{v_i}{V} \quad (5.5)$$

SLOUČENINA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% OBJ]
CO	40,51
CO ₂	4,09
H ₂	34,89
N ₂	19,39
H ₂ S	0,02
H ₂ O	1,10
CELKEM	100

Tab. č. 14: Přepočítané hodnoty ze zplynování průmyslového odpadu

Vezmeme-li tabulku výsledného syntézního plynu ze zplynování průmyslového odpadu s převahou plastových obalů a tabulku výsledného syntézního plynu ze zplynování biomasy a uděláme aritmetický průměr z hodnot v tabulkách, dostaneme konečné složení syntézního plynu, které se blíží složení syntézního plynu ze zplynování

SKO. Toto výsledné složení syntézního plynu bude dále využito pro výpočty na využití tohoto plynu.

SLOUČENINA	PROCENTUÁLNÍ MNOŽSTVÍ [% OBJ]
CO	33,25
CO ₂	7,04
H ₂	27,45
N ₂	30,89
H ₂ S	0,01
H ₂ O	0,55
CH ₄	0,80
CELKEM	100

Tab. č. 15: Výsledné složení syntézního plynu z SKO

Dále bude k výpočtům třeba určit výhřevnost syntézního plynu tohoto složení, k tomu budeme potřebovat výhřevnosti jednotlivých složek.

SLOUČENINA	VÝHŘEVNOST (MJ/m ³)
CO	12,63
CO ₂	0
H ₂	10,783
N ₂	0
H ₂ S	9,865
H ₂ O	0
CH ₄	35,882

Tab. č. 16: Výhřevnosti jednotlivých složek syntézního plynu

Výhřevnost celé směsi se poté stanoví dle následujícího vztahu:

$$Q_i = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{ii} \cdot obj. \%_i}{100} \quad (5.6)$$

Po dosazení příslušných hodnot do vztahu (5.6) dostaneme výhřevnost syntézního plynu ze zplynování směsného komunálního odpadu $Q_i = 7,448 \text{ MJ} / \text{m}^3$.

5.2 Hmotnostní a energetická bilance plazmového zplynování

Abychom určili účinnost zplynění je potřeba stanovit hmotnostní a energetickou bilanci.

Hmotnostní bilance	
VSTUPY	
SKO	1000 kg
vápenec	153,2kg
koks	42,73 kg
chladící (užitková) voda	94,095 kg
VÝSTUPY	
syngas	1413,68 m ³
skelná vlna z vitrifikátu	316,85 kg
síra	3,0267 kg
rtuť	0,7567 kg
kovy	24,4832 kg

Tab. č. 17: Hmotnostní bilance pro plazmové zplynování SKO [23]

Energetická bilance	
VSTUPY	
SKO	1000 kg
koks	42,73 kg
zemní plyn	0,9323 m ³
elektrina	436,0623 kWh
VÝSTUPY	
syngas	1413,68 m ³
pára - teplo	1,2038 GJ
horká voda - teplo	0,4619 GJ

Tab. č. 18: Energetická bilance pro plazmové zplynování SKO [23]

Nyní je potřeba stanovit výhřevnosti jednotlivých složek a následně množství tepla v jednotlivých složkách dle vztahu:

$$Q = Q_i \cdot m \quad (5.7)$$

Na vstupu máme následující složky, které nám dávají teplo. U elektriny je nutné provést přepočítání z kWh na MJ (1 kWh je 3,6 MJ).

VSTUPY		
SLOŽKA	VÝHŘEVNOST	MNOŽSTVÍ TEPLA
SKO	9,8 MJ/kg	9 800,00 MJ
Koks	27,49 MJ/kg	1 174,65 MJ
Zemní plyn	36 MJ/m ³	33,56 MJ
Elektřina		1 569,82 MJ

Tab. č. 19: Výhřevnosti a množství tepla na vstupu

Na výstupu je nejdůležitější složkou syntézní plyn. Vedle něj lze ale využít i teplo v páře a horké vodě.

VÝSTUPY		
SLOŽKA	VÝHŘEVNOST	MNOŽSTVÍ TEPLA
Syngas	7,448 MJ/m ³	10 521,1 MJ
Pára – teplo		1 203,8 MJ
Horká voda - teplo		461,9 MJ

Tab. č. 20: Výhřevnosti a množství tepla na výstupu

Ze stanovených množství tepla na vstupu a výstupu je možné určit účinnost zplynění.

$$\eta_{zplynění} = \frac{\sum Q_{výstup}}{\sum Q_{vstup}} \quad (5.8)$$

Po dosazení do rovnice (5.8) dostaneme následující vztah:

$$\eta_{zplynění} = \frac{Q_{syngas} + Q_{pára} + Q_{horká\ voda}}{Q_{SKO} + Q_{koks} + Q_{zemní\ plyn} + Q_{elektřina}} = 0,97 \quad (5.9)$$

Účinnost zplynění je tedy 97 %. Ztráty v tuhých zbytcích jsou okolo 1 % a ztráty sdílením tepla do okolí okolo 2 %.

Dílčí účinnost zplynění, uvažujeme-li na výstupu pouze syntézní plyn je poté:

$$\eta_{zplynění-dílčí} = \frac{Q_{syngas}}{Q_{SKO} + Q_{koks} + Q_{zemní\ plyn} + Q_{elektřina}} = 0,84 \quad (5.10)$$

6. VYUŽITÍ SYNTÉZNÍHO PLYNU

Výsledný syntézní plyn můžeme využít několika způsoby. V této práci budeme porovnávat 3 varianty využití:

Varianta 1: spálení syntézního plynu v plynovém kotli s výrobou elektřiny na kondenzační turbíně.

Varianta 2: spálení syntézního plynu v plynovém kotli s výrobou elektřiny a tepla s použitím protitlaké turbíny.

Varianta 3: využití syntézního plynu v oběhu s plynovou turbínou a kotlem na odpadní teplo.

Všechny 3 varianty byly odsimulovány v programu Cycle Tempo 5.0. Tento výpočetní program slouží k návrhu, optimalizaci či analýze termodynamických cyklů zejména v oblasti energetiky. Původně se však jednalo o univerzitní software pro nekomerční použití. [27]

Kromě těchto variant využití syntézního plynu existuje řada dalších, jmenovitě například využití tohoto plynu v paroplynovém zařízení, v plynovém motoru apod.

V první řadě bude nutné stanovit si příkon přiváděný v syntézním plynu. Z tabulky (Tab. č. 7) víme, že za den zpracujeme na jedné lince 250 t SKO, ze kterého získáme $V = 353\,420\text{ m}^3$ vyčištěného syntézního plynu. Příkon tedy stanovíme dle vztahu

$$P_i = \frac{V \cdot Q_i}{24 \cdot 3600} \quad (6.1)$$

Po dosazení dostaneme příkon $P_i = 30,465\text{ MW}$.

6.1 Varianta 1: oběh s kondenzační turbínou

Při spalování syntézního plynu v plynovém kotli budeme uvažovat spojení dvou linek do jednoho bloku, to znamená, že ze čtyř linek budeme mít dva bloky s příkonem v palivu o velikosti 60,93 MW. Veškeré volené hodnoty byly konzultovány s vedoucím této diplomové práce. Syntézní plyn je spalován v plynovém kotli, který má účinnost 94 %. Z tohoto kotle jde pára přes přehřívák a ventil, který určuje hmotnostní tok páry a v tomto případě má velikost $22,426\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, do parní turbíny Siemens SST – 400, která má následující parametry.

Výkon	až do 65 MW
Otáčky turbíny	3000 až 8000 min ⁻¹
Admisní tlak	až 140 bar
Admisní teplota	až 540 °C
Typické rozměry	délka: 18 m / šířka: 8,5 m / Výška: 5,5 m

Tab. č. 21: Parametry parní turbíny Siemens SST - 400 [25]



Obr. č. 19: Parní turbína Siemens SST – 400 [25]

Z kotle do turbíny nám tedy vstupuje pára o teplotě 540 °C a tlaku 140 barů. Turbína má termodynamickou účinnost 85 % a mechanickou účinnost 98 %. Generátor, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou, pracuje s účinností 99 %. Účinnost napájecích čerpadel v celém oběhu je 70 %. Pro tento oběh byl zvolen počet regeneračních ohříváku $z = 5$, to jest 2 vysokotlaké ohříváky a 3 nízkotlaké ohříváky. Mezi nízkotlaké ohříváky patří také napájecí nádrž. Teplota vody v kondenzátoru t_{kon} se určí ze vztahu:

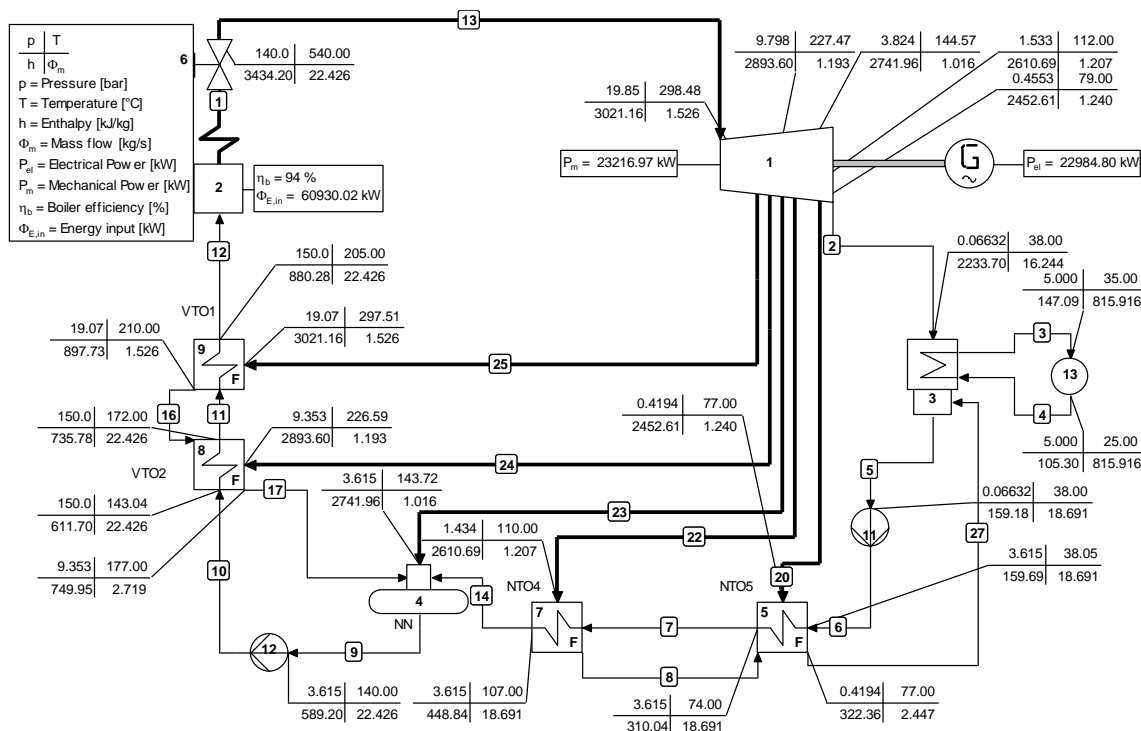
$$t_{kon} = t_{v1} + \Delta t_v + \Delta t_{kon} = 25 + 10 + 3 = 38 \text{ °C} \quad (6.2)$$

Kde t_{v1} je teplota vody na vstupu do oběhu, Δt_v představuje ohřátí chladicí vody a Δt_{kon} je tepelný spád v kondenzátoru. Z tabulek vody a vodní páry na mezi sytosti zjistíme hodnotu tlaku v kondenzátoru $p_{kon} = f(t_{kon}) = 6,63237 \text{ kPa}$. [28]

Teplota vody v napájecí nádrži byla zvolena $t_{NN} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, tak aby ohřátí v každém ohříváku bylo cca $33 \text{ }^\circ\text{C}$. Tlak v napájecí nádrži je tedy $p_{NN} = f(t_{NN}) = 3,615 \text{ bar}$. [28] Teplotní spád mezi odběrovou párou a vodou na vysokotlakých ohřívácích $\Delta t_{VTO} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, na nízkotlakých ohřívácích $\Delta t_{NTO} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Mezi teplotou odběrové páry t_o a jejím kondenzátem t_k je teplotní rozdíl $\Delta t_o = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pro krytí tlakových ztrát v potrubí. V následující tabulce (Tab. č. 22) jsou uvedeny hodnoty teplot a tlaků pro jednotlivé ohříváky.

	$t_{out} [^\circ\text{C}]$	$t_k [^\circ\text{C}]$	$p_k [\text{bar}]$	$\Delta p [\text{bar}]$
		$t_o [^\circ\text{C}]$	$p_o [\text{bar}]$	
VTO1	205	210	19,0739	0,7744
		212	19,8483	
VTO2	172	177	9,3531	0,4447
		179	9,7978	
NN	140	140	3,6150	0,2093
		142	3,8243	
NTO4	107	110	1,4338	0,0990
		112	1,5328	
NTO5	74	77	0,4194	0,0359
		79	0,4553	

Tab. č. 22: Hodnoty teplot a tlaků pro jednotlivé regenerační ohříváky u varianty 1



Obr. č. 20: Oběh s kondenzační turbínou vytvořený v programu Cycle Tempo

Schéma tohoto oběhu (Obr. č. 20) je ve větším rozlišení uveden v Příloze č. 1.

V tomto oběhu vyrábíme pouze elektrickou energii, elektrický výkon je $P_{el} = 22\,984,8\text{ kW}$.

P_{el}	22 984,8 kW	η výroby el. energie	37,72 %
P	22 984,8 kW	η oběhu - čistá	36,82 %

Tab. č. 23: Výsledky varianty 1

V čisté účinnosti oběhu je zahrnuta vlastní spotřeba napájecích čerpadel, proto je čistá účinnost oproti hrubé účinnosti zhruba o procento nižší.

6.2 Varianta 2: oběh s protitlakou turbínou

U druhé varianty, která představuje parní oběh s protitlakou turbínou, uvažujeme taktěž dva bloky s příkonem v palivu o velikosti 60,93 MW. Účinnost kotle je taktěž 94 %. I v této variantě využijeme turbínu Siemens SST – 400, která má maximální admisní teplotu 540 °C a admisní tlak 140 barů. Před samotnou parní turbínou se opět nachází ventil určující hmotnostní tok páry do turbíny, tento hmotnostní tok má velikost 21,432 kg·s⁻¹. Parní turbína má termodynamickou účinnost 85 % a mechanickou účinnost 98 %. Turbína je hřídelí spojena s generátorem, který má účinnost 97 %. Z turbíny vystupuje pára do kondenzátoru, který je spojen se spotřebičem, a z něj jde

	$t_{out} [^{\circ}C]$	$t_k [^{\circ}C]$	$p_k [bar]$	$\Delta p [bar]$
		$t_o [^{\circ}C]$	$p_o [bar]$	
VTO1	180	185	11,2327	0,5132
		187	11,7459	
NN	150	150	4,7610	0,2608
		152	5,0218	
NTO3	120	123	2,1829	0,1393
		125	2,3222	

Tab. č. 24: Hodnoty teplot a tlaků pro jednotlivé regenerační ohříváky u varianty 2

Elektrický výkon tohoto oběhu je $P_{el} = 18\,774,42$ kW a tepelný výkon $P_{tep} = 38\,073,18$ kW.

P_{el}	18 774,42 kW	η výroby el. energie	30,81 %
P_{tep}	38 073,18 kW	η výroby tepel. energie	62,49 %
P	56 847,60 kW	η oběhu - hrubá	93,30 %
		η oběhu - čistá	92,33 %

Tab. č. 25: Výsledky varianty 2

I u této varianty je čistá účinnost vlivem vlastní spotřeby napájecích čerpadel zhruba o 1 % nižší než hrubá účinnost.

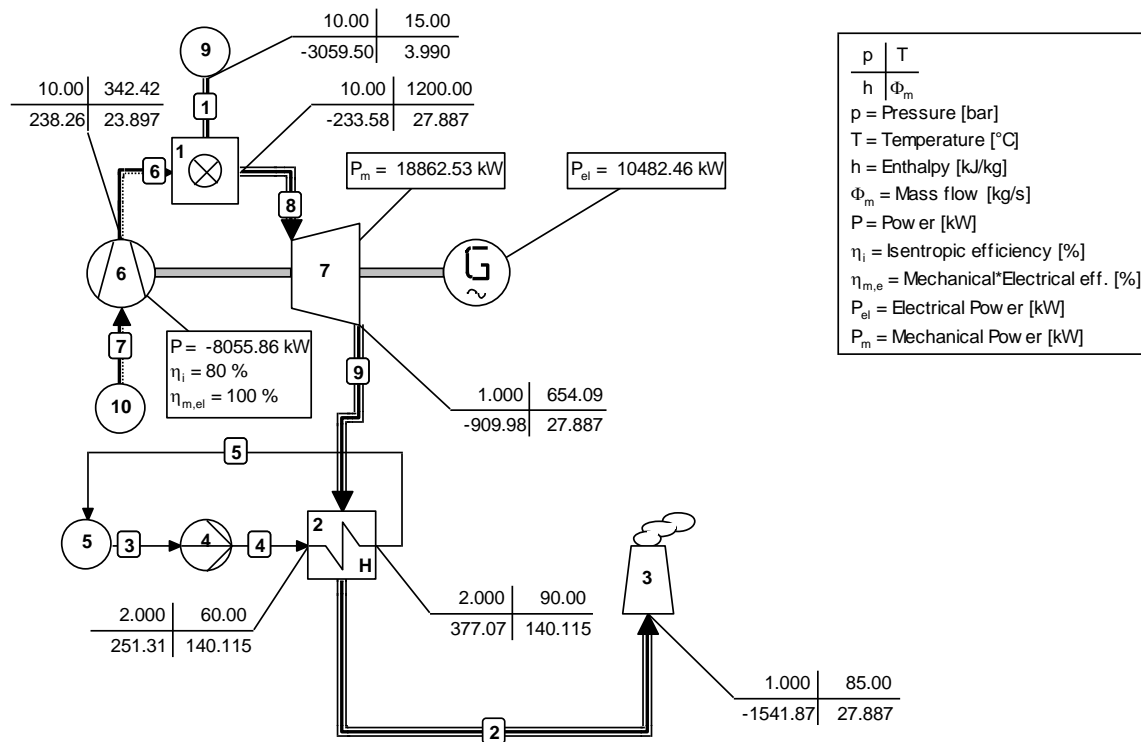
6.3 Varianta 3: oběh s plynovou turbínou

Třetí uvažovaná varianta představuje oběh s plynovou turbínou. U této varianty budeme uvažovat 4 samostatné jednotky, každá o příkonu 30,465 MW. Syntézní plyn daného složení je přiveden ze zdroje do spalovací komory s výstupní teplotou plynu 15 °C a tlakem 10 barů. Hmotnostní tok syntézního plynu je cca 3,99 kg·s⁻¹. Tento hmotnostní tok je určen z hustoty syntézního plynu. Za normálních podmínek stačí vyjít ze vztahu, že 1 mol plynu zaujímá objem 22,4 litrů a hustotu vypočítat ze vztahu:

$$\rho = \frac{M}{22,4} \quad (6.3)$$

Ze známého složení plynu a známých molárních hmotností můžeme součinem určit následné procentuální molární hmotnosti. A ty pak jednoduše sečíst. Součet představuje poté hodnotu $M = 21,85$ g/mol. Hustota tohoto plynu je tedy $\rho = 0,975$ kg/m³.

Ve spalovací komoře se syntézní plyn mísí se vzduchem, který je před vstupem do spalovací komory stlačován v kompresoru. Ze spalovací komory vystupují spaliny o teplotě 1200 °C a tlaku 10 barů. Plynová turbína má termodynamickou účinnost 90 % a generátor 97 %. Spaliny vystupující z turbíny nám ohřívají vodu v kotli na odpadní teplo. Z kotle na odpadní teplo jde voda o teplotě 90 °C, zpátečka do kotle má teplotu 60 °C. Účinnost napájecího čerpadla v této větvi je 70 %, tlak v tomto okruhu má velikost 2 bary. Do komína odchází spaliny o teplotě 85 °C a tlaku 1 bar. V generátoru je vyráběna elektrická energie, kotel na odpadní teplo nám poskytuje energii ve formě tepla na vytápění nebo ohřev teplé užitkové vody.



Obr. č. 22: Oběh s plynovou turbínou vytvořený v programu Cycle Tempo

Také toto zapojení (Obr. č. 22) je uvedeno v Příloze č. 3.

Elektrický výkon je $P_{el} = 10\,482,46$ kW.

Tepelný výkon lze spočítat ze vztahu:

$$P_{tep} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t \quad (6.4)$$

Kde \dot{m} je hmotnostní tok v této větvi a dle výpočtů ze Cycle Tempa je jeho velikost $140,12 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, c je měrná tepelná kapacita vody, což představuje množství tepla,

potřebného k ohřátí 1 kg vody o 1 teplotní stupeň, která má hodnotu $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a Δt je teplotní rozdíl mezi konečnou a počáteční teplotou vody, v našem případě $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ a $t_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Po dosazení dostaneme:

$$P_{tep} = 140,12 \cdot 4,18 \cdot (90 - 60) = 17\,571,048 \text{ kW} \quad (6.5)$$

P_{el}	10 482,46 kW	η výroby el. energie	34,41 %
P_{tep}	17 571,048 kW	η výroby tepel. energie	57,68 %
P	28 053,508 kW	η oběhu -hrubá	92,08 %
		η oběhu - čistá	91,59 %

Tab. č. 26: Výsledky varianty 3

6.4 Vlastní spotřeba na provoz zplynovacího generátoru

Vlastní spotřeba elektrické energie pro celé zařízení při plazmatickém zplynování je ve většině případů značná. Pro příklad lze uvést vlastní spotřebu již provozovaného zařízení Tees Valley Renewable Energy Facility I, nacházející se ve Velké Británii, která je dle slov kanadského zástupce z firmy Alter NRG na úrovni cca 28 %. Oproti tomu vlastní spotřeba elektriny uvažovaného zařízení na plazmatické zplynování odpadu v Chotíkově, kde je navrhovaná kapacita 60 tisíc tun odpadu za rok, je dle studie proveditelnosti 38,97 %. [26]

Při určení vlastní spotřeby je potřeba převést elektrický výkon z kW na kWh. U tohoto zařízení uvažujeme nepřetržitý 24 hodinový provoz. Proto po přenásobení jednotlivých elektrických výkonů dostaneme následující hodnoty.

	P_{el} [kW]	Výroba el. energie na jedné jednotce [kWh/den]	Počet jednotek [-]	Výroba el. energie na všech jednotkách [kWh/den]
Varianta 1	22 984,80	551 635,20	2	1 103 270,40
Varianta 2	18 774,42	450 586,08	2	901 172,16
Varianta 3	10 482,46	251 579,04	4	1 006 316,16

Tab. č. 27: Výroba elektrické energie u jednotlivých variant

Na vstupu do zplynovacího generátoru máme z energetické bilance (Tab. č. 18) 436,0623 kWh elektrické energie na 1 tunu SKO. Za den zpracujeme 250 tun SKO, tzn., že potřebujeme 109 015,575 kWh elektřiny za den. Vlastní spotřeba elektrické energie pro zplynovací reaktor je pro jednotlivé varianty:

	Výroba el. energie na všech jednotkách [kWh/den]	Vlastní spotřeba zplynovacího generátoru [kWh/den]	Vlastní spotřeba oběhů [kWh/den]	Celková vlastní spotřeba [kWh/den]
Varianta 1	1 103 270,40	109 015,575	26 324,05	135 339,63
Varianta 2	901 172,16	109 015,575	28 371,86	137 387,44
Varianta 3	1 006 316,16	109 015,575	14 329,99	123 345,57

Tab. č. 28: Vlastní spotřeba el. energie u jednotlivých variant

6.5 Porovnání jednotlivých variant

Při porovnávání jednotlivých variant bude důležité hledisko, podle kterého budeme varianty posuzovat.

6.5.1 Porovnání z hlediska vlastností navrhnutých oběhů

- Porovnání z hlediska výroby elektrické energie z oběhu

	Výroba el. energie [kWh/den]
Varianta 1	1 103 270,40
Varianta 2	901 172,16
Varianta 3	1 006 316,16

Tab. č. 29: Výroba elektrické energie v jednotlivých obězích

- Porovnání z hlediska výroby tepla z oběhu

	Výroba tepla [kWh/den]	Výroba tepla [GJ/den]
Varianta 1	-	-
Varianta 2	1 827 512,64	6 579,05
Varianta 3	1 686 820,61	6 072,55

Tab. č. 30: Výroba tepla v jednotlivých obězích

- Porovnání z hlediska účinnosti výroby elektrické energie a výroby tepla na oběhu

	Účinnost výroby el. energie - hrubá [%]	Účinnost výroby el. energie - čistá [%]	Účinnost výroby tepla [%]
Varianta 1	37,72	36,82	-
Varianta 2	30,81	29,89	62,49
Varianta 3	34,41	33,92	57,68

Tab. č. 31: Účinnosti výroby elektrické energie a tepla

U první varianty, která představuje oběh s kondenzační turbínou, je vyráběna pouze elektrická energie. U této varianty jsou uvažovány dva bloky, na nichž je možné vyrobit až 1 103 270,4 kWh za den, to je nejvíce ze všech tří variant. Zároveň je u této varianty také nejvyšší účinnost výroby elektrické energie (čistá účinnost je 36,82 %).

U oběhu s protitlakou turbínou je kromě elektrické energie získáváno také teplo. Společná výroba elektrické energie a tepla se vyznačuje vysokou mírou využití vstupujícího paliva. I u této varianty uvažujeme dva bloky. Dodávka tepla z parního oběhu ovlivňuje silovou část tohoto oběhu, tzn. výrobu elektrické energie, protože expanzi páry je třeba ukončit při vyšším tlaku. Pro zadané parametry je u tohoto oběhu zhruba dvakrát větší množství získaného tepla než u varianty s plynovou turbínou, ale elektrická energie je tu nejnižší.

Třetí varianta představuje oběh s plynovou turbínou. Syntézní plyn zde přivádíme na 4 samostatné jednotky. Plynová turbína je hřídelí spojena s generátorem, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Množství této elektrické energie je menší než u oběhu s kondenzační turbínou, ale větší než u protitlaké turbíny. Získané teplo můžeme využívat na vytápění nebo ohřev teplé užitkové vody. U této varianty využíváme až odpadní teplo a tedy silová část oběhu, tzn. výroba elektrické energie, tím není ovlivněna.

6.5.2 Porovnání vlastností z hlediska celkového zařízení

Při posuzování celého zařízení je nutné stanovit příkon, který vstupuje do zařízení v odpadu, koksu, zemním plynu a elektřině. Na 4 zplynovacích generátorech zpracujeme 1 000 tun odpadu za den.

	Množství	Příkon [MJ/den]
SKO	1 000,00 tun	9 800 000
koks	42,73 tun	1 174 648
zemní plyn	932,30 m ³	33 563
elektřina	436 062,30 kWh	1 569 824
		12 578 035

Tab. č. 32: Příkony v jednotlivých vstupech do zařízení

Z tabulky (Tab č. 32) je patrné, že příkon zařízení je tedy 12 578 035 MJ.

Hrubou elektrickou účinnost stanovíme dle vztahu:

$$\eta_{hrubá\ el.} = \frac{\text{hrubá výroba el. energie}}{\text{příkon}} \quad (6.6)$$

Čistou elektrickou účinnost vypočítáme jako:

$$\eta_{čistá\ el.} = \frac{\text{hrubá výroba el.} - \text{VS oběhu} - \text{el. energie pro ZG}}{\text{příkon}} \quad (6.7)$$

Kde vlastní spotřebu oběhu stanovíme výpočtem pomocí jednotlivých účinností oběhů a el. energie pro ZG je elektřina pro zplynovací generátor. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab č. 28).

Účinnost výroby tepla z hlediska celého zařízení je včetně tepla v páře a horké vodě ze zplynování, tzn., že teplo nyní získáme také u první varianty, i když ne z oběhu, ale právě ze zplynovacího zařízení. V následující tabulce (Tab č. 33), jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé varianty.

	Získané teplo z celého zařízení [GJ/den]
Varianta 1	1 665,70
Varianta 2	8 244,75
Varianta 3	7 738,25

Tab. č. 33: Získaná tepla na celém zařízení

Tuto účinnost pak stanovíme dle vztahu:

$$\eta_{výroby\ tepla} = \frac{\text{získané teplo z celého zařízení}}{\text{příkon}} \quad (6.8)$$

Celkovou účinnost oběhu spočítáme ze součtu:

$$\eta_{celková} = \eta_{čistá\ el.} + \eta_{výroby\ tepla} \quad (6.9)$$

Celková účinnost jednotlivých variant využití syntézního plynu je uvedena v následující tabulce (Tab. č. 34).

	Celková účinnost [%]
Varianta 1	41,70
Varianta 2	50,44
Varianta 3	52,34

Tab. č. 34: Celkové čisté účinnosti

V následující tabulce (Tab. č. 35) jsou uvedeny souhrnné výsledky jednotlivých variant využití syntézního plynu.

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Hrubá výroba elektrické energie [kWh/den]	1 103 270,40	901 172,16	1 006 316,16
Celková dodávka tepla [GJ/den]	1 665,70	8 244,75	7 738,25
Vlastní spotřeba elektrické energie [kWh]	135 339,63	137 387,44	123 345,57
Hrubá elektrická účinnost [%]	31,58	25,79	28,80
Čistá elektrická účinnost [%]	27,70	21,86	25,27
Celková účinnost dodávky tepla [%]	13,24	65,55	61,52
Celková čistá účinnost [%]	40,94	87,41	86,79

Tab. č. 35: Souhrnné výsledky jednotlivých variant

6.6 Návrh nejvhodnějšího využití syntézního plynu

Pokud bychom porovnávali jednotlivé varianty z hlediska výroby elektrické energie, vyjde nám jako nejlepší varianta s kondenzační parní turbínou, která dosahuje účinnosti výroby elektrické energie 36,82 %, oproti tomu varianta s plynovou turbínou má čistou účinnost výroby elektřiny nižší a to 33,92 %.

Kdybychom chtěli zvětšit účinnost takovýchto oběhů, je možné to učinit výrobou tepla. Kondenzační turbínu bychom nahradili protitlakou turbínou. Dodávka tepla u tohoto parního oběhu ovlivňuje silovou část, tedy výrobu elektrické energie, neboť expanzi páry je třeba ukončit při vyšším tlaku. U této varianty bychom však získali největší množství tepla a je zde také nejvyšší celková účinnost. Naproti tomu u plynové turbíny bychom účinnost zvýšili využíváním odpadního tepla, připojením kotle na odpadní teplo, kde výroba elektrické energie není tímto využitím ovlivněna.

Rozhodnutí o výběru nejlepší varianty využití syntézního plynu je tedy především ekonomickou záležitostí.

7. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na plazmové zplynování komunálního odpadu. Jednotlivé technologie nabízené na trhu byly shrnuty v rešerši a poté z nich byla pro uvažované zařízení v Praze vybrána technologie od společnosti Westinghouse. Jedná se kanadskou společnost, která je dceřinou společností firmy Alter NRG. Tato společnost byla zvolena zejména díky široké škále vystavených zařízení po celém světě a tím pádem i nejlépe odzkoušené a zvládnuté technologii.

Dalším krokem bylo sestavení procesního schématu začínající příjmem komunálního odpadu, jeho úpravou, následným zpracováním, až po nakládání se vzniklými surovinami vystupujícími ze zplynovacího reaktoru. Návrh tohoto schématu vycházel ze zpracované rešerše. Při plazmatickém zplynování komunálního odpadu je primární výstupní veličinou syntézní plyn, jehož prvkové složení bylo v této práci určeno. Z tohoto složení byla dále vypočítána výhřevnost syntézního plynu pocházejícího z plazmatického zplynování směšného komunálního odpadu.

Důležitou kapitolou pro další výpočty je hmotnostní a energetická bilance, která byla pro danou plazmovou zplynovací technologii zpracována do tabulkové formy.

Závěrečná kapitola byla věnována možnostem využití syntézního plynu, kde byly namodelovány tři varianty využití tohoto plynu v programu Cycle Tempo. U první varianty, která představuje spálení syntézního plynu v plynovém kotli s následnou kondenzační turbínou, je vyráběna pouze elektrická energie, jejíž hodnota je však ze všech variant nejvyšší, čistá účinnost výroby elektrické energie u tohoto oběhu je 36,82 %. Pokud bychom nahradili kondenzační turbínu protitlakou turbínou, jak je uvažováno u druhé varianty, mohli bychom kromě elektřiny vyrábět také teplo. Dodávka tepla ale ovlivňuje silovou část, neboť expanzi páry je třeba ukončit při vyšším tlaku. Množství dodaného tepla je nejvyšší. Poslední uvažovanou variantou byl oběh s plynovou turbínou, u kterého dochází ke spálení syntézního plynu ve spalovací komoře. U této varianty vycházejí průměrné hodnoty jak elektrické energie, tak tepla. Využití tohoto tepla ale neovlivňuje výrobu elektrické energie. Hodnota modulu teplárenské výroby e je v tomto případě vyšší než u varianty s protitlakou turbínou. Při výběru nejvhodnější varianty využití daného syntézního plynu bychom museli stanovit pro nás nejdůležitější hledisko, podle kterého bychom poté mohli z jednotlivých variant vybrat jedno řešení. Tímto hlediskem může být například množství vyrobené elektrické

energie, množství získaného tepla nebo nejlepší účinnost celého zařízení. Rozhodujícím faktorem však bude ekonomické hledisko.

V dnešní době je slovo odpad skloňováno na spoustě institucí a mnozí lidé řeší jak snížit jeho neustále rostoucí množství a tím minimalizovat nepříznivý vliv na lidské zdraví a životní prostředí. Většina odpadů je stále ukládána na skládky, což s sebou nese velkou náročnost na prostor, nebezpečí kontaminace spodních vod a půdy, ale i zápach v okolí této skládky. Při spalování odpadu je nutné nákladné čištění vzniklých spalin, které mohou obsahovat různé nebezpečné látky. Zajímavou variantou je tedy v této práci řešená technologie na plazmatické zplynování komunálních odpadů, které podobně jako spalování snižuje objem a hmotnost odpadů a navíc při něm nevznikají spaliny s nebezpečnými látkami, neboť uvnitř reaktoru dochází k rozkladu organických a části neorganických složek odpadu na jednoduché plynné a kapalné sloučeniny.

8. ZDROJE

- [1] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, 2001
- [2] AGRO-EKO Consulting, a.s., Rozbory komunálních odpadů pro Pražské služby a.s. – podzim 2015
- [3] AGRO-EKO Consulting, a.s., Rozbory komunálních odpadů pro Pražské služby a.s. – zima 2015/2016
- [4] BALÁŠ, Marek, Zdeněk SKÁLA a Martin LISÝ. Spalovny odpadu – odpad jako palivo, TZB info: TZB info [online]. [cit. 2016-07-29]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/energie-z-odpadu/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>
- [5] Nebezpečný odpad [online]. [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/nebezpecny-odpad>
- [6] Pražské služby a.s. – Historie spalování odpadu v Praze [online]. [cit. 2016-08-22]. Dostupné z: <http://www.psas.cz/index.cfm/o-spolecnosti/predstaveni-spolecnosti/historie/?startRow=21&nextNID=C5E1DDD8-D05A-D7C7-576E0541E0D1FDFB>
- [7] VŠCHT, Spalovna Malešice (nyní ZEVO), údaje podle informací provozovatele PS, a.s. [online], [cit. 2016-08-22], dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/odpady/malesice.htm>
- [8] Pražské služby a.s. – schéma zařízení na energetické využití odpadu Malešice [online]. [cit. 2016-09-01]. Dostupné z: <http://www.psas.cz/psas/assets/File/NEW%20SCHEMA%20KOGENERACE.pdf>
- [9] BALOCH, Tomáš, Ekologická či (Eko)-nelogická řešení ochrany ovzduší v zařízení typu ZEVO??? [online], [cit. 2016-09-06], dostupné z: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CC8QFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.odpadoveforum.cz%2FTVIP2014%2Fdokumenty%2Fprezentace%2F242.ppt&ei=5zZKVaaLC8OYsAHjvIGgAQ&usq=AFQjCNHnWNCVsRu9bLzumNlyw9VHQnbhaQ&sig2=9ILf5-MWNpGhq1n1YF0dHQ&bvm=bv.92291466,d.bGg>
- [10] PGP Terminal, a.s. - Co je to plazma [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.pgpt.cz/cz/co-je-to-plazma/co-je-to-plazma.html>

- [11] PGP Terminal, a.s. - Princip plazmového zplyňování komunálního odpadu [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.pgpt.cz/cz/plazmova-technologie/princip-plazmoveho-zplynovani-komunalniho-odpadu.html>
- [12] PGP Terminal, a.s. - Výhody plazmového zplyňování [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.pgpt.cz/cz/princip-plazmoveho-zplynovani-komunalniho-odpadu/vyhody-plazmoveho-zplynovani.html>
- [13] WILLERTON Kevin, Alter NRG, The Next Generation of Waste-To-Energy Solutions, Presentation presented at: [Canadian Embassy; 2016-11-08; Prague; Czech republic]
- [14] PGP Terminal, a.s. [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.pgpt.cz/cz/o-nas.html>
- [15] PGP Terminal, a.s. - Plazmový reaktor WPC [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.pgpt.cz/cz/princip-plazmoveho-zplynovani-komunalniho-odpadu/plazmovy-reaktor-wpc.html>
- [16] Alter NRG Plasma Gasification Solution - Projects [online]. [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: http://www.alternrg.com/waste_to_energy/projects/
- [17] Europlasma - Sustainable electricity production from waste & biomass gasification [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.europlasma.com/en/renewable-energies.html>
- [18] CHO Tiper - Projects [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.chotiper.fr/le-projet.php#technologie>
- [19] Podklady dodané společností Pražské služby, a.s.
- [20] Europlasma Industries [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.europlasma.com/en/torch-a-process.html>
- [21] Tetronics International [online]. [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://tetronics.com/our-technology/how-it-works/>
- [22] Plasco Conversion Technologies [online]. [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.plascoenergygroup.com/our-technology/>
- [23] NOBILIS, Luboš, ECO Trend s.r.o., Life Cycle Assessment (LCA) Technologie plazmového zplyňování směsného komunálního odpadu, Presentation presented at: [Canadian Embassy; 2016-11-08; Prague; Czech republic]

- [24] LISÝ, Martin a Veronika VENCÚRIK PITUKOVÁ, ed. Sborník příspěvků ze semináře středoevropského energetického institutu Cenergi III, [2016-02-03] Dolní Morava, ISBN 978-80-214-5440-8.
- [25] Siemens Steam Turbine SST-400 [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/steam-turbines/sst-400.htm#content=Technical%20Data>
- [26] Studie proveditelnosti Chotíkov – technicko-ekonomický propočet [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.pltep.cz/skladka/upload/File/kestazeni/Studie%2060%20tis.%20tun/Chotikov_PrilohaA_60KT_0309_TiCB_DEF.pdf
- [27] Cycle Tempo 5.0. Asimptote, bv [online]. [cit. 2017-06-02] Dostupné z: <http://www.asimptote.nl/software/cycle-tempo/>
- [28] HOLMGRAN, Magnus, X Steam, Thermodynamic properties of water and steam [online], [cit. 2017-05-20], dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam--thermodynamic-properties-of-water-and-steam>

9. SEZNAMY

9.1 Seznam obrázků

- Obr. č. 1 Schéma zařízení na energetické využití odpadu Malešice
- Obr. č. 2 Plazmový zplynovací reaktor
- Obr. č. 3 Plazmový hořák Westinghouse Plasma Gasification
- Obr. č. 4 Plazmový reaktor Westinghouse Plasma Corporation
- Obr. č. 5 Demonstrační zařízení Westinghouse Plasma Center v Madisonu ve Spojených státech amerických
- Obr. č. 6 Zařízení Tees Valley Renewable Energy Facility I
- Obr. č. 7 Letecký pohled na zařízení Tees Valley Renewable Energy Facility I a II
- Obr. č. 8 Letecký pohled na Tees Valley Renewable Energy Facility I v roce 2015
- Obr. č. 9 Schéma technologie Europlasma ke zplynování odpadu
- Obr. č. 10 Plazmový hořák od firmy Europlasma
- Obr. č. 11 Zařízení CHO Power ve městě Morcenx ve Francii
- Obr. č. 12 Grafický návrh C.H.O. Tiper
- Obr. č. 13 Schematicky znázorněný proces Gasplasma
- Obr. č. 14 Technologie Plasco Energy
- Obr. č. 15 Procesní schéma plazmové technologie na zplynování komunálního odpadu
- Obr. č. 16 Vstupy a výstupy při plazmovém zplynování směsného komunálního odpadu
- Obr. č. 17 Vstupy a výstupu při spalování směsného komunálního odpadu
- Obr. č. 18 Záznam vybraných složek plynu (analyzátor ABB) při provozu GP750 – G3 na jednotce v Kozomíně
- Obr. č. 19 Parní turbína Siemens SST – 400
- Obr. č. 20 Oběh s kondenzační turbínou vytvořený v programu Cycle Tempo
- Obr. č. 21 Oběh s protitlakou turbínou vytvořený v programu Cycle Tempo
- Obr. č. 22 Oběh s plynovou turbínou vytvořený v programu Cycle Tempo

9.2 Seznam grafů

- Graf č. 1 Složení komunálního odpadu pocházející z venkovské zástavby městské části Lipence, podzim 2015
- Graf č. 2 Složení komunálního odpadu pocházející ze sídlištní zástavby městské části Barrandov, zima 2015/2016

9.3 Seznam tabulek

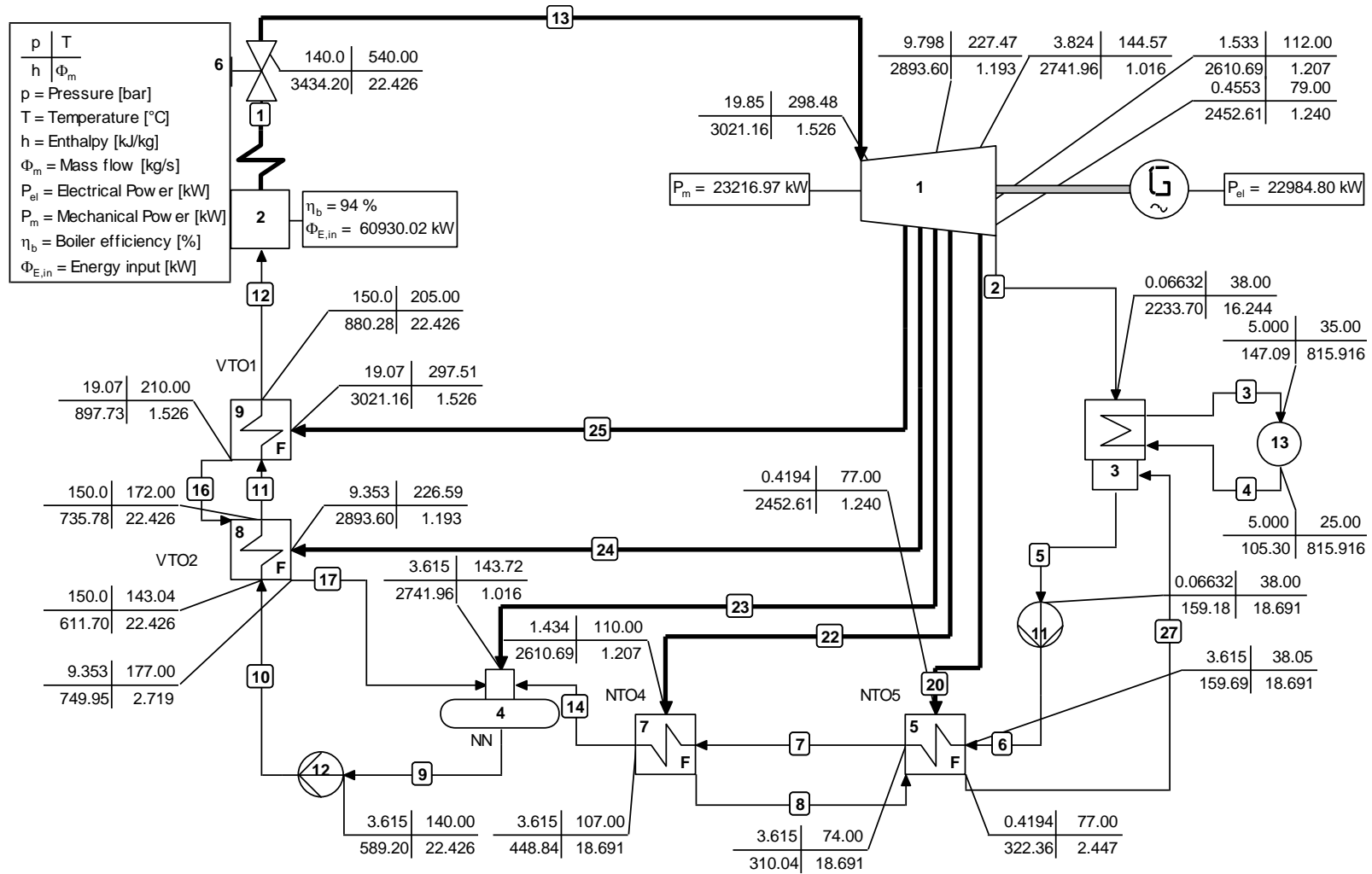
- Tab. č. 1 Výhřevnost jednotlivých složek komunálního odpadu
- Tab. č. 2 Příklad prvkového složení komunálního odpadu (v sušině)
- Tab. č. 3 Chronologie spouštění technologií na čištění spalin
- Tab. č. 4 Vstupy do procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztažené na 1 t SKO
- Tab. č. 5 Výstupy z procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztažené na 1 t SKO
- Tab. č. 6 Vstupy do procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztažené na 250 t SKO
- Tab. č. 7 Výstupy z procesu plazmového zplynování směsného komunálního odpadu vztažené na 250 t SKO
- Tab. č. 8 Procentuální složení zpracovávaného odpadu
- Tab. č. 9 Procentuální složení výsledného syntézního plynu
- Tab. č. 10 Dosažitelná účinnost při čištění syntézního plynu
- Tab. č. 11 Procentuální složení vyčištěného syntézního plynu
- Tab. č. 12 Procentuální složení plynu ze zplynování biomasy na jednotce v Kozomíně
- Tab. č. 13 Hodnoty potřebných veličin pro jednotlivé složky syntézního plynu ze zplynování průmyslového odpadu
- Tab. č. 14 Přepočítané hodnoty ze zplynování průmyslového odpadu
- Tab. č. 15 Výsledné složení syntézního plynu z SKO
- Tab. č. 16 Výhřevnosti jednotlivých složek syntézního plynu
- Tab. č. 17 Hmotnostní bilance pro plazmové zplynování SKO
- Tab. č. 18 Energetická bilance pro plazmové zplynování SKO
- Tab. č. 19 Výhřevnosti a množství tepla na vstupu
- Tab. č. 20 Výhřevnosti a množství tepla na výstupu
- Tab. č. 21 Parametry parní turbíny Siemens SST - 400

Tab. č. 22	Hodnoty teplot a tlaků pro jednotlivé regenerační ohříváky u varianty 1
Tab. č. 23	Výsledky varianty 1
Tab. č. 24	Hodnoty teplot a tlaků pro jednotlivé regenerační ohříváky u varianty 2
Tab. č. 25	Výsledky varianty 2
Tab. č. 26	Výsledky varianty 3
Tab. č. 27	Výroba elektrické energie u jednotlivých variant
Tab. č. 28	Vlastní spotřeba el. energie u jednotlivých variant
Tab. č. 29	Výroba elektrické energie v jednotlivých obězích
Tab. č. 30	Výroba tepla v jednotlivých obězích
Tab. č. 31	Účinnosti výroby elektrické energie a tepla
Tab. č. 32	Příkony v jednotlivých vstupech do zařízení
Tab. č. 33	Příkony v jednotlivých vstupech do zařízení
Tab. č. 34	Získaná tepla na celém zařízení
Tab. č. 35	Souhrnné výsledky jednotlivých variant

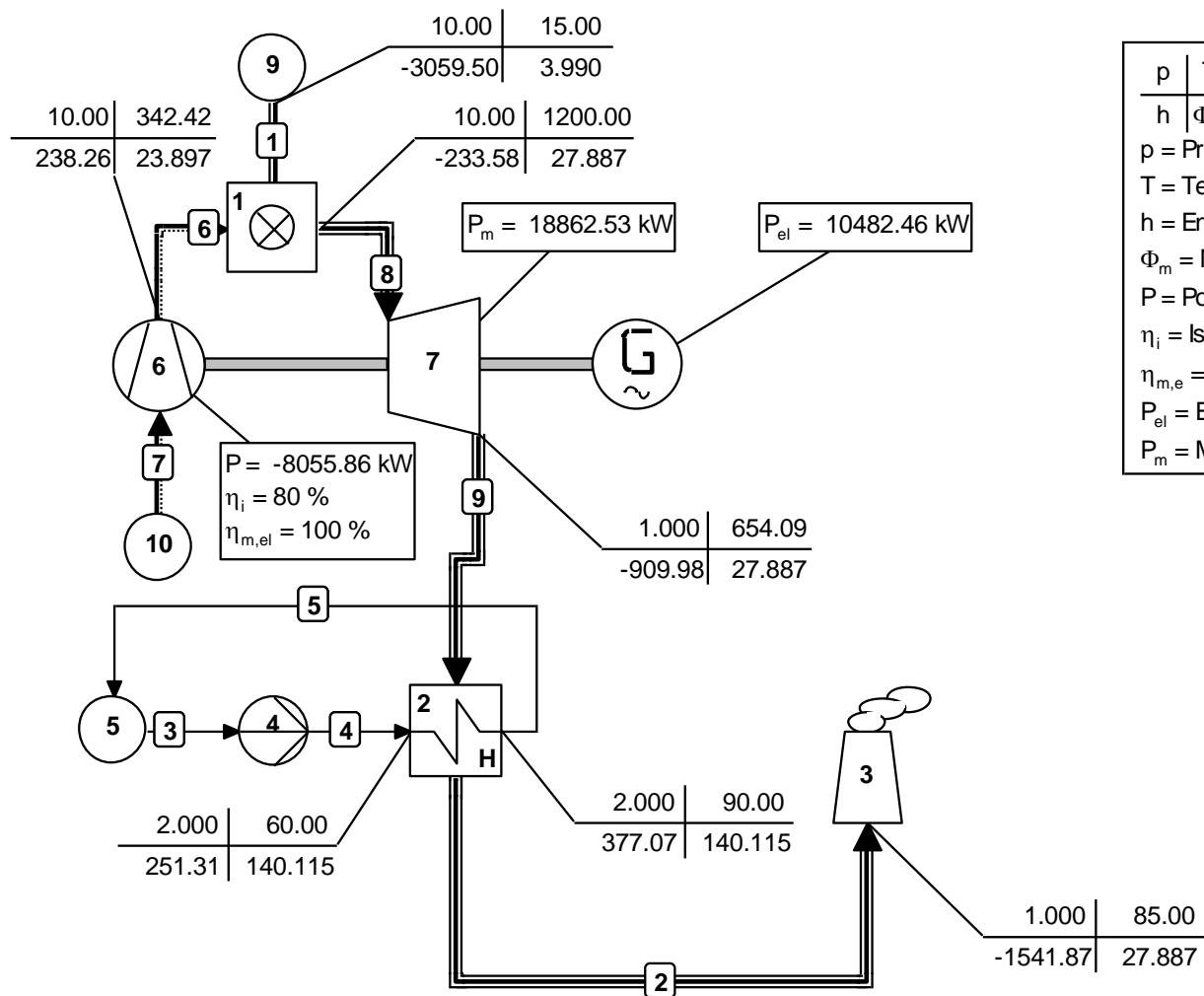
9.4 Seznam příloh

Příloha č. 1	Schéma oběhu s kondenzační parní turbínou
Příloha č. 2	Schéma oběhu s protitlakou parní turbínou
Příloha č. 3	Schéma oběhu s plynovou turbínou
Příloha č. 4	Schéma zařízení na energetické využití odpadu Malešice

Příloha č. 1: Schéma oběhu s kondenzační parní turbínou



Příloha č. 3: Schéma oběhu s plynovou turbínou



p	T
h	Φ_m
p = Pressure [bar]	
T = Temperature [°C]	
h = Enthalpy [kJ/kg]	
Φ_m = Mass flow [kg/s]	
P = Power [kW]	
η_i = Isentropic efficiency [%]	
$\eta_{m,e}$ = Mechanical*Electrical eff. [%]	
P_{el} = Electrical Power [kW]	
P_m = Mechanical Power [kW]	

Příloha č. 4: Schéma zařízení na energetické využití odpadu Malešice

