

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Návrh inovace zařízení pro čištění spalin ve spalovně nebezpečného odpadu

Diplomová práce

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

Autor práce: Bc. Petr Jirsa

PRAHA 2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra technologických zařízení staveb

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Petr Jirsa

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Návrh inovace zařízení pro čištění spalin ve spalovně nebezpečného odpadu

Název anglicky

Design innovation of the device for emissions cleaning in hazardous waste incinerators

Cíle práce

Cílem diplomové práce je seznámit se s problematikou termického zpracování nebezpečných odpadů s ohledem na čištění spalin. Navrhnout inovaci zařízení pro čištění spalin ve vybrané spalovně nebezpečného odpadu. Posoudit spalovací zařízení s ohledem na tepelně-emisní vlastnosti a vypracovat ekonomické posouzení návrhu.

Metodika

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

Doporučený rozsah práce

60

Klíčová slova

odpad, výhřevnost, spalovna, spaliny, emise

Doporučené zdroje informací

GRÜNWARD, A. Voda a ovzduší 20. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1999. 206 str. ISBN 8001012417.

HEMERKA, J. Omezování tuhých emisí. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1998. 32. str.

HYŽÍK, J., HOLOUBEK, J., KYSELÁK, M., HLAVÁČ, I. Spalovny a energetické využití odpadů: sborník z konference. Praha 3. – 4. října 2012. ISBN 978-80-87534-38-0.

KURAŠ, M. Odpadové hospodářství. 1. vyd. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o., Chrudim, 2008. 152 str. ISBN 978-80-86832-34-0.

KURAŠ, M. Technologie zpracování odpadů. 2. vyd. Praha: VŠCHT Praha, 1993. 279 str. ISBN 80-7080-195-6.

OBROUČKA, K. Termické zneškodňování odpadů. 1. vyd. Ostrava: VŠB Ostrava, 1997. 144 str. ISBN 80-7078-505-5.

VOŠTOVÁ, V., FRIES, J. Zpracování pevných odpadů. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2003. 157 str. ISBN 80-01-02672-8.

Předběžný termín obhajoby

2015/05 (květen)

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 10. 1. 2014

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 04. 04. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Návrh inovace zařízení pro čištění spalin ve spalovně nebezpečného odpadu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jana Malat'áka, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 2. 4. 2015

.....
Bc. Petr Jirsa

Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval panu doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji firmě SMS CZ s.r.o., jmenovitě panu Ing. Petru Jirsovi, Ph.D., expertovi v oblasti termického zneškodňování odpadů, za poskytnutí odborných informací a rad, které pomohly k vytvoření této práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je seznámit se s problematikou termického zpracování nebezpečných odpadů. Důraz je kladen zejména na technologii a techniku čištění kouřových plynů. V práci je uvedena charakteristika spalitelných odpadů, chemické a fyzikální principy spalovacích procesu. Jsou zde charakterizovány znečišťující látky včetně jejich nebezpečných vlastností. Dále se práce zaměřuje na popis hlavních konstrukčních znaků a vlastností jednotlivých technologií čištění spalin s ohledem na platnou legislativu.

Druhá část diplomové práce se zabývá komplexním návrhem inovace termického zpracování kouřových plynů a následného suchého procesu čištění kouřových plynů s ohledem na technicko-ekologické požadavky zvolené spalovny nebezpečných odpadů. Je provedeno a vyhodnoceno měření znečišťujících látek v kouřových plynech s ohledem na platnou legislativu u stávajícího provozu. V souvislosti s ekonomickou analýzou projektu, strojně-technologickými a ekologickými aspekty nového řešení je doporučeno přistoupit k realizaci navrhované inovace.

Klíčová slova

Odpad, výhřevnost, spalovna, spaliny, emise

Design innovation of the device for emissions cleaning in hazardous waste incinerators

Summary

The aim of the master thesis is to acquaint with an issue of hazardous waste thermal treatment. Emphasis is especially put on a technology and techniques of combustion products cleaning. The thesis presents characteristics of combustible waste and pollutants including its hazardous properties, chemical and physical principles of the combustion process. The thesis focuses on the description of the main structural features and characteristics of particular cleaning technology regarded to valid legislative regulation.

The second part of the thesis designs a complex innovative solution of hazardous waste combustion and subsequent dry flue gas cleaning process regarded to technical and environmental requirements of a selected hazardous waste incinerator. Measurement of emissions in flue gases in current plant is evaluated in comparison to valid legislation. Based on an economic analysis of the project, mechanical-technological and ecological aspects of the new solution it is recommended to proceed to implementation of the proposal.

Key words

Waste, caloric value, combustion plant, combustion products, emissions

Obsah

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | ÚVOD..... | 2 |
| 2 | PŘEHLED POZNATKŮ Z LITERATURY | 3 |
| 2.1 | LEGISLATIVA | 3 |
| 2.1.1 | Emisní limity..... | 3 |
| 2.1.2 | Specifické emisní limity pro spalovny odpadu | 4 |
| 2.2 | CHARAKTERISTIKA TUHÝCH ODPADŮ | 5 |
| 2.2.1 | Definice a dělení odpadů..... | 5 |
| 2.2.2 | Druhy a vlastnosti spalitelných odpadů | 5 |
| 2.3 | TECHNOLOGIE A TECHNIKA TERMICKÉHO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ..... | 7 |
| 2.3.1 | Definice a členění metod..... | 7 |
| 2.3.2 | Pyrolýza..... | 8 |
| 2.3.3 | Zplyňování | 9 |
| 2.3.4 | Spalování..... | 10 |
| 2.3.5 | Porovnání metod termických procesů..... | 13 |
| 2.4 | TECHNOLOGIE A TECHNIKA ZPRACOVÁNÍ VEDLEJŠÍCH PRODUKTŮ..... | 13 |
| 2.4.1 | Charakteristika znečišťujících látek | 13 |
| 2.4.2 | Škodliviny ze spalování | 14 |
| 2.4.3 | Čištění spalin..... | 18 |
| 2.4.4 | Čištění odpadních vod..... | 28 |
| 3 | VÝCHOZÍ PODMÍNKY PODNIKU, POSTUPY A METODY ŘEŠENÍ | 29 |
| 3.1 | CHARAKTERISTIKA VYBRANÉ SPALOVNY..... | 29 |
| 3.2 | POPIS STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE SPALOVNY | 30 |
| 3.1 | MĚŘENÍ EMISÍ | 34 |
| 3.1.1 | Metodika měření | 34 |
| 3.1.2 | Přepočty výsledků | 37 |
| 3.1.3 | Naměřené hodnoty | 38 |
| 3.1.4 | Výsledky měření | 41 |
| 4 | NÁVRH INOVACE..... | 43 |
| 4.1 | MODERNIZACE ZAŘÍZENÍ | 43 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2 | NÁVRH MODERNIZACE TECHNOLOGIE SPALOVÁNÍ ODPADU | 44 |
| 4.3 | MODERNIZACE TECHNOLOGIE ČIŠTĚNÍ SPALIN | 46 |
| 4.3.1 | První stupeň čištění spalin..... | 48 |
| 4.3.2 | Druhý stupeň čištění spalin | 50 |
| 4.3.3 | Třetí stupeň čištění spalin..... | 51 |
| 4.4 | VÝBĚROVÉ ŘÍZENÍ..... | 53 |
| 4.4.1 | Rozpočet projektu | 53 |
| 4.5 | EKONOMICKÉ POSOUZENÍ NÁVRHU | 53 |
| 4.5.1 | Provozní výnosy | 54 |
| 4.5.2 | Provozní náklady..... | 54 |
| 4.5.3 | Ekonomická a investiční analýza | 57 |
| 5 | DISKUZE | 58 |
| 6 | ZÁVĚR | 61 |
| | SEZNAM POŽITÉ LITERATURY | 62 |

1 Úvod

Ochrana životního prostředí je bezesporu jednou z klíčových problematik, které jsou diskutovány v rámci jednotné hospodářské politiky Evropské unie. Na prvním místě je zdůrazňováno předcházení a omezování vzniku odpadů, které bude v blízké budoucnosti nutno považovat za absolutní prioritu jak z hlediska materiálového, tak i environmentálního. Pokud však k produkci odpadů dochází, je třeba se koncepčně zabývat problematikou nakládání s odpady ve smyslu jeho využívání respektive zneškodňování. Za tímto účelem je řešena koncepce minimalizace vzniku, odstraňování odpadů, snižování jejich nebezpečných účinků a využívání jako druhotných surovin a alternativních paliv.

Termické procesy jsou preferovanou metodou zneškodňování komunálních a nebezpečných odpadů, kdy dochází k velmi významné redukci hmotnosti a objemu spalovaného odpadu. Z hygienického hlediska se jedná se o čistý proces se sterilními a chemicky stabilními produkty. Významným přínosem této technologie je možnost energetického využívání odpadů ve formě produkce tepelné či elektrické energie.

Z uvedených tezí jasně vyplývá současný trend Evropské unie minimalizovat podíl skládkovaného odpadu a nahrazovat tuto metodu výhodnějším způsobem termického zneškodňování odpadů. V západních zemích s rozvinutým odpadovým hospodářstvím se touto technologií zpracovává až polovina z celkového množství vyprodukovaného odpadu, oproti tomu v ČR je tento podíl výrazně nižší, což se jeví jako nedostatečné.

Pokud chceme přistoupit ke zlepšení stavu odpadového hospodářství v České republice a zvýšit tak procento celkově spalovaného odpadu, je třeba koncepčně se zabývat danou problematikou.

Při procesu termického zpracování odpadů dochází k produkci řady nežádoucích látek a to především jako emisí ve spalínách, které je nezbytně nutné následně zneškodňovat tak, aby byly dodrženy emisní limity spalin vypouštěných do ovzduší. V této souvislosti byla v roce 2012 přijata nová legislativní norma č. 201/2012 Sb. - Zákon o ochraně ovzduší a vyhláška č. 415/2012 Sb., která se v návaznosti na směrnici Evropské komise 76/2000/EC zabývá problematikou spalování odpadů a stanovuje emisní limity.

V České republice existují zařízení pro termické zneškodňování nebezpečných odpadů vybavené technologií mokrého čištění kouřových plynů, kde se využívá vody jako hlavního čistícího media. Tyto tzv. mokré pračky kouřových plynů, jak byly v minulosti navrženy a hojně rozšířeny, dávají předpoklad neplnění stávajících emisních limitů, čímž se vystavují riziku udělení pokut inspekčními orgány ČIŽP. Obecně je problematické nakládání se znečištěnou vodou, která v takovém provozu figuruje jako čistící médium.

Tyto aspekty vedou k základním předpokladům pro návrh inovace zařízení pro čištění spalin ve spalovnách nebezpečného odpadu tak, aby byly spolehlivě plněny koncentrace znečišťujících látek vypouštěných do ovzduší. Za tímto cílem bylo vypracováno řešení v podobě předkládané diplomové práce.

2 Přehled poznatků z literatury

2.1 Legislativa

Základní pojmy v oblasti emisních limitů a provozování spalovacích stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší s ohledem na tuhá paliva definujeme na základě platné legislativy zákona č. 201/2012 Sb., o ovzduší:

- a) **Palivo** – tuhý, kapalný nebo plynný hořlavý materiál určený ke spalování ve zdrojích znečišťování za účelem získání jeho energetického obsahu splňující požadavky zvláštního právního předpisu.
- b) **Spalování** – technologický proces, při němž je oxidováno palivo za účelem získávání tepla. Ke spalování náleží také technologické operace s ním související, pokud se vykonávají přímo u zdroje znečišťování, v němž spalování probíhá, zejména úprava paliva, zachycování znečišťujících látek, odvod odpadních plynů do ovzduší, měření a regulace.
- c) **Spoluspalování paliva** – proces, při němž je v zařízení spalováno současně nebo střídavě více druhů paliv.
- d) **Spalovací stacionární zdroj znečišťování ovzduší** – zařízení nebo soubor zařízení spalovacích technologických procesů, ve kterém se oxidují paliva za účelem využití uvolněného tepla.
- e) **Zařízení spalovacích technologických procesů** – jakékoliv, z hlediska účelu dále nedělitelné technické zařízení, v němž se oxiduje palivo za účelem výroby tepla.
- f) **Emise** – vnášení jedné nebo více znečišťujících látek do životního prostředí.
- g) **Emisní limit** – nejvýše přípustné množství znečišťující látky nebo stanovené skupiny znečišťujících látek nebo pachových látek, vypouštěné do ovzduší ze zdroje znečišťování ovzduší, vyjádřené jako hmotnostní koncentrace znečišťující látky v odpadních plynech nebo hmotnostní tok znečišťující látky za jednotku času nebo hmotnost znečišťující látky vztažená na jednotku produkce nebo lidské činnosti nebo jako počet pachových jednotek na jednotku objemu nebo jako počet částic znečišťující látky na jednotku objemu.
- h) **Emisní strop** – nejvýše přípustné množství znečišťující látky vnesené do ovzduší za kalendářní rok.
- i) **Imise** – znečištění ovzduší vyjádřené hmotnostní koncentrací znečišťující látky nebo stanovené skupiny znečišťujících látek.
- j) **Imisní limit** – hodnota nejvýše přípustné úrovně znečištění ovzduší vyjádřená v jednotkách hmotnosti na jednotku objemu při normální teplotě a tlaku (Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší).

2.1.1 Emisní limity

Emisní limity pro vybrané znečišťující látky u vybraných technologií a zařízení a emisní limity všeobecně platné jsou obsaženy ve vyhlášce č. 415/2012 Sb.

Pro kontinuální měření emisí tuhých látek se používají radiometrická (absorpce beta záření) a fotometrická metoda. Pro kontinuální měření plynných emisí se používají metody:

- **infračervená spektrometrie** pro SO₂, CO, NO_x, Cl,
- **ultrafialová spektrometrie** pro SO₂, NO_x, CO,
- **potenciometrie** pro F a Cl,
- **kolorimetrie** pro H₂S,
- **plamenoionizační detekce** pro uhlovodíky a organické látky,
- **katalytické spalování** pro uhlovodíky a organické látky,
- **chemiluminiscence** pro NO_x (Hemerka, 1998).

2.1.2 Specifické emisní limity pro spalovny odpadu

Emisní limity pro spalovny odpadu jsou vztaženy k celkové jmenovité kapacitě a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 11 %. Všeobecně platné emisní limity pro základní znečišťující látky mají následující hodnoty:

Tabulka 1: Emisní limity pro obsah znečišťujících látek ve spalinách ze spaloven odpadů

| Znečišťující látka | Emisní limit ¹⁾ [mg·m ⁻³] | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| | Denní průměr | Půlhodinové průměry | | 10 minutový průměr |
| | | 97 % | 100 % | 95 % |
| Tuhé znečišťující látky (TZL) | 10 | 10 | 30 | |
| NO_x | 200, 400 ²⁾ | 200 | 400 | |
| SO_x | 50 | 50 | 200 | |
| Organické látky (TOC) | 10 | 10 | 20 | |
| HCl | 10 | 10 | 60 | |
| HF | 1 | 2 | 4 | |
| CO | 50 | | 100 ²⁾ | 150 ²⁾ |

(Vyhláška č. 415/2012 Sb.)

Vysvětlivky:

- 1) V případě poruchy nesmí být za žádných okolností překročeny specifické emisní limity pro celkový organický uhlík a oxid uhelnatý stanovené podle této tabulky a koncentrace tuhých znečišťujících látek 150 mg·m⁻³, vyjádřené jako průměrné půlhodinové hodnoty.
- 2) Pro spalovny odpadu s fluidním ložem může příslušný orgán povolit výjimky z emisních limitů pro CO, pokud v povolení provozu současně stanoví emisní limit vyjádřený jako průměrná hodinová hodnota nejvýše 100 mg·m⁻³.

Tabulka 2: Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně jednorázovým měřením

| Znečišťující látky | Emisní limity |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Cd + Tl a jejich sloučeniny | 0,05 mg·m ⁻³ |
| Hg a její sloučeniny | 0,05 mg·m ⁻³ |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V a jejich sloučeniny | 0,5 mg·m ⁻³ |
| PCDD/F (polychlorované dibenzo-p-dioxiny) | 0,1 ng TEQ · m ⁻³ |

(Vyhláška č. 415/2012 Sb.)

2.2 Charakteristika tuhých odpadů

2.2.1 Definice a dělení odpadů

Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze č. 1 k tomuto zákonu (Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech).

Ke zbavování se odpadu dochází vždy, když osoba předá movitou věc, příslušející do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze č. 1 k tomuto zákonu, k využití nebo k odstranění ve smyslu tohoto zákona, nebo předá-li ji osobě oprávněné ke sběru nebo výkupu odpadů podle tohoto zákona bez ohledu na to, zda se jedná o bezúplatný nebo úplatný převod. Ke zbavování se odpadu dochází i tehdy, odstraní-li movitou věc příslušející do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze č. 1 k tomuto zákonu osoba sama (Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech). Odpady lze rozdělovat do jednotlivých skupin podle různých hledisek. Jako základní rozdělení můžeme považovat například dělení podle původu materiálu:

- Průmyslové
- Komunální
- Zemědělské
- Zdravotnické
- Stavební
- Z těžby a úpravy surovin

Průmyslový odpad je odpad, jehož původcem (producentem) je průmyslová výroba všech odvětví. Komunální odpad je veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob, který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání (Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech).

Podle vlivu na životní prostředí se odpady dělí na nebezpečné a ostatní. Ty mohou vznikat ve všech oblastech činnosti, a to jak průmyslové, tak spotřební a komunální, ve zdravotnictví i v zemědělství. Nebezpečným odpadem je odpad uvedený na Seznamu nebezpečných odpadů nebo jakýkoliv jiný odpad, vykazující jednu nebo více nebezpečných vlastností uvedených v příloze č. 2 k zákonu o odpadech. Jedná se o tyto vlastnosti: výbušnost, oxidační schopnost, hořlavost, vysoká hořlavost, dráždivost, škodlivost zdraví, toxicita, karcinogenita, žíravost a infekčnost (Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech).

Z pohledu znečištění životního prostředí dělíme odpady na nerozložitelné a rozložitelné. Podle fyzikálních vlastností odpady dělíme na: tuhé, kapalné a plynné. Tuhý odpad je odpad, který si jako celek, nebo jako jeho jednotlivé části za normálních atmosférických podmínek uchovává svůj tvar a objem.

2.2.2 Druhy a vlastnosti spalitelných odpadů

Technologií spalování lze odstraňovat širokou škálu odpadů: komunální odpady (včetně kalů z čističek odpadních vod – ČOV), průmyslové, zemědělské, zvláštní vyskytující se ve všech fyzikálních skupenstvích: tuhé, tekuté, plynné. Většina spalitelných odpadů patří mezi méně hodnotná paliva a jejich spalování přináší problémy plynoucí z nehomogenity

a značné různorodosti termofyzikálních a chemických vlastností spalovaného materiálu. Především se jedná o vysoký obsah vlhkosti (Obroučka, 2001).

Odpad jako palivo je charakterizováno třemi faktory:

- **obsahem hořlaviny**, značené: **C** – obsah spalitelných látek: uhlíku, vodíku, síry;
- **obsahem popela**, značené: **A** – množství minerálních látek;
- **obsahem vlhkosti**, značené: **W** (Obroučka, 2001).

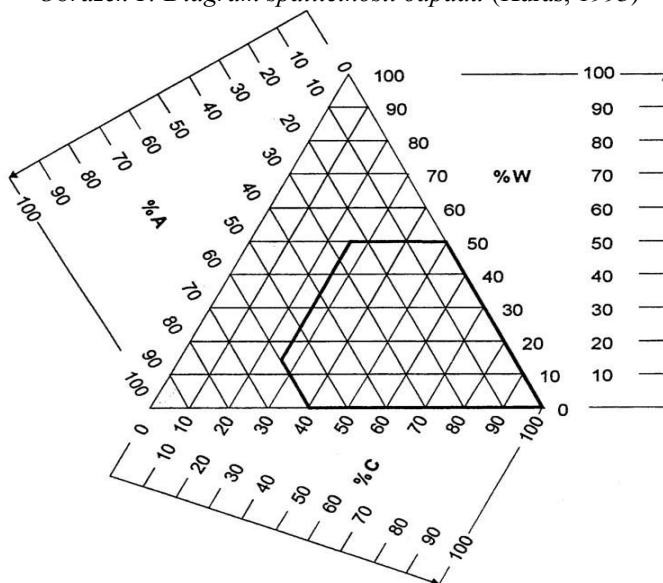
Odpad jako palivo má schopnost samostatně hořet pouze za předpokladu, že obsahuje dostatečný podíl hořlaviny. V případě, že podíl nespalitelných částic paliva (popel, vlhkost) výrazně stoupne na úkor hořlaviny, nastává situace, kdy takovéto palivo není schopné samostatného hoření. Teplo, které se spalováním uvolňuje z hořlaviny, nedokáže energeticky zabezpečit odpaření vlhkosti z paliva a ohřátí paliva na spalovací teplotu. Pokud nastane tato situace, je nutné palivovou směs doplnit o tzv. podpůrné neboli stabilizační palivo, které zajišťuje pokrytí energetického rozdílu. Využívá se zejména v počáteční fázi spalování a v případech, kdy je výhřevnost odpadu příliš malá. V praxi se danému problému předchází tím, že se směšuje těžko spalitelný odpad s lehkou spalitelným v poměru, který zaručuje trvalé hoření směsi (Obroučka, 2001).

Spalitelnost tuhého odpadu bez přívodu podpůrného paliva je podmíněna minimální výhřevností paliva $5\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Této podmínky může být dosaženo za následujících podmínek:

- obsah popelovin $A \leq 60\%$;
- obsah vlhkosti $W \leq 50\%$;
- obsah hořlaviny $C \geq 25\%$ (Kuraš, 2008).

Na obrázku 1 je zobrazen tzv. Tannerův diagram, který graficky znázorňuje uvedené podmínky spalitelnosti odpadů. V oblasti ohraničené pětiúhelníkem se nachází takové odpady a směsi odpadů, které hoří bez přídavného paliva.

Obrázek 1: Diagram spalitelnosti odpadů (Kuraš, 1993)



2.3 Technologie a technika termického zpracování odpadů

2.3.1 Definice a členění metod

Termické metody zneškodňování odpadů lze obecně označit jako technologie, při kterých dochází k působení na odpad (odpadní látku) teplotou přesahující meze její chemické stability, popřípadě spolupůsobení teploty a kyslíku v prostředí s regulovaným obsahem kyslíku. Tento pojem zahrnuje především **spalování, pyrolýzu a zplyňování** odpadů. Existují i další technologie jako je například zkapalňování odpadů, dále plazmová metoda spalování a mokrá oxidace (ČSN 06 3090, 2007). Tyto metody jsou však považovány za okrajové.

V současné době lze moderní procesy termického zpracování odpadů označovat jako **energetické využívání odpadů**. Takto získávaná energie zpravidla pochází z odpadu, který dosahuje podobné výhřevnosti jako například hnědé uhlí (Odpadové forum, 2010).

Termickou úpravou odpadů je možno původně nebezpečné látky v hořlavých odpadech přeměnit na relativně neškodné produkty. Je však nutné uvědomit si fakt, že uvedené tepelné metody nejsou konečným řešením zpracování odpadů. Současně vznikají také vedlejší produkty, kterými jsou popel, struska, plynné látky obsahující škodlivé částice (Obroučka, 2001). Problematika vedlejších produktů a jejich zpracování je více rozvedena v kapitole 2.4 Technologie a technika zpracování vedlejších produktů.

Pracovní teploty jednotlivých technologií se pohybují v poměrně širokém rozmezí, nejčastěji v rozsahu od 300 °C do 1 500 °C, ve výjimečných případech i vyšší. U plazmové metody teplota dosahuje až několika tisíců stupňů (6 000 °C – 12 000 °C) (Obroučka, 2001).

Důležitým kritériem pro hodnocení jednotlivých procesů termického zneškodňování odpadů je především dosažitelný stupeň rozkladu odpadní látky. Ten je většinou ovlivněn nejen teplotou, ale zejména chemickým charakterem prostředí, ve kterém daný proces probíhá. V mnoha případech tak lze v redukčních podmínkách dosáhnout podobné hloubky destrukce odpadních látek za podstatně nižších teplot, než v oxidačním prostředí.

Základním kritériem pro rozdělení procesů termického zneškodňování odpadů můžeme tedy uvažovat charakter prostředí v reakční komoře charakterizovaný obsahem kyslíku vůči zpracovávanému odpadu. Na základě tohoto hlediska rozlišujeme:

a) Oxidační procesy

Jedná se o procesy termického zneškodňování odpadů, při nichž je obsah kyslíku v reakčním prostoru stechiometrický nebo vyšší vzhledem k obsahu hořlavých látek ve zpracovávaném odpadu (ČSN 06 3090, 2007) V takovém případě hovoříme o spalování odpadů. Podle teplot v reakčním prostoru je možné oxidační procesy dále dělit na procesy:

- nízkoteplotní – s teplotou reakčního prostoru do 1 000 °C;
- vysokoteplotní – s teplotou reakčního prostoru nad 1 000 °C.

V současnosti však toto dělení pozbývá významu v souvislosti s převažujícím konstrukčním řešením termických zařízení na zneškodňování odpadů, kdy na reakční komoru s pracovními teplotami od 850 °C do 1 000 °C navazuje komora dodatečného spalování.

V té zpravidla dochází k navýšení teploty produktů spalování přiváděných z reakční komory na teploty v rozmezí 1 000 °C až 1 300 °C (Obroučka, 2001).

b) Redukční procesy

Jedná se o procesy termického zneškodňování odpadů, při nichž je obsah kyslíku v reakčním prostoru nulový nebo podstechiometrický vzhledem k obsahu hořlavých látek v odpadu. Mezi tyto procesy řadíme pyrolýzu a zplyňování (ČSN 06 3090, 2007).

2.3.2 Pyrolýza

Pod pojmem pyrolýza rozumíme termický proces, při kterém dochází působením tepla k rozkladu organických látek za nepřístupu kyslíku i sloučenin, které ho obsahují (vzduch, oxid uhličitý, vodní pára). Proces pyrolýzy vede ke vzniku dílčích frakcí:

- pevné,
- kapalné,
- plynné, které mohou obsahovat vodu, oxid uhelnatý, vodík, nezkondenzované kapalné produkty a jednoduché organické sloučeniny.

Jednotlivé fáze je možné odděleně spalovat, pokud je součástí zařízení například rotační pec, nebo koksová komora.

Procesem pyrolýzy lze zpracovávat řadu organických materiálů. Při vyšších teplotách jsou organické sloučeniny méně stabilní, vysokomolekulární látky se rozkládají na nízkomolekulární. Rozpadají se na těkavé látky a koks při teplotách od 150 °C do 1 000 °C. Na základě procesních teplot rozlišujeme:

- nízkoteplotní pyrolýzu, do 500 °C,
- středněteplotní pyrolýzu v teplotním rozmezí od 500 °C do 800 °C,
- vysokoteplotní pyrolýzu s reakční teplotou nad 800 °C.

Odštěpování malých částic z molekul s dlouhými řetězci závisí na vlastnostech a druhu vstupního odpadu, obsahu vlhkosti, reakční době a teplotě. Nejprve nastává (při teplotách do 200 °C) sušení materiálu, kdy se odpařuje voda. Tento proces je energeticky náročný, neboť na odpaření vody je nutné velké množství tepla. V rozmezí od 200 °C do 500 °C nastává reakce tzv. suché destilace, kdy dochází ke štěpení pobočných řetězců vysokomolekulárních organických látek. Materiál se přeměňuje na plynné a kapalné organické složky za vzniku pevného uhlíku. Se vzrůstající teplotou až do 1000 °C jsou produkty suché destilace nadále štěpeny a transformovány. Při tom dochází ke stabilizaci plynných látek jako je H₂, CO, CO₂, CH₄ (Obroučka, 2001).

Vlastnosti vzniklých produktů závisí především na kvalitě vstupních odpadů, reakční teplotě, délce ohřevu, rychlosti průběhu pyrolýzy a dalších procesních podmínkách (Kašpar, 2008). Při nižších teplotách se vytváří větší množství dehtu a koksových frakcí, zatímco při vyšších vzniká výlučně pyrolýzní plyn, který lze po vyčištění dále tepelně využívat (Obroučka, 2001).

Technické provedení pyrolýzního zařízení se skládá z komorové nebo rotační pece a termoreaktoru. Pyrolýzní komora, do které je vkládán předem upravený odpad, je zvnějšku vytápěna spaliny. Při teplotách okolo 500 °C dochází za nepřístupu vzduchu k uvolňování prchavé hořlaviny, která je vedena do termoreaktoru. Zde je plyn při teplotách od 900 °C do 1 300 °C spalován za přebytku vzduchu. V případech, kdy je nutné uměle zvýšit teplotu v samotném reaktoru, lze připustit částečnou oxidaci pyrolýzních produktů přímo v pyrolýzní komoře. Obecně je proces z energetického hlediska soběstačný (Envicrack, 2008). Pyrolýza jako způsob termického zneškodňování odpadů je vhodný pro homogenní odpad, nepoužívá se pro směsné domovní či průmyslové odpady (Obroučka, 2001).

Výhodou technologie je skutečnost, že při rozkladu za nepřístupu vzduchu nedochází k tvorbě dioxinů a furanů. Samotný objem vznikajících plynných produktů je výrazně menší než v případě technologie spalování (Envicrack, 2008). Tím částečně zanikají i problémy spojené s čištěním spalin. Obecně je pyrolýzní zařízení jednodušší a méně investičně náročné. V minulosti však bylo prokázáno, že pyrolýza je ve svém důsledku nákladnější než spalování, především kvůli problému se zneškodňováním tuhých a kapalných produktů pyrolýzy (pyrolýzního koksu a kapalných uhlovodíků s vysokým obsahem těžkých kovů). Z tohoto důvodu je tato technologie v praxi využívána méně (Obroučka, 2001).

2.3.3 Zplyňování

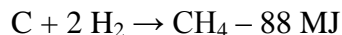
Zplyňování je proces, který představuje soubor reakcí zplyňovaného biologického odpadu se zplyňovacím médiem. Tím je nejčastěji vzduch, výjimečně vodní pára, nebo jejich kombinace. Přeměnou organické hmoty obsahující uhlík vzniká nízkovýhřevný plyn, který je složen z CO₂, H₂, CO, CH₄, H₂O, H₂S, HCl, HCN. Plyn může obsahovat i nežádoucí pevné částice, vyšší uhlovodíky, sloučeniny síry, halogenů a alkalických kovů, které je nutné před následným využitím plynu vyčistit (Kašpar, 2008).

Reakce probíhají při teplotách nad 750 °C. Samotnému zplyňování předchází fáze pyrolýzy probíhající při teplotách okolo 500 °C, kdy dochází k rozkladu materiálu na dřevěné uhlí, kondenzovatelné uhlovodíky a energeticky využitelné plyny. Druh a vlastnosti produktů pyrolýzy je závislý na rychlosti ohřevu vstupujícího materiálu a konečné teplotě. V další fázi produkty reagují s oxidačním médiem, čímž vzniká stálý plyn (Kašpar, 2008).

V případě, že teplo potřebné pro endotermické reakce je stejně velké jako teplo uvolňované exotermickými (oxidačními) reakcemi, nastává tzv. energetická rovnováha a tento proces je nazýván jako autotermický. Nejdůležitější rovnice zplyňovacího procesu jsou následující (Kašpar, 2008):

- a) Uhlík v koksovém zbytku je zplyňován za přítomnosti oxidu uhličitého:
$$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO} - 155 \text{ MJ} \quad /1/$$
- b) Podobně reaguje s vodní párou:
$$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 - 118 \text{ MJ} \quad /2/$$
$$\text{C} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2 - 90 \text{ MJ} \quad /3/$$

c) Vzniká metan reakcí uhlíku s uvolňovaným vodíkem:



/4/

Výhodou technologie zplyňování odpadů patří fakt, že kvůli vysokým teplotám, při kterých proces probíhá, odpadají problémy s tvorbou a následným zneškodňováním toxických dioxinů, furanů a polycyklických aromatických uhlovodíků. V redukčním prostředí je omezena tvorba oxidů dusíků NO_x (Obroučka, 2001).

Zařízení pro zplyňování biomasy, tzv. zplyňovací generátory, lze rozdělit do následujících skupin:

- generátory s pevným ložem,
- generátory s fluidním ložem,
- generátory s unášivým ložem.

Pro menší zařízení jsou vhodné generátory s pevným ložem s výkonem do 10 MW_t . Fluidní generátory jsou vhodné při aplikacích s vyšším nárokem na výkon, uvádí se minimální výkon 10 MW_t . Generátory s unášivým ložem nejsou v praxi hojně rozšířené (Kašpar, 2008).

Během zplyňování nastává několik dílčích procesů. Lze je rozdělit podle teploty a pochodů, které při těchto teplotách probíhají:

1. Fáze **sušení** za účelem odstranění vody při teplotách do $150 \text{ }^\circ\text{C}$.
2. Fáze **pyrolýzy**, při které vzniká plyn, plynné dehty, dřevěné uhlí. Teplota se pohybuje od $150 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Fáze **oxidace** pevného dřevěného uhlí při teplotě od $700 - 1\,500 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Fáze **redukce** za teploty $800 - 1\,100 \text{ }^\circ\text{C}$ (Kašpar, 2008).

2.3.4 Spalování

Podle definice je spalování odpadů řízené exotermické slučování hořlavých složek odpadu, tj. H, C, CO, CH_4 , C_xH_x a S s kyslíkem nebo s kyslíkem obsaženým ve vzduchu za stechiometrických nebo nadstechiometrických podmínek (ČSN 06 3090, 2007).

Výhodou technologie spalování, v porovnání s ostatními metodami zneškodňování odpadů, je především výrazná redukce původního objemu i hmotnosti odpadů. Zároveň dochází k podstatnému snížení organických kontaminantů v odpadech a zakoncentrování těžkých kovů popílku. Pro některé druhy odpadů, zejména odpady ze zdravotnických zařízení nebo odpady chemického průmyslu, je tento proces jedinou možností jejich zneškodnění (Obroučka, 2001). Dalším pozitivním jevem procesu je možnost využití uvolněného tepla při spalování nebo jeho přeměna na jinou formu energie, kterou lze sekundárně využívat. Obecná politika odpadového hospodářství však stanovuje, že spalovat by se mělo jen to množství odpadu, které již nelze znovu využít jako druhotné suroviny (Kuraš, 2008).

Principy spalování

V kapitole 2.2.2 (Druhy a vlastnosti spalitelných odpadů) byly shrnuty vlastnosti odpadů podmiňující použití technologie spalování jako způsobu zneškodňování odpadů. Je to zejména vhodný poměr popelovin, vlhkosti a hořlavín, které určují spalitelnost materiálu. Kromě těchto požadavků je spalování podmíněno ještě několika dalšími faktory, na kterých závisí úspěšné ekologické zneškodnění odpadu. Vzhledem k faktu, že součástí odpadů (na rozdíl od klasických paliv), mohou být příměsi škodlivých látek, je důležité dodržovat určité základní podmínky (Slivka a kol, 2006). Mezi ně patří:

1. **Dostatek spalovacího vzduchu** je 1,5 – 2,5 násobek stechiometrického množství. Tento přebytek pokrývá spotřebu vzduchu při spalování nestejnorodého odpadu, který se může ve směsi odpadu náhodou objevit.
2. **Dostatek tepla** je nezbytný k rychlému ohřátí odpadu na zápalnou teplotu, která se pohybuje v rozmezí 250 – 400 °C. Pokud by zahřívání odpadu probíhalo pomalu, nemusí dojít k úplnému spálení všech potenciálně nebezpečných škodlivin.
3. **Dostatečná teplota hoření** je nezbytná k udržení minimální technologické teploty v reakční komoře, závisí na druhu spalovaného odpadu. U komunálních odpadů tato teplota nesmí klesnout pod hodnotu 850 °C. Při spalování průmyslových odpadů musí zařízení obsahovat dohořivací komoru, která dokáže zabezpečit udržení teploty 1 100 °C po dobu minimálně 2 sekund (Kuraš, 2008).

Vzhledem k faktu, že spalování je z chemického hlediska oxidační (exotermický) proces, dochází při něm k tvorbě zpravidla nežádoucích sloučenin. Při spalování uhlíkatých látek za nedostatku kyslíku může vznikat oxid uhelnatý. Jeho produkci lze snadno regulovat přívodem optimálního množství spalovacího kyslíku, kdy vzniká oxid uhličitý. Na druhou stranu kyslík nespotebovaný spalováním za vysokých teplot oxiduje vzdušný dusík a tím vznikají nežádoucí dusíkaté sloučeniny – NO_x. Množství těchto sloučenin závisí na přebytku kyslíku a teplotě. Praxe naznačuje, že prakticky nelze dosáhnout úplného zamezení tvorby dusičnanů ve spalinách (Kuraš, 2008)

V případě, že spalovaný odpad obsahuje chlorovodíkové sloučeniny, jejich spalováním se tvoří toxické zplodiny, zejména chlorovodík, chlor a fosgen. Pokud se v odpadu nachází PCB (polychlorbifenylyl), pak za určitých podmínek mohou vznikat vysoce toxické polychlordibenzodioxiny a polychlordibenzofurany (PCDD/F). Všechny toxické produkty musí být zneškodněny v návazných čistících a zachycovacích procesech. Množství zplodin, vypouštěných do ovzduší, je zanedbatelné a podléhá přísné kontrole.

Spalovací režimy

Souhrnný termín spalovací režim zastupuje řadu procesních charakteristik, vyjadřuje například průběh tepelných toků, teplotu spalovaného odpadu, spalin a pece v závislosti na čase a době pobytu odpadu ve spalovacím zařízení. Spalovací režim je ovlivňován

konstrukčním provedením zařízení a charakterem práce, který je **periodický**, nebo **kontinuální**. V prvním případě se jedná o pracovní proces, kdy je do reakčního prostoru vložena celá dávka odpadu najednou. Po skončení spalování se musí nechat pec zchladnout a teprve poté dojde k vyjmutí tuhých zbytků a vyčištění spalovacího prostoru. Následně se může proces znovu opakovat. Dochází k výrazným změnám teplot a tepelných toků v reakční prostoru v závislosti na čase. Jedná se o tzv. nestacionární tepelný režim. V případě kontinuálně pracujícího zařízení, kterým odpad prochází plynule po dobu potřebnou k uskutečnění spalovacího procesu, je tepelný režim stacionární. Teploty a tepelné toky jsou v zásadě konstantní po celou dobu práce (Obroučka, 2001).

Výhody a nevýhody spalování

Termické zneškodňování odpadu metodou spalování je charakterizováno řadou významných předností. Jedná se zejména o značné snížení hmotnosti odpadu na 20 – 40 % hmotnosti původní, což odpovídá snížení objemu přibližně o 80 – 90 %. V porovnání s jinými metodami zneškodňování odpadu je tato redukce mnohem vyšší. Další výhodou této technologie je fakt, že u mnoha druhů odpadů, např. zvláštní nemocniční odpady, některé druhy průmyslových odpadů, se prakticky jedná o jedinou vhodnou metodu zneškodnění. Vzniklé tuhé produkty po spalování nepodléhají dalšímu rozkladu a jsou sterilní (Malat'ák, 2006). Při samotném procesu spalování dochází k uvolňování tepla, které lze účelně využívat pro tvorbu elektrické energie, páry, ohřev užitkové vody apod. Dalším pozitivním faktorem této technologie je doba zpracování odpadu. Zatímco rozložení biologicky rozložitelného odpadu metodou kompostování trvá řádově několik měsíců, celková přeměna odpadu metodou skládkování až několik desítek let a není s jistotou zaručeno, že všechny uložené odpady budou náležitě zneškodněny. Pak lze spalování z pohledu doby zpracovávání považovat za nejvhodnější technologii. Doba procesu závisí na druhu konstrukčního uspořádání pece, typu odpadu, spalovacích charakteristik atd. Obecně se pohybuje v řádu desítek minut (Obroučka, 2001).

Technologie spalování odpadů má však i své negativní stránky. Jde především o vysoké investiční náklady na výstavbu, dále značné náklady na provoz a údržbu. Nezbytnou součástí zařízení jsou odlučovače pro čištění spalin, respektive opatření zabraňující úniku emisí do ovzduší a vody. Nevýhodou může být i požadavek na vysoce kvalifikovaný personál provozu a údržby. V neposlední řadě může být za nevýhodu považován i fakt, že dojde k zneškodnění odpadních látek, které by mohly být potenciálně sekundárně využity například metodou recyklace (Malat'ák, 2006).

Výběr metody zneškodňování odpadů závisí na široké škále vstupních faktorů, vyžaduje vždy odpovědné zvážení všech pozitivních i negativních aspektů daného postupu. V souvislosti s metodou spalování jsou zpravidla rozhodujícími faktory emise škodlivin, které jsou paradoxně poměrně malé, a náklady na zneškodnění odpadu. V porovnání s ostatními

technologemi jsou investiční náklady i náklady na jednu tunu zpracovaného odpadu metodou spalování relativně vysoké, což může tuto technologii činit investičně problematickou.

2.3.5 Porovnání metod termických procesů

Následující tabulka shrnuje základní charakteristiky posuzovaných technologií termického zpracování odpadů. Zobrazuje za jakých fyzikálních a chemických podmínek procesy probíhají a jaké produkty vznikají.

Tabulka 3: Typické reakční podmínky a produkty termických procesů

| | Pyrolýza | Zplyňování | Spalování |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Reakční teplota [°C] | 250 - 700 | 500 - 1600 | 800 - 1450 |
| Tlak [kPa] | 100 | 100 - 4500 | 100 |
| Atmosféra | dusík | H ₂ O, O ₂ | vzduch |
| Stechiometrický poměr | 0 | <1 | >1 |
| Produkty | | | |
| Plynná fáze | H ₂ , H ₂ O, uhlovodíky, CO, N ₂ | CO ₂ , H ₂ , CO, CH ₄ , H ₂ O, N ₂ | H ₂ O, CO ₂ , N ₂ , O ₂ |
| Pevná fáze | Popel, koks | Popel, škvára | Popel, škvára |
| Kapalná fáze | Pyrolýzní olej a voda | | |

(European commission, 2006)

2.4 Technologie a technika zpracování vedlejších produktů

2.4.1 Charakteristika znečišťujících látek

Podle platné legislativy jsou pod pojmem znečišťující látky označovány tuhé, kapalné a plynné látky, které přímo či nepřímo nepříznivě ovlivňují ovzduší, a tím ohrožují a poškozují zdraví lidí, ostatních organismů nebo majetek (Herčík, a další, 2008).

Znečišťující látky ovzduší jsou hmotné látky, které negativním způsobem ovlivňují životní prostředí. Toto nepříznivé ovlivňování se může projevovat těmito způsoby:

- škodami na zdraví lidí a zvířat;
- poškozováním prostředí;
- nepříznivými změnami přirozeného ovzduší;
- obtěžováním okolí (pachem, snížením viditelnosti atd.).

Nejčastěji se znečišťující látky rozdělují podle:

- skupenství;
- chemického složení;
- míry škodlivosti (nebezpečnosti, rizikovosti) (Herčík, a další, 2008).

Znečišťující látky se podle skupenství rozdělují na tuhé, kapalné a plynné. V praxi se znečišťující látky rozdělují dále podle různých hledisek, například způsobu odlučování, stanovení úletu, apod. Z hlediska chemického složení se dělí do skupin podle sloučenin určitých prvků (Herčík, a další, 2008).

Tuhé a kapalné znečišťující látky

Částečky tuhých a kapalných znečišťujících látek mohou se vzduchem vytvářet dvojfázové disperzní systémy, kde je vzduch disperzním prostředím a tuhé či kapalné částice dispergovanou látkou. Podle stability celého systému tyto látky rozdělujeme na prachy a aerosoly (Grünwald, 1999).

Pod pojmem prach rozumíme malé částečky tuhých látek, které mají po rozptýlení v klidném disperzním systému pádovou rychlost odpovídající zákonům volného pádu. Do této skupiny řadíme polétavé prachy, hrubé prachy, jemné prachy a různé další nečistoty.

Pod pojmem aerosol jsou zahrnovány tuhé a kapalné částečky, které tvoří stabilní systém i po rozptýlení v klidném disperzním prostředí, mají zanedbatelnou tzv. sedimentační rychlost (Herčík, a další, 2008).

Podle vzniku aerosoly rozdělujeme na:

- **disperzní** vznikající rozmělněním nebo destrukcí látek (prachové aerosoly, kouře);
- **kondenzační** vznikající srážením par nebo reakcemi v ovzduší (mlhy, dýmy, opary).

Velikost částic aerosolů se pohybuje v rozmezí od 10^{-2} do 10^2 μm , tj. od makromolekul až po jemné částice prachu. Po nárazu ulpívají částice menšího průměru na předmětu (špinění budov, textilu) nebo na zemském povrchu. V ovzduší vykonávají tzv. Brownův (nepravidelný) pohyb a při vzájemných nárazech koagulují, shlukují se do větších celků. Částice větší než 0,1 – 0,5 μm se usazují, sedimentují.

Z pohledu ochrany životního prostředí jsou významné aerosoly, které mají inertní, toxický či karcinogenní charakter. Původ aerosolů je:

- **přírozený** – zvířený prach ze zemského povrchu, popel z lesních požárů, apod.,
- **umělý** – zemědělská, průmyslová činnost, doprava, apod. (Herčík, a další, 2008).

Plynné znečišťující látky

Plynné škodliviny se do ovzduší dostávají vlivem nejrůznějších chemických reakcí, elektrickými výboji, vulkanickou činností atd. Koncentrace těchto plynů je obecně velmi nízká. Nejvyšší množství škodlivin se do ovzduší dostává vlivem lidské činnosti. Jedná se zejména o zplodiny vznikající spalováním paliv, používaných k vytápění domácností, průmyslu, v energetice, v dopravě a k jiným účelům. Dalším významným zdrojem těchto škodlivin jsou průmyslové technologie hutnického a chemického průmyslu a koksárenství (Herčík, a další, 2008).

2.4.2 Škodliviny ze spalování

Jednotlivé druhy paliv se liší svými vlastnostmi jako je výhřevnost, vlhkost, chemické složení, apod. To značným způsobem ovlivňuje spalovací proces a vznik znečišťujících látek. Z hlediska tvorby škodlivin má velký význam kvalita spalování. Významným faktorem ovlivňující kvalitu spalování je přísun množství kyslíku. Nedokonalé spalování se vyznačuje

podstechiometrického množství přiváděného kyslíku do spalovací komory, což způsobuje produkci nežádoucích produktů spalování. Hoření značně ovlivňuje také způsob a kvalita směšování paliva se spalovacím vzduchem. Mezi další faktory patří teplota, délka spalovacího procesu apod. V následující tabulce je uveden přehled látek vznikajících spalováním včetně jejich škodlivých vlastností (Kropáč, a další, 2013).

Tabulka 4: Nebezpečné vlastnosti škodlivých složek ve spalínách (Koppejan, a další, 2007)

| Škodlivina | Dopady na klima, prostředí a zdraví obyvatel |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CO ₂ | Skleníkový efekt (přímo) |
| CO | Skleníkový efekt (nepřímo); vliv na astma a embrya |
| TZL | Skleníkový efekt (nepřímo); vliv na respirační systém, karcinogenní |
| NO _x | Skleníkový efekt (přímo i nepřímo); způsobují smog, kyselé deště, korozi materiálů a poškozuje vegetaci; vliv na respirační systém |
| SO _x | Skleníkový efekt (přímo i nepřímo); způsobují smog, kyselé deště, korozi materiálů a poškozuje vegetaci; vliv na respirační systém a astma |
| HCl | Způsobuje kyselé deště, korozi materiálů a poškozuje vegetaci; vliv na respirační systém, toxický |
| HF | Způsobuje kyselé deště, korozi materiálů a poškozuje vegetaci; vliv na respirační systém, toxický |
| PAH | Způsobují smog; karcinogenní |
| VOC | Skleníkový efekt (nepřímo); vliv na respirační systém |
| CH ₄ | Skleníkový efekt (přímo i nepřímo), má několikanásobně větší negativní vliv na klima než často uváděný oxid uhličitý |
| PCDD/F | Vysoce toxické; akumulují se v potravinovém řetězci; poškozují játra, centrální nervový systém a imunitu |
| NH ₃ | Způsobuje kyselé deště, korozi materiálů a poškozuje vegetaci; vliv na respirační systém |
| O ₃ | Skleníkový efekt (přímo); způsobuje smog, korozi materiálů a poškozuje vegetaci; vliv na respirační systém a astma |
| Těžké kovy | Některé jsou toxické a/nebo karcinogenní (především Hg, Cd, Tl a As); akumulují se v potravinovém řetězci |

Oxid uhličitý (CO₂) a oxid uhelnatý (CO)

Oxid uhelnatý je hořlavý, bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, který je o málo lehčí než vzduch. Je nedráždivý, avšak značně jedovatý pro lidský organizmus. Vzniká při spalování uhlikatých látek za nízkých teplot a při nedostatečném přístupu kyslíku. Je tedy dobrým indikátorem kvality spalovacího procesu. Při dostatečném přístupu kyslíku při spalování odpadů dochází k oxidaci oxidu uhelnatého na oxid uhličitý, který je lidskému organismu méně nebezpečný a běžně se vyskytuje v atmosféře.

Tuhé znečišťující látky

Tuhé znečišťující látky jinak též nazýváme polétavý prach nebo popeloviny. Jsou přirozenou součástí atmosféry. Jedná se různorodou směs tuhých částic s velikostí od 1 nm do 100 μm. Podle velikosti se zařazují do kategorií PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{0,1}¹. Směs prachu a vzduchu se nazývá aerosol a významně se podílí na atmosférických procesech. Vznikají běžně v přírodě například sopečnou činností, při lesních požárech apod. nebo antropogenní činností jako produkty spalování fosilních paliv, stavební činností, těžbou atd. (Vágnerová). Tuhé znečišťující látky, které vznikají při spalování odpadů, mohou na svůj povrch absorbovat škodlivé látky, jako jsou například těžké kovy, dioxiny a furany. To zvyšuje

¹ PM – particulate matter ... prachová částice

význam odprášení spalin v mechanických odlučovačích a filtrech. Zachycené částice je nutné bezpečně zpracovat (Kropáč, a další, 2013).

Oxidy dusíku (NO_x)

Oxidy dusíku jsou produktem oxidace dusíku. Jedná se zejména o tři sloučeniny. Zaprvé bezbarvý a bezzápachý oxid dusnatý NO, který patří do kategorie tzv. skleníkových plynů a jeho kumulace v atmosféře přispívá ke globálnímu oteplování. Za druhé je to červeno-hnědý oxid dusičitý, štiplavého zápachu, který je společně s oxidy síry součástí tzv. kyselých dešťů. Ty mají negativní vliv na vegetaci, stavby a dále okyselují vodní plochy a toky. Tento plyn přispívá k tvorbě přízemního ozonu a vzniku tzv. fotochemického smogu. Má negativní vliv na živé rostliny včetně mnohých zemědělských plodin. Za třetí se jedná o oxid dusný N₂O tzv. rajský plyn, který vzniká při spalování za nízkých teplot. Tento plyn má značný význam v souvislosti se skleníkovým efektem a taktéž negativně přispívá ke globálnímu oteplování (CENIA, 2002).

Rozlišují se tři základní způsoby vzniku oxidů dusíku ve spalinách: palivové NO_x, kde rozhodující roli hraje množství dusíkatých sloučenin přímo v palivu a dále velikost přebytku vzduchu při hoření. Dále to jsou termické NO_x, které vznikají ze vzdušných molekul N₂, účastnících se procesu hoření. Jejich množství je ovlivněno zejména dobou setrvání a teplotou spalovacího procesu. Zatřetí promptní NO_x, jejichž produkce roste se stoupající teplotou spalování (Kropáč, a další, 2013).

Oxidy síry (SO_x)

Do této skupiny patří dva plyny, oxid siřičitý (SO₂) a oxid sírový (SO₃). Oxid siřičitý je bezbarvý, nehořlavý, štiplavě páchnoucí, toxický plyn. Při spalování paliv obsahujících síru dochází z 95 % ke vzniku SO₂, pouze malá část oxiduje na SO₃. Tento plyn je snadno rozpustný ve vodě, čímž vzniká kyselina sírová, která společně s oxidy dusíku způsobuje kyselé deště. Ne všechna síra obsažená v palivu oxiduje, nepatrné množství zůstává v popelovinách a část je emitována ve formě solí (CENIA, 2002).

Halogenvodíky

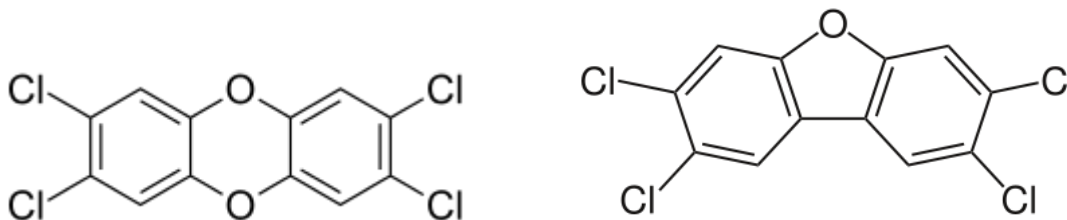
Halogenvodíky jsou silně toxické a rakovinotvorné dvouprvkové sloučeniny vodíku s halogenem: chlor (HCl), fluor (HF), brom (HBr), jód (HI). Při spalování odpadů se nejčastěji setkáváme s kyselinou chlorovodíkovou a fluorovodíkovou, pro které jsou určeny emisní limity. Bromovodík a jodovodík nejsou z hlediska legislativy regulovány. Z normálních podmínek se tyto sloučeniny vyskytují v plynném stavu. Jsou to velmi silné bezbarvé kyseliny s extrémně silným zápachem. Při kontaktu s lidským organismem způsobují popálení očí, kůže, nosu, dýchacích cest apod. Tyto plyny jsou velmi reaktivní a způsobují korozi kovových materiálů, což má negativní vliv na stav spalovacího zařízení. Přispívají také k existenci kyselých dešťů (CENIA, 2002).

Těžké kovy

Jedná se o kovy a metaloidy, které jsou stabilní a jejich hustota je větší než $4,5 \text{ g cm}^{-3}$. Mezi těžké kovy, které jsou významné z hlediska emisí a především lidského zdraví patří zejména olovo, arsen, nikl, kadmium a rtuť. Po spalování mohou zůstat v popelovinách, odpařit se do spalin, nebo pokrýt povrch emitovaných částic, které jsou účinně odlučovány společně s popílkem. Obecně lze říci, že k překročení emisních limitů sledovaných látek dochází jen velmi zřídka (Kropáč, a další, 2013).

Perzistentní organické polutanty (POP)

Do této skupiny se zařazují toxické organické látky, které se vyznačují schopností dlouhodobě beze změny setrávat v prostředí. Akumulují se v půdách i živých organizmech. Jejich tvorbu nelze úplně potlačit, neboť vznikají antropogenní i přírodní činností (požáry, výbuchy sopek, apod.). Z hlediska toxicity jsou významné zejména chlorované deriváty: polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF), které mohou obsahovat 1 až 8 atomů chloru na molekulu. Bylo zjištěno, že počet atomů chloru a jejich poloha určuje jejich míru toxicity. Existují přibližně dvě stovky možných izomerů těchto látek. Nejtoxičtější z nich se jeví 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-p-dioxin a 2,3,7,8-tetrachlordibenzofuran (Kizlink, 2012).



Obrázek 2: Strukturální vzorec molekuly
2,3,7,8-tetrachlordibenzo-p-dioxin a 2,3,7,8-tetrachlordibenzofuran (Kizlink, 2012)

PCDD a PCDF jsou krystalické látky s vysokým bodem tání a malou rozpustností ve vodě. Oproti tomu poměrně dobře rozpustné v organických rozpouštědlech a tucích. Jsou nebezpečné i ve stopovém množství, poškozují vnitřní orgány a imunitní systém, mají negativní dopad na reprodukci živočichů vč. člověka a způsobují rakovinu (Kizlink, 2012).

Při spalování odpadů dioxiny a furany mohou vznikat dvěma způsoby: nedokonalým spalováním uhlíkatých látek za nízkých teplot nebo nedostatečné době setrvání ve spalovacím prostoru. Dále mohou vznikat při chlazení spalin, tzv. novosyntéza. Jedná se o rekombinaci fragmentů vzniklých při spalování rozkladem chlorovaných sloučenin. Základním opatřením snížení emisí ve spalinách je zejména předcházení jejich vzniku. Musí být dodržena předepsaná teplota spalování, doba setrvání ve spalovací komoře a přísun dostatečného množství vzduchu ve spalovací zóně. I přestože jsou tyto podmínky dodrženy, v praxi dochází k elementární tvorbě dioxinů a furanů. Z toho důvodu musí být použita taková technologická opatření, která zajistí snížení emisí těchto látek podle platné legislativní normy (Kuraš, 2014).

2.4.3 Čištění spalin

Zařízení pro termické zneškodňování odpadů přináší řadu pozitivních aspektů do problematiky nakládání s odpady, přesto jejich využití není zcela bez negativních vlivů na prostředí. Je nutné nadále nakládat s produkty těchto technologických procesů tak, aby došlo k jejich ošetření a dodržení všech limitů vycházejících z legislativní normy (Obroučka, 2001).

Z toho důvodu jsou v současné době spalovny nebezpečných odpadů vybaveny složitou technologií na čištění spalin, která se velmi významně promítá v celkových investičních nákladech zařízení. Technologie využívá zpravidla třístupňového systému čištění spalin, které jsou založeny na různých fyzikálních, chemických a fyzikálně chemických postupech.

2.4.3.1 Technologie odlučování emisí tuhých látek

Prachové částice obsahující vysoké množství škodlivých látek jsou významnou složkou produktů spalovacího procesu, které patří mezi hlavní zdroje potenciálních emisí. Jejich obsah ve spalinách závisí na mnoha faktorech: obsah popela v odpadu, výška lože odpadu, množství spalovacího vzduchu přiváděného pod rošt, stupeň promíchávání odpadů a rychlost proudění plynu.

Prachové částice lze zachycovat různými typy odlučovačů, které pracují podle různých principů, s rozdílnou účinností. Na základě těchto vlastností rozlišujeme vhodnost zařízení pro jednotlivé druhy prachů. Podle principu fungování odlučovače dělíme na:

- a) mechanické,
- b) filtry,
- c) elektrostatické (Obroučka, 2001).

a) Mechanické odlučovače

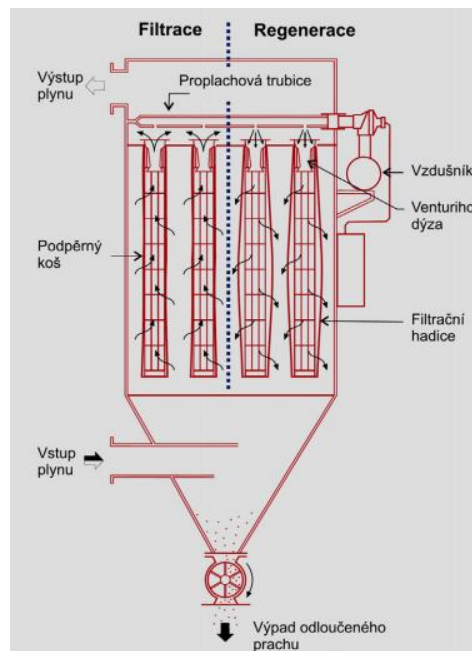
Princip práce mechanických odlučovačů je založen na gravitační a setrvačné (odstředivé) síle, kdy dochází k oddělení pevných částic a plynu vlivem rozdílných hustot.

Snížením rychlosti proudění plynu v důsledku rozšíření průřezu potrubí dochází k pádu prachových částic do výsypek vlivem své vlastní tíhy. Tento nejjednodušší typ odlučovače, tzv. prachová komora, je v praxi kvůli své nízké účinnosti málo využívána.

Obvyklejším typem mechanických odlučovačů jsou tzv. cyklony, které využívají principu odstředivé síly. Zařízení má cylindrický tvar, do kterého je v horní části vhnán plyn. Plyn je uveden do rychlého rotačního pohybu. Při rotaci prachových částic dochází ke kontaktu se stěnou odlučovače, po níž sklouzávají tuhé částice do výsypky. Vyčištěný vzduch odchází průduchem v horní části komory. Sdružováním více odlučovačů vznikají sestavy s vyšší účinností, tzv. multicyklony, které zvyšují účinnost čištění (Obroučka, 2001). Výhodou jsou nízké pořizovací náklady, malé nároky na údržbu, malá tlaková ztráta, široké rozmezí pracovních teplot a spolehlivost.

b) Filtry

V praxi se nejčastěji využívají tzv. tkaninové nebo také rukávcové filtry, které mají velmi vysokou účinnost a dají se použít pro odloučení pevných částic libovolné velikosti, včetně částic o submikronovém rozměru. Znečištěný vzduch vstupuje do spodní části skříně látkového filtru, kde dochází k částečnému odloučení hrubých částic prachu vlivem snížení rychlosti proudění. Plyn dále stoupá vzhůru a prochází skrz tkaninové filtry, na kterých ulpívají pevné částice a vytvářejí souvislou vrstvu prachu. Činnost filtru je neustále monitorována na základě diferenciálního tlaku napříč filtrem. V případě snížení propustnosti filtru a poklesu tlaku je nutné filtr vyměnit, nebo provést tzv. pulzní regeneraci. Jedná se o proces, kdy se přivádí na vnitřní stranu filtru stlačený vzduch. Tím dochází k odtržení usazené vrstvy prachu, který padá do výsypky (TWG, 2004). Výhodou této technologie jsou nízké pořizovací náklady, spolehlivost a vysoká účinnost. Nelze ji však využívat pro zachycování vlhkých plynů (Obroučka, 2001).

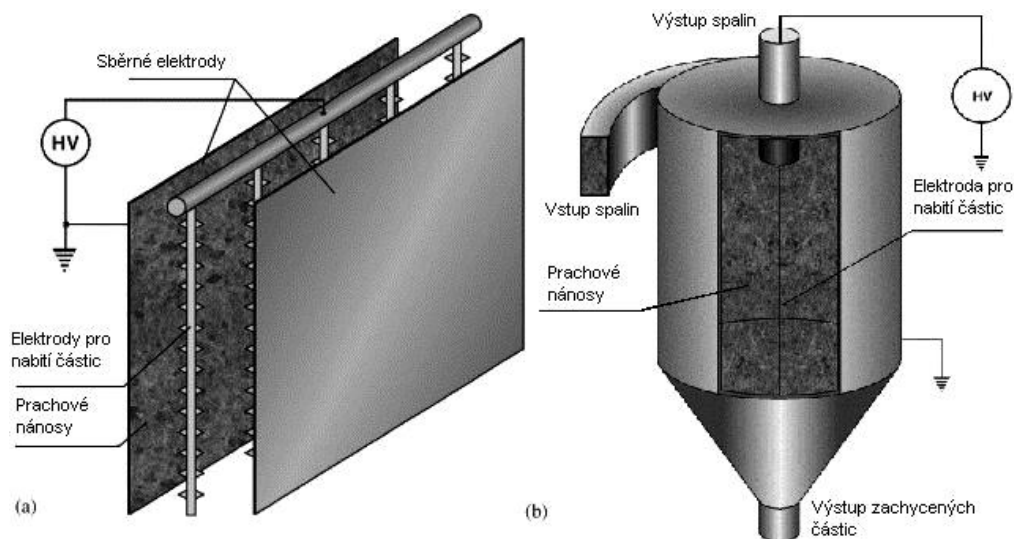


Obrázek 3: Schéma látkového filtru s pulzní regenerací (ZVVZ - Enven Engineering, a.s.)

c) Elektrostatické odlučovače

Elektrostatické odlučovače pracují na principu přitažlivých sil mezi elektricky nabitými částicemi prachu a sběrací elektrodou s opačným nábojem. Plyn, který vstupuje do pracovní komory, je nejprve ionizován pomocí stejnosměrných vysokonapěťových elektrod. Tyto částice jsou pak následně přitahovány k opačně nabitě sběrací elektrodě, na které ulpívají. Sběrací elektrodu je nutné pravidelně čistit, aby byla zabezpečena správná funkčnost zařízení (Obroučka, 2001). S rostoucí vrstvou popílku na elektrodě stoupá také měrný elektrický odpor popílku. Pokud tato hodnota stoupne k 10^{11} - 10^{12} Ωcm , snižuje se účinnost odlučování částic. Dalším faktorem ovlivňující účinnost je pracovní teplota. Ta by se měla pohybovat v rozmezí do 250 °C. Při vyšších teplotách dochází k výrazně nižší účinnosti zachycování dioxinů

a furanů (Evropská komise, 2005). Výhodou elektrostatických odlučovačů je vysoká účinnost pro odlučování velkých i malých částic. Dále pak malá tlaková ztráta. Nevýhodou je z hlediska investičních nákladů vyšší pořizovací cena (Kropáč, a další, 2013). Na následujícím obrázku jsou zobrazeny dvě možná provedení elektrostatického odlučovače.



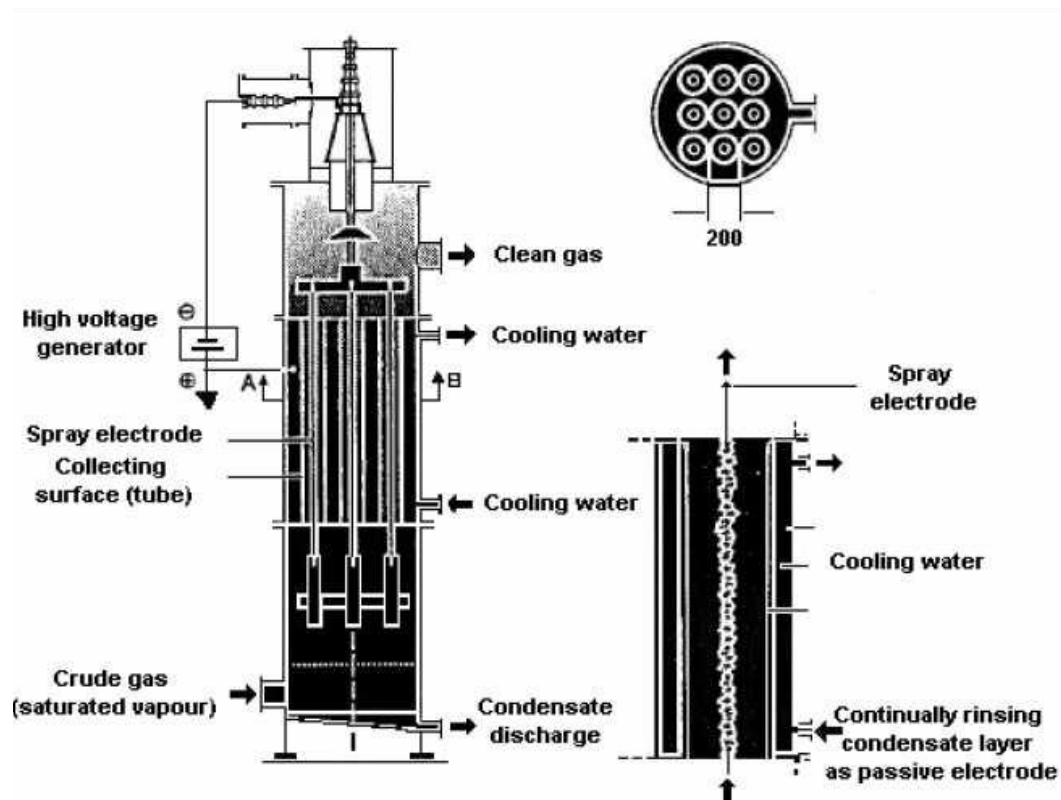
Obrázek 4: Různá provedení elektrostatických odlučovačů a) plochý, b) válcový kombinovaný s cyklónovým odlučovačem (Jaworek, a další, 2007)

Mokrý elektrostatické odlučovače

Tento druh odlučovače je založen na stejném technologickém principu jako ostatní elektrostatické odlučovače. V tomto případě se však popel odloučený na sběrných deskách propírá kapalinou, nejčastěji vodou. To lze provádět periodicky, nebo kontinuálně. Uvedenou technologii je vhodné využívat v případech, kdy do odlučovače vstupuje také vlhkost nebo ochlazené spaliny (Evropská komise, 2005).

Kondenzační elektrostatické odlučovače

Tento typ odlučovače se používá k odlučování velmi jemných, tuhých, kapalných nebo lepkavých částic. Jeho uplatnění je proto zejména ve spalovnách nebezpečných odpadů. V tomto případě jsou sběrné povrchy tvořeny vertikálními plastovými trubkami sestavenými do svazků, které jsou zvenčí chlazeny vodou. Spaliny, které obsahují prach, se nejdříve zchladí na teplotu rosného bodu v šokovém chladiči pomocí přímého vstřikování vody a následně se nasatí parou. Ochlazením plynů ve sběrných trubkách vznikne vlivem kondenzace par tenká tekutá vrstva na vnitřním povrchu trubek. Ty jsou elektricky uzemněny a fungují jako usazovací elektrody. Vlivem elektrického pole se částice usazují mezi elektrodami v osách trubek a kondenzační vrstvě. Kondenzační vrstva zajišťuje současně plynulé odvádění usazených částic z pracovního prostoru. Neustálé vlhčení zabraňuje tvorbě suchých míst a nálepů (Evropská komise, 2005).



Obrázek 5: Kondenzační elektrostatičké odlučovač (Evropská komise, 2005)

Legenda:

High voltage generator

- generátor vysokého napětí

Spray electrode

- rozprašovací elektroda

Collecting surface (tube)

- sběrný povrch (trubky)

Crude gas (saturated vapour)

- surový plyn (nasycená pára)

Condensate discharge

- vypouštění kondenzátu

Cooling water

- chladicí voda

Continually rinsing condensate layer as passive electrode

- nepřetržitě kapající vrstva kondenzátu jako pasivní elektroda

Clean gas

- vyčištěný plyn

Ionizační mokré pračky plynů

Tato technologie je založena na principu kombinace elektronického filtru a absorpční náplně. Zařízení vyžaduje málo energie, má vysokou účinnost a využívá se pro odstranění různých znečišťujících látek z toku spalin. Tzv. ionizační mokrá skrubr, jak se jinak také pojmenovává, je kombinací následujících principů:

- elektrostatičké nabíjení částic, elektrostatičká přitažlivost a usazování aerosolových částic (menších než 5 μm),
- vertikální usazování hrubých, kapalných a pevných částic (menších než 5 μm),
- absorpce nebezpečných, korozičních a zápachajících plynů (Evropská komise, 2005).

Před každým stupněm náplňové věže se nachází zóna vysokého napětí, jejíž funkcí je ionizovat částice (prach, aerosol, částice menší než 1 μm) obsažených ve spalinách. Záporně nabitě částice indukují opačné náboje na neutrálním povrchu náplně a na padajících kapkách

vody. Tím jsou přitahovány a vymývány v náplňovém oddíle. Jedná se o tzv. IF přitažlivost (image-force), která je dána pohybem elektronů. Nebezpečné, korozivní a zapáchající plyny jsou absorbovány stejným médiem. Jako nezávadné sloučeniny odchází ze zařízení spolu s odpadními vodami.

2.4.3.2 Technologie snižování obsahu kyselých plynů

Ve druhém stupni čištění dochází k odstranění kyselých anorganických plynů (oxidů soli např. SO₂ a halogenvodíků, např. HCl, HF). K odstranění těchto složek ze spalin se využívá sorbčních činidel vstříkovaných do spalin. Rozdělujeme je podle fyzikálního stavu do tří skupin: suché, polosuché a mokré procesy (Obroučka, 2001).

Suché procesy

Principem je vstříkování sorbentů v podobě suchého prášku, nejčastěji se používá vápno, nebo uhličitan sodný. Činidlo je rozprašováno přímo do odpadu a směs putuje do reaktoru. Při reakci kyselých složek se sorbentem vznikají neutrální prachové látky, které jsou následně čištěny v mechanických odlučovačích, nejčastěji v rukávcových filtrech. Výhodou těchto systémů je zejména fakt, že nevznikají žádné odpadní vody. Po reakci se do proudu spalin obvykle vstříkuje malé množství aktivního uhlí, které pohlcuje těžké kovy dioxiny a furany (Evropská komise, 2005).

Polosuché procesy

V tomto případě je alkalické sorpční činidlo dávkováno v kapalně podobě jako suspenze, nebo roztok. Nejprve dojde k odpaření vody a k úplnému vysušení původně vodného pracího média, zbytek procesu je stejný jako v případě suchého systému. Výhodou je přímé využití tepla přímo ze spalin, čímž dochází k ochlazení spalin (Obroučka, 2001). V praxi je také používán systém na pomezí suchého a polosuchého procesu. V tomto systému je část pevných látek zachycených na rukávcovém filtru opětovně vstříkována do vystupujících spalin. K zachycenému popílku a reakčním činidlům je přidávána voda ve stanoveném poměru. Tím je zabezpečen volný průchod směsi a nedochází k lepení a drolení (Evropská komise, 2005).

Mokré procesy

U mokrých systémů jsou spaliny čištěny v tzv. sprchových pračkách oběhovou vodou, která je alkalizována přídatkem vápenného mléka. Dosahuje se velice účinného vyčištění spalin od kyselých složek, stejně tak od prachových částic. Nevýhodou je skutečnost, že v procesu vznikají netoxické solné odpadní vody, které je nutné dále zpracovávat (Obroučka, 2001). Existuje několik typů zařízení pracujících na základě mokrého procesu.

- tryskové pračky
- otáčivé pračky
- venturi pračky
- suché věžové pračky
- rozprašovací pračky
- náplňové věžové pračky

V první stupni jsou odlučovány především sloučeniny HCl a HF. Vznikající odpadní vody jsou několikrát recyklovány s přidáváním malého množství vody. Ve druhém stupni je odlučován oxid siřičitý za zásadité, nebo neutrální hodnoty pH, kdy se do proudu spalin přidává roztok hydroxidu sodného nebo vápenného mléka. Obecně platí, že používáním vápenného mléka nebo vápence neutralizačního činidla dochází k akumulaci síranů, uhličitánů a fluoridů ve formě ve vodě nerozpustných zbytků. Dané sloučeniny se odstraňují, čímž se dosáhne snížení koncentrace soli v odpadních vodách. V případě použití hydroxidu sodného jako neutralizačního činidla tento proces odpadá, vzhledem k tomu, že reakční produkty jsou rozpustné ve vodě. Na druhou stranu vzniká uhličitán vápenatý, který tvoří v pračce usazeniny. Ty je potřeba pravidelně odstraňovat okyselením.

Některé spalovny používají odpadní vodu k šokovému chlazení spalin, ke kterému dochází přímo za spalovacím prostorem. Tím dochází k ochlazení spalin na přípustnou hodnotu a nedochází k poškození čistícího zařízení vlivem vysoké teploty spalin. Provádí se intenzivním skrápěním vodou nebo odpadním roztokem, což napomáhá také k čištění spalin od jemných prachových částic, halogenvodíků a oxidu siřičitého (Evropská komise, 2005).

2.4.3.3 Technologie snižování emisí oxidů dusíku, dioxinů a furanů

Třetí stupeň čištění spočívá v odstraňování organických látek ze spalin zejména:

- halogenové aromatické uhlovodíky,
- polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH),
- benzen, toluen a xylen (BTX),
- polychlorované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany (PCDD/F),
- a další.

K odstranění těchto produktů se používají různé metody, mezi které patří:

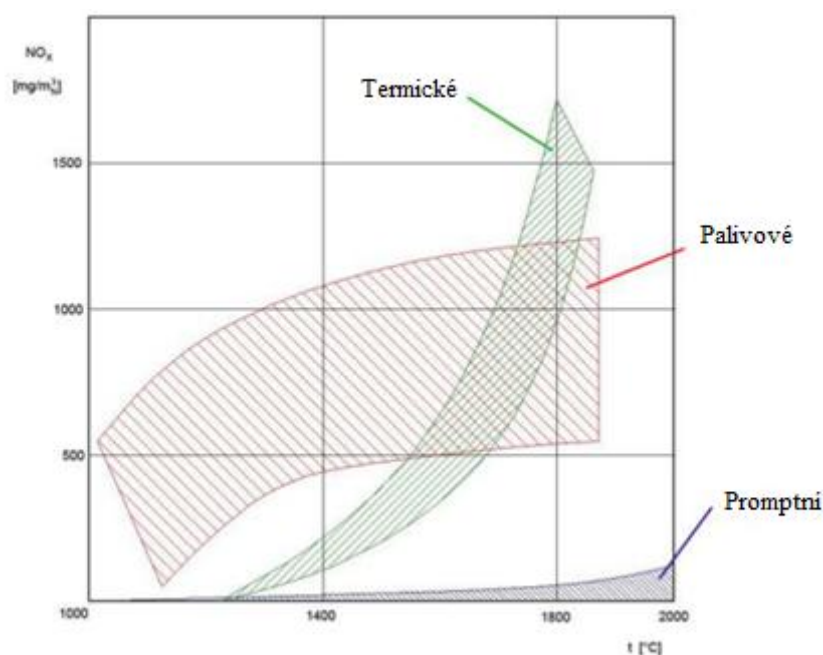
- adsorpce s aktivním uhlím, kdy je uhlí vsřikováno do spalin a následně vyfiltrováno z proudu plynu v rukávcových filtrech;
- systém SCR – odstraňování plynných PCDD/F za pomoci katalytické oxidace;
- katalytické rukávcové filtry, které jsou impregnované katalyzátorem, nebo se katalyzátor mísí přímo s organickým materiálem při výrobě vlákna. Běžná provozní teplota by měla dosahovat teploty nad 190 °C;
- systém použití plastů impregnovaných uhlíkem k adsorpci PCDD/F. Plasty mají vysokou odolnost vůči korozi, z toho důvodu jsou často používány (Šaldová, 2012).

Odstraňování oxidů dusíku NO_x

Vysokoteplotní procesy jsou doprovázeny tvorbou oxidů dusíku, které jsou souhrnně označovány NO_x. Vznik těchto sloučenin lze regulovat již na úrovni spalovacího procesu, kdy se nastavují podmínky pro maximální možné omezení tvorby těchto sloučenin. Obecně lze

vznik NO_x snížit omezením přívodu vzduchu do spalovacího procesu, aby nedocházelo k nadbytečné oxidaci atmosférického dusíku a snížením spalovací teploty. Produkce těchto sloučenin roste exponenciálně při teplotách nad 1 300 °C. Důležitou roli ve spalovacím procesu hraje rovnoměrný přívod primárního a sekundárního spalovacího vzduchu, které ovlivňuje rozdělení teplot ve spalovacím prostoru, a tím tedy možnost vzniku NO_x (Jedlička, a další, 2012).

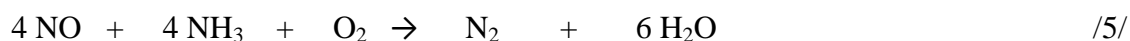
V některých případech se využívá princip postupného spalování. To zahrnuje snižování dodávek kyslíku v primární reakční zóně a následné zvýšení dodávky kyslíku v navazujících spalovacích zónách, kde se oxidují vznikající plyny. Taková technologie vyžaduje efektivní turbulentní proudění vzduchu v sekundární zóně, aby se vznik produktů nedokonalého spalování držel na minimální úrovni.



Obrázek 6: Závislost vzniku NO_x na teplotě (Ibler, a další, 2002)

Podle směrnice 200/76/ES jsou denní limity průměrné koncentrace NO_x v čistém plynu $200 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$. Pokud se tedy ve spalinách sloučeniny dusíku vyskytují, je nutné zavést sekundární opatření. Obecně se osvědčilo použití amoniaku nebo močoviny jako prostředků na snížení koncentrace NO_x . Amoniak i močovina se aplikují ve vodných roztocích s koncentrací okolo 25 % (Evropská komise, 2005).

Rovnice reakcí:

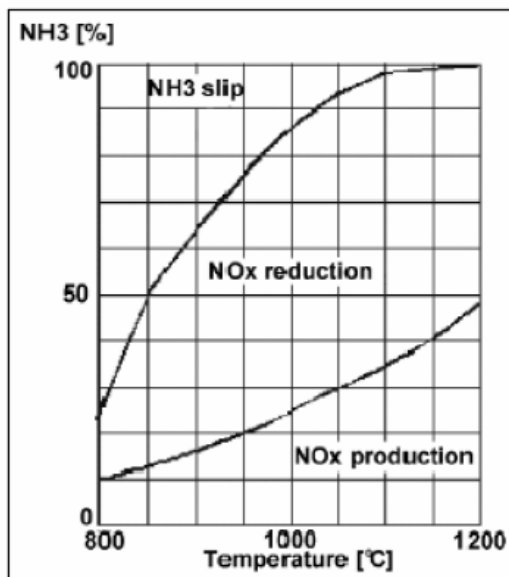


Existují dvě odlišné technologie:

1. Nekatalytický (horký) proces, kdy je redukční činidlo vstřikováváno do horkých reakčních prostorů spalovací komory a reaguje s oxidy dusíku.
2. Katalytický proces, kdy je amoniak ve formě směsi se vzduchem přidáván do spalin a prochází přes speciální katalyzátor (Obroučka, 2001).

Selektivní nekatalická redukce (SNCR)

Principem tohoto procesu je odstraňování dusíku selektivní nekatalyckou redukcí. Redukční činidlo, kterým je obvykle čpavek nebo močovina, se vstříkují do pece a reaguje s oxidy dusíku. Reakční teplota se pohybuje v rozmezí 850 – 1 000 °C. V 60 – 80 % případů redukce oxidů dusíku pomocí této metody vyžaduje větší množství redukčního činidla, což způsobuje emise čpavku (Jedlička, a další, 2012).



Obrázek 7: Graf redukce NO_x , tvorbou NO_x v závislosti na teplotě (Evropská komise, 2005)

Poznámka: NH_3 slip – únik čpavku, production – tvorba, reduction – redukce

Z obrázku je patrné, že při reakční teplotě 1 000 °C je redukce NO_x asi 85 % a únik amoniaku přibližně 15 %. Při dané teplotě vznikají oxidy dusíku spalování přibližně 25 % vstříkovaného amoniaku. Obrázek dále znázorňuje, že při vyšších teplotách množství oxidů dusíku pocházejících ze čpavku roste, zatímco únik amoniaku se snižuje, podíl redukce NO_x je vyšší. Při teplotách nad 1 200 °C dochází k oxidaci samotného amoniaku a vznikají oxidy dusíku. Naopak při nízkých provozních teplotách je redukce oxidů dusíku méně efektivní a únik čpavku větší. Amoniak se vstříkují do spalovací komory v několika vrstvách, aby docházelo k optimálnímu využití i při měnících se spalovacích podmínkách. Přebytný amoniak lze odstranit v případě použití mokrého systému čištění spalin. Stripováním odpadních vod z pračky spalin lze následně amoniak vracet zpět do systému SNCR. Pro celkovou optimalizaci selektivní nekatalytické redukce je důležité efektivní míchání spalin redukčního činidla. Musí být zároveň zabezpečena dostatečná doba styku plynů, aby proběhly všechny potřebné redukční reakce (Evropská komise, 2005). Výhodou této technologie jsou nižší investiční náklady (Kropáč, a další, 2013).

Selektivní katalytická redukce (SCR)

Jedná se o technologii, jejímž principem je katalytický proces, během kterého se redukční činidlo (amoniak) ve směsi se vzduchem přidává do spalin a následně prochází

přes katalyzátor. Tím je obvykle kovová konstrukce vyrobená z platiny, rhodia, oxidu titaničitého. Při průchodu katalyzátorem dochází k reakci amoniaku s oxidy dusíku, jejímiž produkty jsou vodní páry a dusík.

Aby mohla reakce účinně proběhnout, musí se teplota spalin pohybovat v rozmezí od 180 do 450 °C. Ve většině spaloven tento proces probíhá při teplotách okolo 250 °C. Zařízení pro katalytickou redukci bývá umístěno až za stupněm odprášení a odstranění kyselého plynu v mokré vypírce. Zde se však pracovní teplota pohybuje okolo 50 °C. To znamená, že je nutné spaliny přehřívát, což je v praxi poměrně energeticky náročné. V praxi se používají tepelné výměníky, které snižují energetickou náročnost soustavy. Výhodou této technologie je fakt, že umožňuje velké snížení NO_x ve spalinách. Zároveň dochází ke značné redukci, v některých případech až k úplné eliminaci oxidů síry ve spalinách.

S cílem snížit nebo vyloučit potřebu opětovného zahřívání spalin se někdy zařízení pro selektivní katalyckou redukci umísťuje za elektrostatický odlučovač částic. V tomto případě může docházet k nežádoucí zvýšené produkci PCDD/F (Evropská komise, 2005).

Technologie snižování emisí sloučenin organického uhlíku

Podstata této technologie spočívá v odstranění organických látek ze spalin. Jedná se zejména o dioxiny (PCDD) a furany (PCDF). Do této skupiny však patří i další nežádoucí organické sloučeniny, jako jsou například halogenové aromatické uhlovodíky, polycyklické aromatické uhlovodíky, benzen, toluen a xylen (Kuraš, 2008).

Adsorpce na činidlech s aktivním uhlím

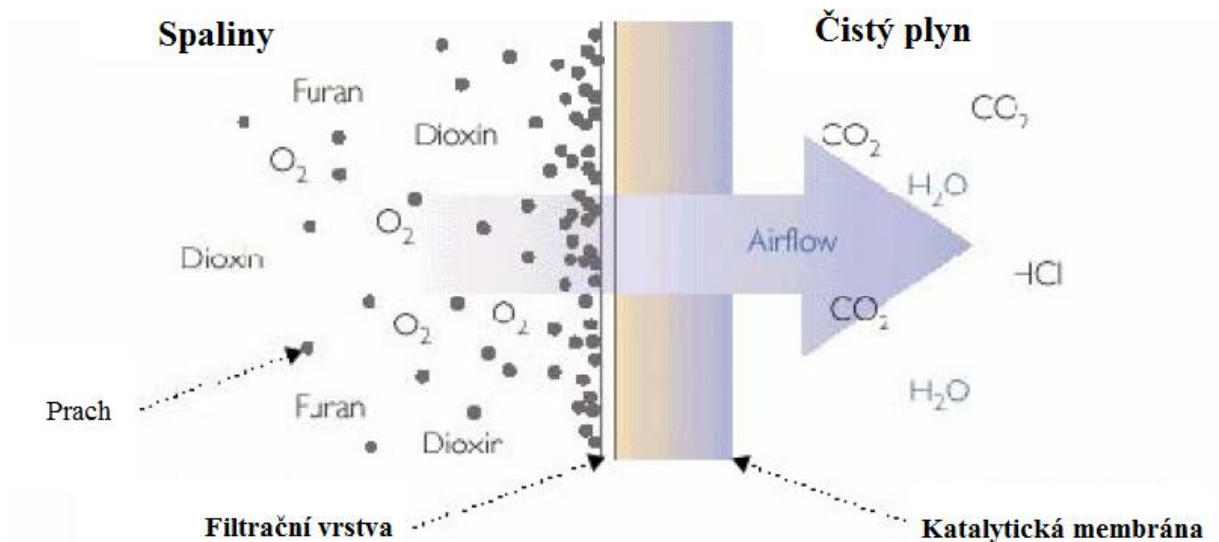
Nejčastěji se uvedené organické sloučeniny odstraňují sorpcí na aktivním uhlí, které je vstříkováno přímo do proudu spalin. Aktivní uhlí jako neselektivní sorbent účinně odstraní prakticky všechny organické kontaminanty. Uhlík je následně zachycován na rukávcovém filtru (Kuraš, 2014).

Systém SCR

Selektivní katalytická redukce slouží k odbourávání NO_x ze spalin. Zároveň však touto metodou mohou být odstraněny i plynné PCDD/F s účinností 98 – 99,9 % (Kuraš, 2014).

Katalytické filtry

Dalším metodou je selektivní katalytická filtrace, kde je katalyzátor nanesen přímo na rukávcový filtr. Ten je vyrobený ze speciální tkaniny. Vnější vrstva zachycuje prachové částice obsahující organické látky a těžké kovy. Na vnitřní straně je nanesený katalyzátor, který rozkládá plynné PCDD/F. Vstupní teplota plynu do zařízení by se měla pohybovat okolo 200 °C, aby docházelo k účinnému odbourávání organických sloučenin. Filtrační plocha rukávců se pravidelně regeneruje a odloučený popílek se shromažďuje ve výsypce filtru (Evropská komise, 2005).



Obrázek 8: Membrána katalytické filtrace

2.4.3.4 Technologie snižování emisí rtuti a ostatních těžkých kovů

Rtuť podobně jako například olovo je vysoce toxická látka a akumuluje se v lidském těle, kde poškozuje lidské orgány a vylučování těchto látek z těla je velmi pomalé. Limit emisí stanovený zákonem č. 201/2012 Sb. je $0,05 \text{ mg m}^{-3}$.

Aby nedocházelo k emisi rtuti do ovzduší, je důležité dodržovat primární technologie, které zabezpečují prevenci a kontrolu vniknutí rtuti do odpadu. Mezi tyto technologie patří:

- Oddělený sběr odpadu, jenž může obsahovat těžké kovy. Jsou to například bateriové články, baterie, dentální amalgám, apod.
- Informování původců odpadů o správném nakládání s odpady obsahující rtuť.
- Kontrola a omezení přijímaného odpadu, který může být kontaminován rtutí. Jedná se například o rozbor vzorků odpadů, apod.

Rtuť se zcela vypařuje při teplotě $357 \text{ }^\circ\text{C}$ a vyskytuje se ve spalinách v plynném skupenství ve dvou formách: anorganická rtuť – především dvojmocná Hg^{2+} , v podobě chloridu; elementární rtuť – kovová. Je třeba uvědomovat si chování obou forem s tím, že oba druhy se odstraňují jiným způsobem. Důležité je, aby při spalování odpadu obsahující rtuť byl přítomný chlór. Ten přispívá k zachycování rtuti ve formě iontů, kterou je možné zachycovat v absorbéru, například v mokrých pračkách spalin. Množství obsahu chloru v odpadu je však důležité kontrolovat. Vyšší množství chloru způsobuje vznik nežádoucích sloučenin dioxinů, furanů a jiných toxických sloučenin chloru.

Odstraňování elementární formy rtuti – čisté Hg z proudu spalin se provádí pomocí:

- Přímého odstraňování rtuti na aktivním uhlí, které je obohaceno sírou nebo na koksu z nístějové pece i na zeolitech.
- Transformace na dvojmocnou rtuť přidáním oxidačních činidel a odstraněním v mokré pračce plynů. Odpadní vody jsou následně dodány do čistíren odpadních vod, která

mají instalováno zařízení pro odstraňování těžkých kovů. V něm je rtuť převáděna na stabilnější formu, například HgS, která je vhodnější ke konečnému odstranění.

Bylo zjištěno, že neutralizace oxidem siřičitým v peci po přidání vápence snižuje podíl čisté rtuti a tím zefektivňuje proces odstraňování rtuti z proudu plynů (Stehlik, 2007).

Ostatní těžké kovy se při spalování přeměňují především na netěkavé oxidy a odlučují se v zařízeních na odstraňování tuhých znečišťujících látek (viz kapitola Technologie odlučování emisí tuhých látek). Ke snižování emisí těžkých kovů používáno aktivní uhlí.

2.4.3.5 Technologie snižování emisí skleníkových plynů

Mezi skleníkové plyny vznikající spalováním patří: oxid uhličitý CO₂ a oxid dusný N₂O. Oxid uhličitý je možné zneškodňovat reakcí s NaOH přímo ve spalinách a tím produkovat uhličitan sodný. Emise oxidu dusného v praxi vznikají při spalovacích teplotách nižších než 850 °C a při použití selektivní nekatalytické reakce ke snížení NO_x, především při používání močoviny jako reakčního činidla.

Ideální teplota pro současné snižování emisí NO_x a produkce N₂O se pohybuje v rozpětí okolo 850 – 900 °C (Stehlik, 2007). Produkce emisí N₂O se snižuje v případě, že je v dohořovací komoře dosaženo teploty nad 900 °C nebo je použita metoda selektivní katalytické redukce. K prevenci produkce emisí oxidu dusného se používají tyto metody:

- Optimalizace SNCR – snížení dávkování reakčního činidla.
- Optimalizace teplotního rozsahu pro aplikaci činidel SNCR.
- Optimální umístění trysek pro injektáž.
- Optimální způsob míchání plynu ve vhodných teplotních zónách.
- Návrh dohořovacích zón s přebytky vzduchu vyššími než je stechiometrický poměr. Tím proběhne oxidace oxidu dusného.
- Používání amoniaku místo močoviny v SNCR.

Podobně lze eliminovat oxid dusný z procesů s nedostatečným přívodem kyslíku. Jsou to procesy s podstechiometrickým poměrem kyslíku, jedná se například o technologii zplyňování odpadů, pyrolýzu a spalování v pecích s fluidním ložem, které probíhají za speciálních podmínek (Evropská komise, 2005).

2.4.4 Čištění odpadních vod

Ve spalovnách odpadu vznikají odpadní vody při zchlazování popela a škváry, při čištění spalin procesem mokrého čištění spalin apod. Úprava odpadní vody z čištění spalin ve spalovnách odpadu je podobná úpravě odpadních vod pocházejících z průmyslových technologií. Voda musí být neutralizována a následně je provedena kontrola pH. Znečišťující látky se usazují v sedimentační nádrži ve formě kalu. Nad ním zůstává čirá voda, která odchází do čističky odpadních vod (Obroučka, 2001).

3 Výchozí podmínky podniku, postupy a metody řešení

V současnosti v tuzemsku existuje řada zařízení pro termické zneškodňování nebezpečných odpadů, které jsou vybavené již poměrně zastaralou technologií čištění kouřových plynů. Jedná se o systémy mokrých praček bez terciárního stupně čištění kouřových spalin. Tato technologie byla v minulosti hojně používána, avšak s ohledem na současné poměrně přísné emisní limity nejsou tyto provozy již vyhovující. Jednak dochází k překračování zákonných limitů, čímž se vystavují riziku udělení pokut inspekčními orgány ČIŽP. Dále je problematické nakládání se znečištěnou vodou, které v takovém provozu figuruje jako čistící médium. Tím vzniká požadavek na nákladné čištění odpadních vod. V případě havárie může dojít ke kontaminaci povrchových a spodních vod a obecně lze říci, že mokrý způsob čištění spalin není z hygienického hlediska přívětivý pro obsluhu takového zařízení. Z uvedených aspektů vyplývá, že by bylo vhodné přistoupit k inovaci takového provozu s cílem:

- Trvale snížit koncentraci znečišťujících látek vypouštěných v proudu spalin do ovzduší tak, aby bylo dosaženo splnění platných emisních limitů.
- Vyhnout se užívání vody jako absorpčního činidla v procesu čištění kouřových plynů.
- Zavést systém kontinuálního měření sledovaných škodlivých látek na komíně před vypouštěním do ovzduší s možností záznamu těchto veličin do počítače s následným vyhodnocením dosahovaných hodnot.

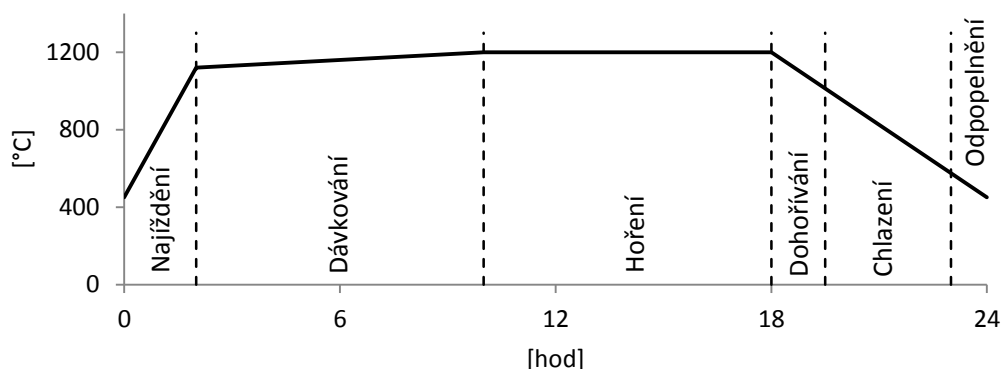
V následujících kapitolách je popsána charakteristika stávajícího stavu zvolené spalovny nebezpečných odpadů, na základě které je vypracován návrh řešení inovace čištění spalin. U stávajícího provozu bylo provedeno autorizované měření znečišťujících látek v kouřových plynech, které je v práci zpracováno a vyhodnoceno v souvislosti s platnou legislativou. Na základě poznatků z literatury a spolupráce se specialistou v oboru technologického čištění spalin je vypracován komplexní návrh vhodného řešení termického zpracování nebezpečného odpadu a návrh následného suchého procesu čištění kouřových plynů s ohledem na technické, ekologické a ekonomické požadavky zvolené spalovny nebezpečných odpadů. V poslední části práce je zpracována ekonomická analýza návrhu z hlediska nákladově-výnosové bilance a je posouzena návratnost investice celého projektu. Veškeré sledované aspekty řešení návrhu inovace čištění spalin ve spalovnách nebezpečných odpadů jsou diskutovány v poslední kapitole a závěru práce.

3.1 Charakteristika vybrané spalovny

V souvislosti s návrhem inovace zařízení pro čištění spalin, který je předmětem praktické části diplomové práce, byla zvolena spalovna nebezpečných odpadů v areálu závodu Snaha a. s. Brtnice, jehož provozovatelem je Envir s. r. o. Spalovna byla postavena v roce 1996 a slouží jako zařízení pro zneškodňování nebezpečných odpadů vznikajících

v průmyslovém podniku Snaha, v průmyslových podnicích a nemocničních zařízeních v regionu Brtnice.

Provoz spalovny je nepřetržitý po dobu 24 hodin denně 5 dní v týdnu a obsluha spalovny zde pracuje v třísměnném provozu. Vlastní spalovací proces probíhá v periodickém režimu. První 2 hodiny dochází k nahřívání spalovací pece a najíždění celého systému, následně po dobu přibližně 8 hod. je postupně dávkován spalovaný odpad v objemu cca 2,5 t. Doba následujícího spalovacího procesu se pohybuje v rozmezí okolo 8 – 10 hodin. Dále dochází k dohořívání spalovaného odpadu a chlazení zařízení po dobu 3 – 5 hodin. V poslední fázi je provedeno odpopelnění a poté se cyklus znovu opakuje. Jedenkrát měsíčně je zařízení na 24 hodin odstaveno a je na něm provedena údržba.



Obrázek 9: Schéma provozního cyklu spalovny

Vyrobené teplo je využito pro vytápění léčebny a ohřev užitkové vody.

- Projektovaná kapacita spalovny: $2\,500\text{ kg}\cdot\text{den}^{-1}$
- Celková roční kapacita spáleného dopadu²: 400 tun za rok
- Výhřevnost odpadu: $14 - 18\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Počet provozních dní: 250
- Počet provozních hodin: 6 000 hod.
- Výkon tepelného výměníku: max. 800 kW
- Množství kouřových plynů: $3\,800\text{ až }4\,200\text{ Nm}^3\cdot\text{hod}^{-1}$

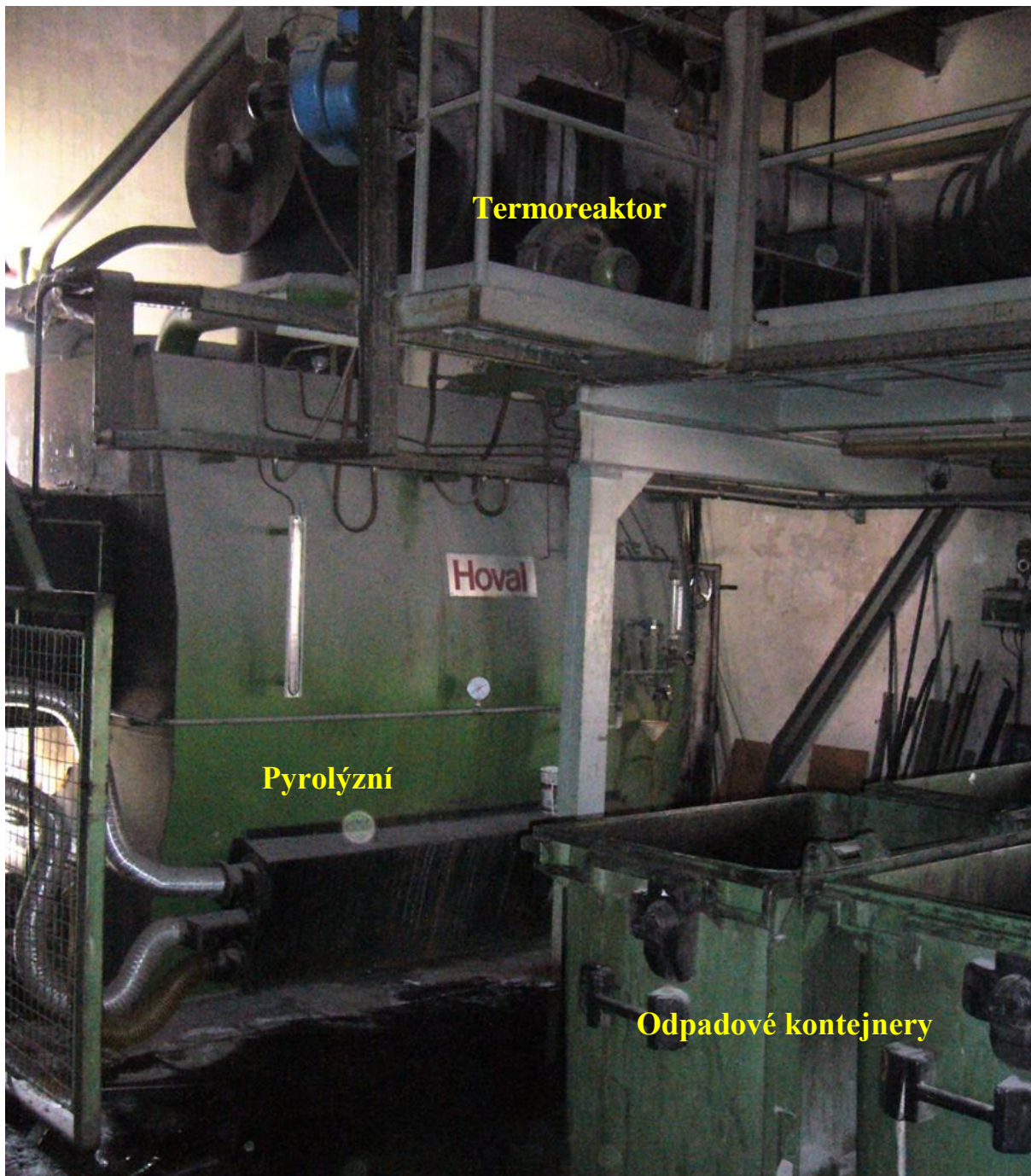
V příloze č. 1 je uveden seznam zneškodňovaných odpadů, jejichž spalování bylo povoleno příslušnými orgány státní správy na základě spalovací zkoušky.

3.2 Popis stávající technologie spalovny

Odpady jsou na spalovnu dopravovány v jednotných ocelových kontejnerech o celkovém objemu 700 litrů. Tyto kontejnery jsou uzavíratelné. Pro lepší manipulaci po prostoru spalovny jsou umístěny na kolečkách. Kontejnery se zvažují a je zaznamenáno množství spalovaného odpadu. Následně jsou pomocí hydraulicko-mechanického zařízení vysypány

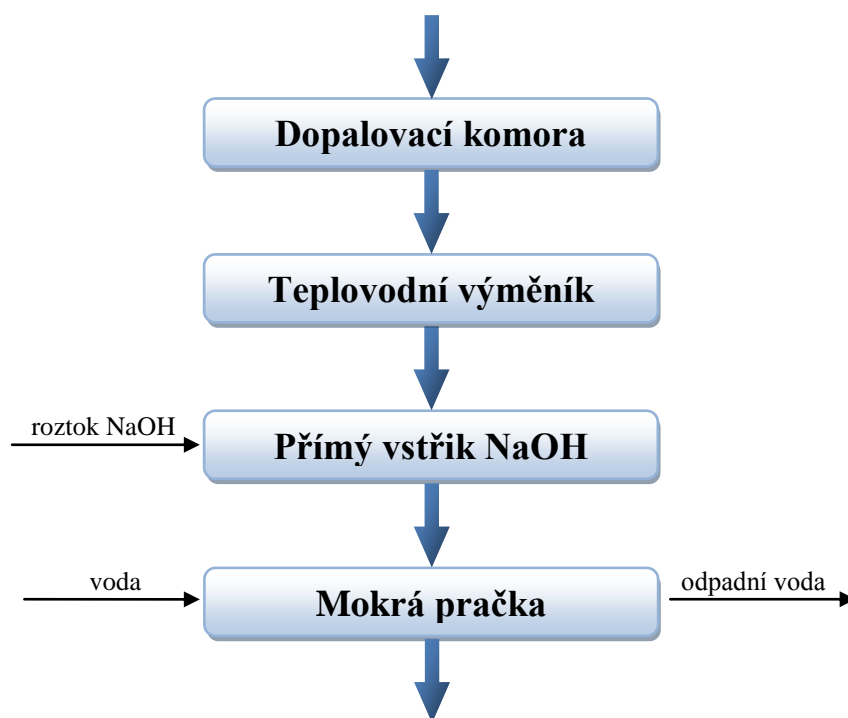
² Podle ČHMÚ bylo v roce 2013 množství spáleného odpadu 612 tun za rok

do dávkovače, který odpad dopraví do pyrolýzní komory typ HOVAL GG 14 (ČHMÚ, 2014). Zde je odpad zapálen plynovým hořákem.



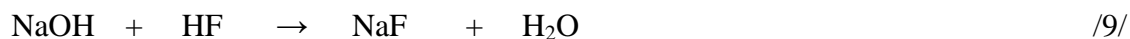
Obrázek 10: Foto spalovacího zařízení

V průběhu několikahodinového procesu se odpad karbonizuje, vzniká pyrolýzní plyn s vysokou výhřevností. Tento plyn je pod tlakem odváděn do termoreaktoru (termická zóna), kde je smíchán s přiváděným vzduchem a je zapálen pomocí plynového hořáku. Spalování pyrolýzního plynu probíhá při teplotě přibližně 1 200 °C po dobu cca 1 – 2 sec, po kterou plyn setrvává v termoreaktoru. Celá technologie pracuje za podtlaku, který je vytvářen spalínovým ventilátorem umístěným na konci technologické linky. Díky tomu nemůže docházet k úniku plynů do prostoru haly spalovny.



Obrázek 11: Posloupnost strojně-technologických zařízení současného stavu spalovny

Kouřové plyny jsou následně vedeny pomocí kouřovodu, což je potrubí s šamotovou vnitřní vyzdívkou, do výměníku, kde je odebráno teplo kouřových plynů do vody jako teplotnosného média. Spaliny jsou současně ochlazeny na teplotu cca 280 °C a dále jsou vedeny do zařízení pro čištění kouřových plynů. Technologie je založena na principu dvoustupňové mokré pračky. V prvním stupni mokré pračky Quensch (Obrázek 13, pozice 1) je nastříkovan 15 % roztok hydroxidu sodného. Roztok plní dvě funkce, zaprvé ochlazení spalin z 280 °C na teplotu přibližně 62 °C (přímé zchlazení pomocí nástřiku vodného roztoku). Druhou funkcí je zneškodňování kyselých plynů. Kyselé sloučeniny jako SO₂, HCl a HF obsažené v kouřových plynech reagují s vodným roztokem hydroxidu sodného. Chemické reakce jsou popsány následujícími rovnicemi:

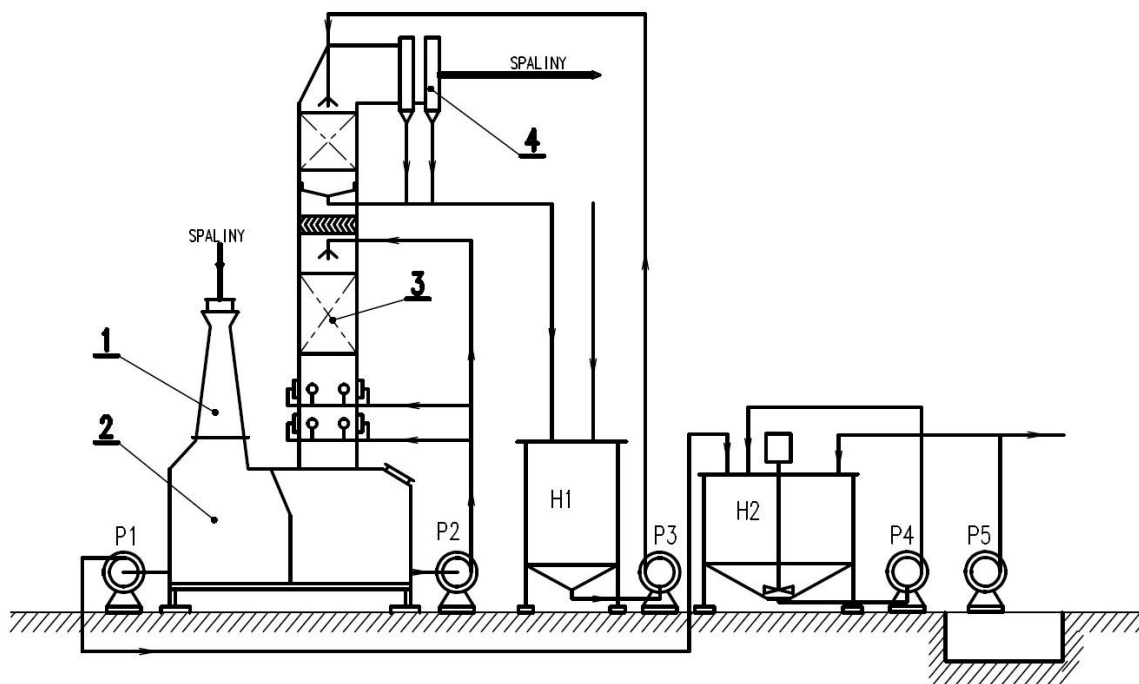


Současně při této reakci jsou odlučovány tuhé znečišťující látky, které sedimentují na dně nádoby mokré pračky (Obrázek 13, pozice 2). Spaliny jsou následně vedeny do tzv. křížové kolony (Obrázek 13, pozice 3), kde jsou po obvodu umístěné trysky.



Obrázek 12: Foto křížové kolony

Tryskami je do proudu spalin nastříkovan přibližně 5 % roztok NaOH a v další fázi čistá voda. Celý vodní okruh pracuje jako uzavřený, pouze z prvního stupně je odváděna část zkoncentrovaného roztoku, který je veden do neutralizační stanice – čističky odpadních vod. Spaliny vycházejí z mokré pračky (Obrázek 13, pozice 4) při teplotě cca 47 °C skrz kouřový ventilátor, který zabezpečuje dopravu kouřových plynů v celém strojně-technologickém zařízení spalovny. Kouřové plyny jsou následně odváděny do komína, kde jsou rozptýleny do atmosféry.



Obrázek 13: Schéma mokré pračky

- pozice 1: Quensch – první stupeň mokrého čištění spalin
 pozice 2: cirkulační nádrž se zásobou absorpčního roztoku
 pozice 3: vertikální kolona s vestavbou soustavy trysek
 pozice 4: odlučovač (demister) kapiček unášených proudem kouřových plynů

3.1 Měření emisí

Ve spalovně nebezpečného odpadu SNAHA Brtnice, bylo dne 31. 8. 2014 provedeno firmou Ekologické Centrum spol. s r.o. autorizované měření emisí znečišťujících látek. Měření vedla Ing. Libuše Neubauerová, vedoucí zkušebny, protokol č. 31/8/14. Měření bylo provedeno v rozsahu: TZL (tuhé znečišťující látky), CO, oxidy dusíku vyjádřené jako NO_x , SO_2 , TOC (celkový organický uhlík – total organic carbon), sloučeniny chloru a fluoru vyjádřené jako HCl a HF, těžké kovy I. – III. třídy, PCDD/F a doprovodné veličiny. Emise PCDD/F jsou vyjádřeny rovněž ekvivalentem toxicity (TEQ).

Měřicí zařízení bylo instalováno na svislém kouřovodu, za ventilátorem, před vstupem do komína. Metodika vyhovuje podmínkám ČSN 12 4070 a ČSN ISO 9096.

3.1.1 Metodika měření

Měření emisí TZL - měření podle normy (ČSN 12 4070, ČSN ISO 9096) – gravimetrie. Gravimetrická aparatura sestává z vyhřívané sondy pro izokinetický odběr, interního zachycovače s filtračním materiálem na bázi skleněných mikrovláken.

Měření emisí plyných znečišťujících látek – pro zjištění hustoty odpadního plynu a referenčního obsahu kyslíku byly zjišťovány hmotnostní koncentrace CO_2 a O_2 v odpadním plynu s použitím odběrového emisního měřicího systému HORIBA postupem podle normy ČSN EN 14789. Vzorek odpadního plynu byl odebírán kontinuálně s použitím sondy

a vyhříváné odběrové trasy. Před vstupem do multi-komponentního analyzátoru byl vzorek upravený odloučením tuhých částic a vlhkosti. Emisní měřicí systém HORIBA využívá pro měření jednotlivých znečišťujících látek tyto fyzikální principy:

- SO₂ – ultrafialová fluorescenční spektrometrie,
- CO – infračervená spektrometrie,
- NO_x – chemiluminiscence,
- O₂ – paramagnetismus.

Měření emisí HF a HCl – odběr vzorku pro manuální stanovení HF byl realizován odběrovou aparaturou TCR Bravo postupem podle ČSN ISO 15713. Od postupu podle uvedeného předpisu nebyly žádné odchylky.



Obrázek 14: Měřicí přístroj Bravo, TECORA

Měření emisí těžkých kovů – odběr vzorků pro stanovení koncentrací vybraných těžkých kovů byl proveden postupem podle normy ČSN EN 13211 s použitím gravimetrické odběrové aparatury TECORA IsoStack. Stanovení hmotnostních koncentrací bylo provedeno ve třech fázích:

1. izokinetický odběr vzorků odpadního plynu ve stejném čase jako odběr vzorků tuhých znečišťujících látek a zachycení do absorpčních roztoků (v hlavním proudu),
2. hmotnostní analýza podílu jednotlivých znečišťujících látek v laboratoři subdodavatele,
3. zpracování naměřených dat a laboratorních výsledků do měřicích protokolů s použitím emisního softwaru, výpočet hmotnostní koncentrace, objemového průtoku a hmotnostního toku znečišťujících látek. Odběrem plynné fáze těžkých kovů v hlavním proudu byl zajištěn požadavek meze stanovitelnosti podle ČSN EN 14385 a ČSN EN 13211.

Měření emisí PCDD/PCDF – odběr vzorku odpadního plynu byl proveden izokinetickou, filtračně-kondenzační metodou. Hlavní odběrová trasa byla sestavena z vyhříváné izokinetické sondy s výměnnými hlavicemi a filtrem ze skleněných mikrovláken s účinností zachytu 99,95 % testovacího aerosolu 3 μm, dále směšovací komory, filtru skleněného a PUF pěnou, clonkové tratě, plynoměru a zdroje sání. Trasa ředicího vzduchu sestává z plynoměru, clonkové trasy, filtru s PUF pěnou pro odfiltrování okolního ředicího vzduchu, sušidla. Součástí aparatury jsou sady teploměrů a tlakoměrů.

Vzorek byl odebírán souvisle bez přerušení po dobu 6 hodin. Všechny ostatní činnosti provedené před odběrem (vyčištění aparatury, terénní slepý pokus, označení příslušných částí

odběrovými standardy), po odběru (výplach aparatury) byly provedeny bez odchylek od referenční metodiky.

Výsledkem je koncentrace 2,3,7,8 substituovaných tetra – deka CDD a CDF, které byly vyhodnoceny podle příslušné toxicity a vyjádřeny pomocí mezinárodního ekvivalentu toxicity (I-TEF = International toxicity equivalence factor). TEQ je klíčovou hodnotou pro porovnání s emisními limity. Pro vyhodnocení TEQ byly použity toxické koeficienty I-TEF.

Tabulka 5: mezinárodní ekvivalenty toxicity I-TEF

| Kongenery | I-TEF | Kongenery | I-TEF |
|-------------------------------|-------|------------------------------|-------|
| polychlorované dibenzodioxiny | | polychlorované dibenzofurany | |
| 2,3,7,8-TetraCDD | 1 | 2,3,7,8-TetraCDF | 0.1 |
| Ostatní TetraCDD | 0 | Ostatní-TetraCDF | 0 |
| 1,2,3,7,8-PentaCDD | 0.5 | 1,2,3,7,8-PentaCDF | 0.05 |
| Ostatní PentaCDD | 0 | 2,3,4,7,8-PentaCDF | 0.5 |
| 1,2,3,4,7,8-HexaCDD | 0.1 | Ostatní-PentaCDF | 0 |
| 1,2,3,6,7,8-HexaCDD | 0.1 | 1,2,3,4,7,8-HexaCDF | 0.1 |
| 1,2,3,7,8,9-HexaCDD | 0.1 | 1,2,3,6,7,8-HexaCDF | 0.1 |
| Ostatní HexaCDD | 0 | 1,2,3,7,8,9-HexaCDF | 0.1 |
| 1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD | 0.01 | 2,3,4,6,7,8-HexaCDF | 0.1 |
| Ostatní Hepta CDD | 0 | Ostatní-HexaCDF | 0 |
| OctaCDD | 0.001 | 1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF | 0.01 |
| | | 1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF | 0.01 |
| | | Ostatní-HeptaCDF | 0 |
| | | OctaCDF | 0.001 |

Měření souvisejících veličin – měření objemové koncentrace kyslíku v odpadním plynu pro účely přepočtu naměřených hodnot koncentrací znečišťujících látek (ZL) na referenční obsah kyslíku bylo provedeno s použitím odběrového emisního měřicího systému pro měření plynných znečišťujících látek.

Vlhkost odpadního plynu byla zjištěna kondenzační-adsorpčních metodou s použitím odběrové aparatury na stanovení tuhých znečišťujících látek (TZL). Ostatní související veličiny měření emisí než teplota odpadního plynu, atmosférický, absolutní a diferenční tlak byly měřeny kontinuálně během celého odběru vzorku.

Tabulka 6: Použitá měřící zařízení

| Znečišťující látka / veličina | Metoda měření | Typ / výrobce |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| hmotnostní koncentrace TZL | automatická izokinetická gravimetrie | TCR Basic 1, |
| hmotnostní koncentrace PCDD/F | fitračně-kondenzační | TCR Izoterm, TCR Izofrost, TECORA |
| teplota odpadního plynu | odporový teploměr typ K, součást odběrové sondy pro odběr TZL | TCR Basic 1, TECORA |

| Znečišťující látka / veličina | Metoda měření | Typ / výrobce |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| tlak (absolutní, barometrický a dynamický) | pitotova sonda typu S, elektronické mikromolnanometr | |
| vlhkost | kondenzačně-adsorpčně | |
| objemová koncentrace CO ₂ , O ₂ , NO _x a SO ₂ | mutikomponentní analyzátor, fyzikální princip (O ₂ - paramagnetismus, CO, NO _x a SO ₂ - nedisperzivní infračervená spektrofotometrie | ENDA 600-1, HORIBA |
| hmotnostní koncentrace HF, HCl | manuální odběr - kapalný sorbent 0,1 M NaOH | BRAVO, TECORA |

3.1.2 Přepočty výsledků

Výsledkem měření jsou hmotnostní koncentrace emisí za referenčních podmínek – K za normálního stavu (tj. 0 °C, 101,325 kPa) a emisní toky – E_s. Pro výpočty emisí jsou použity následující vztahy:

$$K_s = K_T + K_K + K_A \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad /10/$$

$$K_{ss} = K_s \cdot 100 \cdot (100 - w)^{-1} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad /11/$$

$$K = K_{ss} \cdot (21 - O_B) \cdot (21 - O_M)^{-1} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad /12/$$

$$V_{spNs} = V_{spN} \cdot (100 - w) \cdot 100^{-1} \quad [\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad /13/$$

$$E_s = K_s \cdot V_{spN} \cdot 10^{-6} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad /14/$$

nebo

$$E_s = K_{ss} \cdot V_{spNs} \cdot 10^{-6} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad /15/$$

$$F_o = E_s \cdot m_o^{-1} \quad [\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}] \quad /16/$$

kde:

K_{T,K,A} ... koncentrace složky v tuhé, kondenzačneschopné a plynné fáze,

K_s ... koncentrace složky, normální stav, reálná vzdušina,

K_{ss} ... koncentrace složky, norm. stav, suchá vzdušina,

K ... koncentrace složky, norm. stav, suchá vzdušina vztažená na ref. O₂,

w ... vlhkost vzdušiny přepočtená na normální stav, [% obj.]

O_M ... měřený obsah kyslíku, [% obj.]

O_B ... zadaný obsah kyslíku (11 %), [% obj.]

E_s ... hmotnostní tok složky ve vzdušině,

V_{spN} ... objemový tok vzdušiny za norm. stavu,

V_{spNs} ... objemový tok suché vzdušiny za norm. stavu,

F_o ... emisní faktor,

m_o ... množství spáleného vzorku odpadu za hodinu. [kg]

Organické sloučeniny (C_xH_y) jsou vyjádřeny v objemových koncentracích propanu (C₃H₈). Ve hmotnostních koncentracích jsou vyjádřeny jako celkový organický uhlík (TOC). Přepočtení z koncentrace bylo provedeno podle následujícího vztahu:

$$\text{TOC} = f \cdot K \cdot M(\text{C}) \cdot M(\text{C}_3\text{H}_8)^{-1} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad /17/$$

kde:

TOC ... koncentrace organických látek v emisích vyjádřená jako organický uhlík,
 f ... faktor přepočtu koncentrace propanu z jednotek [ppm] na [mg · m⁻³],
 K ... měřená koncentrace organických látek v emisích suché vzdušiny,
 M(C), M(C₃H₈) ... molární hmotnosti uhlíku resp. propanu.

Pro tento případ: TOC = 1,6 K. Na suché spaliny jsou koncentrace dále přepočítány.

3.1.3 Naměřené hodnoty

Měření emisních znečišťujících látek probíhalo třikrát v době od 7 do 13 hod, při čemž bylo spáleno celkem 860 kg odpadu. Pro výpočet emisního uvažujeme hodnotu 143,3 kg·h⁻¹ spáleného odpadu. Objemový tok suché vzdušiny za normálního stavu (0°C, 101.325 kPa) uvažujeme 1109 mg·h⁻¹. Charakteristika kouřových plynů průměrných hodnot jednotlivých měření je uvedena v následující tabulce.

Tabulka č. 7: Charakteristika kouřových plynů měření 1 – 3

| Číslo měření | Doba odběru | V _n | Vlhkost spalin | Obsah O ₂ ve spalinách | Teplota spalin | Rychlost spalin | Dynamický tlak | Hustota spalin | Hustota spalin za norm. stavu |
|----------------------------|---------------|-------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|
| | [h] | [m ³] | [% obj.] | [% obj.] | [° C] | [m.s ⁻¹] | [Pa] | [kg.m ⁻³] | [kg.m ⁻³] |
| 1 | 7:05 - 8:50 | 0,0578 | 17,7 | 12,67 | 48,5 | 18,2 | 4802 | 0,87 | 1,24 |
| 2 | 10:45 - 11:35 | 0,0746 | 18,1 | 13,11 | 46,7 | 17,8 | 4805 | 0,86 | 1,22 |
| 3 | 12:08 - 12:43 | 0,0467 | 19,4 | 11,72 | 45,8 | 18,1 | 4795 | 0,90 | 1,28 |
| průměr | | 0,060 | 18,4 | 12,50 | 47,0 | 18,0 | 4800,7 | 0,88 | 1,2449 |
| rozptyl | | 0,00013 | 0,53 | 0,34 | 1,26 | 0,03 | 17,56 | 0,0003 | 0,0006 |
| směrodatná odchylka | | 0,011 | 0,73 | 0,58 | 1,12 | 0,17 | 4,19 | 0,02 | 0,02 |

Podle uvedené metodiky a uvedených podmínek bylo provedeno měření znečišťujících látek. V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty včetně provedené statistické analýzy, ve které byl vypočítán průměr, rozptyl a směrodatná odchylka podle následujících vzorců:

▪ aritmetický průměr $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ /18/

▪ rozptyl diskrétní náhodné veličiny $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ /19/

▪ směrodatná odchylka $\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ /20/

kde x_i jsou hodnoty náhodné veličiny a n je počet prvků souboru

Pozn.: Platí pro diskrétní veličiny, kde pravděpodobnost všech diskrétních hodnot je stejná (Kropáč, 2012).

Tabulka č. 8: Naměřené hodnoty emisí **HCl**

| Měření | K_s | Nejistota měření | K_{ss} | K (11 % O_2) | E_s |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| 1 | 2,6 | +/- 0,3 | 3,2 | 3,8 | 0,004 |
| 2 | 5,5 | +/- 0,3 | 6,7 | 8,5 | 0,009 |
| 3 | 2,1 | +/- 0,3 | 2,6 | 2,8 | 0,003 |
| průměr | 3,4 | | 4,2 | 5,0 | 0,006 |
| minimální hodnota | 2,1 | | 2,6 | 2,8 | |
| maximální hodnota | 5,5 | | 6,7 | 8,5 | |
| rozptyl | 2,25 | | 3,32 | 6,20 | |
| směrodatná odchylka | 1,50 | | 1,82 | 2,49 | |

Tabulka č. 9: Naměřené hodnoty emisí **HF**

| Měření | K_s | Nejistota měření | K_{ss} | K (11 % O_2) | E_s |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| 1 | 0,9 | +/- 0,05 | 1,1 | 1,3 | 0,001 |
| 2 | 0,5 | +/- 0,05 | 0,7 | 0,8 | 0,001 |
| 3 | 0,4 | +/- 0,05 | 0,4 | 0,5 | 0,001 |
| průměr | 0,6 | | 0,7 | 0,9 | 0,001 |
| minimální hodnota | 0,4 | | 0,4 | 0,5 | |
| maximální hodnota | 0,9 | | 1,1 | 1,3 | |
| rozptyl | 0,05 | | 0,08 | 0,12 | |
| směrodatná odchylka | 0,23 | | 0,28 | 0,35 | |

Tabulka č. 10: Naměřené hodnoty emisí **SO₂**

| Měření | K_s | Nejistota měření | K_{ss} | K (11 % O_2) | E_s |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| 1 | 10,2 | +/- 1,2 | 12,4 | 14,9 | 0,017 |
| 2 | 6,4 | +/- 1,2 | 7,8 | 9,9 | 0,011 |
| 3 | 7,8 | +/- 1,2 | 9,7 | 10,4 | 0,012 |
| průměr | 8,1 | | 10,0 | 11,8 | 0,013 |
| minimální hodnota | 6,4 | | 7,8 | 9,9 | |
| maximální hodnota | 10,2 | | 12,4 | 14,9 | |
| rozptyl | 2,49 | | 3,56 | 5,06 | |
| směrodatná odchylka | 1,58 | | 1,89 | 2,25 | |

Tabulka č. 11: Naměřené hodnoty emisí **NO_x**

| Měření | K_s | Nejistota měření | K_{ss} | K (11 % O_2) | E_s |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| 1 | 126,6 | +/- 21,0 | 153,9 | 184,7 | 0,205 |
| 2 | 93,2 | +/- 21,0 | 113,7 | 144,2 | 0,160 |
| 3 | 101,9 | +/- 21,0 | 126,4 | 136,2 | 0,151 |
| průměr | 107,2 | | 131,3 | 155,0 | 0,172 |
| minimální hodnota | 93,2 | | 113,7 | 136,2 | |
| maximální hodnota | 126,6 | | 153,9 | 184,7 | |
| rozptyl | 201,05 | | 280,47 | 451,39 | |
| směrodatná odchylka | 14,18 | | 16,75 | 21,25 | |

Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty emisí **CO**

| Měření | K _s | Nejistota měření | K _{ss} | K (11 % O ₂) | E _s |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| 1 | 44,3 | +/- 12,0 | 53,8 | 64,6 | 0,072 |
| 2 | 37,7 | +/- 12,0 | 46,1 | 58,4 | 0,065 |
| 3 | 36,3 | +/- 12,0 | 45,0 | 48,5 | 0,054 |
| průměr | 39,4 | | 48,3 | 57,2 | 0,063 |
| minimální hodnota | 36,3 | | 45,0 | 48,5 | |
| maximální hodnota | 44,3 | | 53,8 | 64,6 | |
| rozptyl | 12,19 | | 15,47 | 44,01 | |
| směrodatná odchylka | 3,49 | | 3,93 | 6,63 | |

Tabulka č. 13: Naměřené hodnoty emisí **TZL**

| Měření | K _s | Nejistota měření | K _{ss} | K (11 % O ₂) | E _s |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| 1 | 12,1 | +/- 1,0 | 14,7 | 17,6 | 0,020 |
| 2 | 8,6 | +/- 1,0 | 10,5 | 13,2 | 0,015 |
| 3 | 9,4 | +/- 1,0 | 11,7 | 12,6 | 0,014 |
| průměr | 10,0 | | 12,3 | 14,5 | 0,016 |
| minimální hodnota | 8,6 | | 10,5 | 12,6 | |
| maximální hodnota | 12,1 | | 14,7 | 17,6 | |
| rozptyl | 2,26 | | 3,18 | 5,01 | |
| směrodatná odchylka | 1,50 | | 1,78 | 2,24 | |

Tabulka č. 14: Naměřené hodnoty emisí **TOC**

| Měření | C _x K _y | K _s | Nejistota měření | K _{ss} | K (11 % O ₂) | E _s |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | [ppm] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| 1 | 5,1 | 8,2 | +/- 0,3 | 10,0 | 12,0 | 0,013 |
| 2 | 3,9 | 6,3 | +/- 0,3 | 7,7 | 9,7 | 0,011 |
| 3 | 8,3 | 13,2 | +/- 0,3 | 16,4 | 17,6 | 0,020 |
| průměr | 5,8 | 9,2 | | 11,3 | 13,1 | 0,015 |
| minimální hodnota | 3,9 | 6,3 | | 7,7 | 9,7 | |
| maximální hodnota | 8,3 | 13,2 | | 16,4 | 17,6 | |
| rozptyl | 3,31 | 8,47 | | 13,52 | 11,07 | |
| směrodatná odchylka | 1,82 | 2,91 | | 3,68 | 3,33 | |

Měření emisí těžkých kovů I. až III. kategorie a emisí PCDD/F bylo provedeno jedenkrát. Přebytek kyslíku ve spalinách byl stanoven na 11 % O₂. Ostatní parametry jsou přibližně stejné jako v případě třetího měření.

Tabulka č. 15: Charakteristika kouřových plynů měření 4

| Číslo měření | Doba odběru | V _n | Vlhkost spalin | Obsah O ₂ ve spalinách | Teplota spalin | Rychlost spalin | Dynamický tlak | Hustota spalin | Hustota spalin za norm. stavu |
|--------------|---------------|-------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|
| | [h] | [m ³] | [% obj.] | [% obj.] | [° C] | [m.s ⁻¹] | [Pa] | [kg.m ⁻³] | [kg.m ⁻³] |
| 4 | 13:05 - 13:35 | 0,058 | 18,4 | 11 | 47 | 18 | 4800 | 0,88 | 1,245 |

Tabulka č. 16: Naměřené hodnoty emisí **těžkých kovů I. – III. kategorie**

| Složka | K _s | Nejistota měření | K _{ss} | K (11 % O ₂) | E _s |
|----------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [mg.m ⁻³] | [kg.h ⁻¹] |
| Hg | 0,0395 | +/- 0,01 | 0,048 | 0,048 | 0,0537 |
| Tl | 0,0000 | +/- 0,01 | 0,000 | 0,000 | 0,0000 |
| Cd | 0,0012 | +/- 0,01 | 0,001 | 0,001 | 0,0016 |
| Σ Tl + Cd | 0,0012 | | 0,001 | 0,001 | 0,0016 |
| As | 0,0015 | +/- 0,01 | 0,002 | 0,002 | 0,0020 |
| Co | 0,0000 | +/- 0,01 | 0,000 | 0,000 | 0,0000 |
| Ni | 0,0212 | +/- 0,01 | 0,026 | 0,026 | 0,0288 |
| Cr | 0,0070 | +/- 0,01 | 0,009 | 0,009 | 0,0095 |
| Pb | 0,0132 | +/- 0,01 | 0,016 | 0,016 | 0,0180 |
| Cu | 0,0158 | +/- 0,01 | 0,019 | 0,019 | 0,0215 |
| Mn | 0,0474 | +/- 0,01 | 0,058 | 0,058 | 0,0645 |
| Sb | 0,0000 | +/- 0,01 | 0,000 | 0,000 | 0,0000 |
| V | 0,0000 | +/- 0,01 | 0,000 | 0,000 | 0,0000 |
| Σ Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | 0,1061 | | 0,130 | 0,130 | 0,144 |

Tabulka č. 17: Naměřené hodnoty emisí **PCDD/F**

| Kongenery | I-TEF | MS (lab.) | I-TEQ | I-TEQ |
|---------------------------------|-------|-----------|--------------|-----------------------|
| | | [ng] | [ng] | [ng.m ⁻³] |
| 2,3,7,8-TCDD | 1 | 0,13 | 0,13 | 0,204 |
| 1,2,3,7,8-PeCDD | 0,5 | 0,15 | 0,075 | 0,118 |
| 1,2,3,4,7,8-HxCDD | 0,1 | 0,15 | 0,015 | 0,024 |
| 1,2,3,6,7,8-HxCDD | 0,1 | 0,15 | 0,015 | 0,024 |
| 1,2,3,7,8,9-HxCDD | 0,1 | 0,15 | 0,015 | 0,024 |
| 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD | 0,01 | 0,27 | 0,0027 | 0,0042 |
| OCDD | 0,001 | 0,38 | 0,00038 | 0,00060 |
| Celkem I-TEQ, PCDD | | | 0,253 | 0,397 |
| 2,3,7,8-TCDF | 0,1 | 0,11 | 0,011 | 0,017 |
| 1,2,3,7,8-PeCDF | 0,05 | 0,13 | 0,0065 | 0,010 |
| 2,3,4,7,8-PeCDF | 0,5 | 0,13 | 0,065 | 0,102 |
| 1,2,3,4,7,8-HxCDF | 0,1 | 0,18 | 0,018 | 0,028 |
| 1,2,3,6,7,8-HxCDF | 0,1 | 0,18 | 0,018 | 0,028 |
| 1,2,3,7,8,9-HxCDF | 0,1 | 0,18 | 0,018 | 0,028 |
| 2,3,4,6,7,8-HxCDF | 0,1 | 0,18 | 0,018 | 0,028 |
| 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF | 0,01 | 0,21 | 0,0021 | 0,0033 |
| 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF | 0,01 | 0,21 | 0,0021 | 0,0033 |
| OCDF | 0,001 | 0,4 | 0,0004 | 0,00063 |
| Celkem I-TEQ PCDF | | | 0,159 | 0,250 |
| Celkem I-TEQ PCDD a PCDF | | | 0,41 | 0,65 |

Pozn.: Objem vzorku = 1,57 m³_n.

3.1.4 Výsledky měření

V následující tabulce jsou uvedeny průměrné naměřené hodnoty jednotlivých znečišťujících látek a maximální hodnoty, kterých bylo dosaženo v průběhu měření. Tyto

hodnoty jsou vztaženy k normálním podmínkám suchého plynu, tj. $T = 273,15 \text{ K}$ ($t = 0^\circ\text{C}$), $p = 101,325 \text{ kPa}$ za referenčního obsahu kyslíku 11 %. V tabulce je dále uveden denní emisní limit stanovený platnou legislativní vyhláškou (Vyhláška č. 415/2012 Sb.), se kterým jsou porovnávány naměřené a následně vypočtené průměrné hodnoty emisí znečišťujících látek. Z tabulky je patrné, zda došlo k překročení daného emisního limitu.

Tabulka č. 18: Porovnání emisních limitů a hodnot měření

| Místo měření: | | Spalovna nemocničního odpadu, Envir s.r.o. | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Datum: | | 31.8.2014 | | | | |
| Provozovatel: | | Envir s.r.o. Brtnice | | | | |
| Složka | Emisní limit | Hmotnostní koncentrace | | Hmotnostní tok | Emisní faktor | Splňuje emisní limit |
| | | $[\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | $[\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | | | |
| | Denní průměr | K (0°C , 101.325 kPa , suché, 11% O_2) | | $E_s (V_{\text{spNs}} = 1109 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ | F_o | |
| | $[\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}]$ | průměrná | max. | $[\text{g}\cdot\text{h}^{-1}]$ | $[\text{g}\cdot\text{t}^{-1}]$ | |
| TZL | 10 | 14,5 | 17,6 | 16,1 | 112,3 | NE |
| CO | 50 | 57,2 | 64,6 | 63,4 | 442,4 | NE |
| SO ₂ | 50 | 11,8 | 14,9 | 13,0 | 91,0 | ANO |
| NO _x | 200 | 155,0 | 184,7 | 171,9 | 1199,7 | ANO |
| TOC | 10 | 13,1 | 17,6 | 14,5 | 101,5 | NE |
| HCl | 10 | 5,0 | 8,5 | 5,6 | 39,0 | ANO |
| HF | 1 | 0,88 | 1,3 | 1,0 | 6,8 | ANO |
| Σ Tl+Cd a jejich sloučeniny | 0,05 | 0,001 | x | 0,002 | 0,011 | ANO |
| Hg a její sloučeniny | 0,05 | 0,048 | x | 0,05 | 0,38 | ANO |
| Σ Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V a jejich sloučeniny | 0,5 | 0,13 | x | 0,14 | 1,01 | ANO |
| | | $[\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}]$ | | | | |
| TEQ (PCDD/DF) | 0,1 | 0,65 | x | 0,7 | 5,0 | NE |

Z uvedeného přehledu naměřených koncentrací škodlivých látek emisí v kouřových spalinách vyplývá, že emise sledovaných látek byly překročeny hned ve čtyřech položkách: tuhé znečišťující látky (limit překročen o 45 %), oxid uhelnatý CO (limit překročen o 14 %), celkový organický uhlík TOC (limit překročeno o 31 %). Nejvýraznější překročení emisního limitu bylo zaznamenáno u položky dioxinů a furanů PCDD/F, kde byla povolená mez překročena více než 6 krát.

Z uvedené analýzy jednoznačně vyplývá, že hodnoty sledovaných emisí na výstupu do ovzduší nesplňují emisní limity podle Vyhlášky č. 415/2012 Sb. a zároveň nevyhovují požadavku Evropská unie ve Směrnici 2000/76/EC. Z daného pohledu se jeví jako vhodné uvažovat o návrhu inovace zařízení pro čištění spalin tak, aby bylo v budoucnu dosaženo požadovaných emisních limitů.

4 Návrh inovace

Na základě dlouhodobého neplnění ekologických požadavků zejména z hlediska překračování zákonem předepsaných emisních limitů je uvažováno o investičním záměru modernizace sledované spalovny nebezpečných odpadů.

Za tímto účelem jsou stanoveny základní parametry pro modernizaci spalovny:

- Trvalé plnění emisních limitů.
- Nepoužívání vody jako absorpčního činidla v procesu čištění kouřových plynů.
- Plnění základních požadavků pro druhý stupeň spalování, tzn. prokazatelné zdržení kouřových plynů 2 sec. při teplotě 1 100 °C.
- Kontinuální měření sledovaných škodlivých látek na komíně před vypouštěním do ovzduší s možností záznamu těchto veličin do počítače s následným vyhodnocením dosahovaných hodnot a archivací.

Modernizace technologického zařízení spalovny je zaměřena na dosažení nejvyšší, ekonomicky dostupné, současné technické úrovně technologického zařízení, která zajistí, že budoucí provoz spalovny bude v souladu se všemi legislativními požadavky, které jsou platné v době vydání souhlasu se změnou stavby stávajícího středního zdroje znečišťování ovzduší.

Modernizace spočívá v opravách a úpravách stávajícího spalovacího zařízení, v náhradě stávajícího teplovodního spalínového kotle za nový, v náhradě stávajícího zařízení pro mokré čištění spalin novým zařízením na vícestupňové suché čištění spalin. Dále spočívá v instalaci souboru zařízení na kontinuální emisní monitoring polutantů (CO, NO_x, SO₂, TOC, HCl, TZL) a kontinuální monitoring parametrů spalovacího procesu. Jedná se o sledování obsahu O₂ ve spalinách, teplot spalin T₁, T₂ (na výstupu z 1. a 2. stupně spalování) a parametrů nosného plynu, kterými jsou: teplota spalin T_s, tlak spalin p_s, vlhkost spalin φ_s a průtok spalin Q_s.

Účelem modernizace spalovny je dosáhnout plnění všech zákonných a normativních předpisů, které jsou platné pro provoz spaloven nebezpečného odpadu, zařazených do kategorie „střední zdroj znečišťování ovzduší“, s projektovou kapacitou ≤ 10 t·den⁻¹.

Modernizací zařízení spalovny se nezmění spalovací kapacita. Spalovna bude po modernizaci zaměřena především na zneškodňování nebezpečného průmyslového odpadu z podniku Snaha a doplňkově budou spalovány odpady ze zdravotnických zařízení i některé druhy a komunálního charakteru. Druhy odpadů, které budou zneškodňovány po provedení modernizace, jsou uvedeny v přehledové tabulce v příloze 1.

4.1 Modernizace zařízení

Modernizace se týká prakticky veškerého hlavního technologického zařízení stávající spalovny. To je zařízení termické části, zařízení v části využití tepla spalin a zařízení na čištění spalin. Dále se v rámci modernizace provede instalace souboru zařízení na kontinuální měření emisí.

Z hlavního technologického zařízení se modernizace týká:

- Spalovací pyrolýzní pece – oprava vyzdívek, roštů, odpelňovacího zařízení, repase hořáku a jeho nové umístění.
- Termoreaktoru – oprava pláště a vyzdívek, repase stávajícího hořáku a instalace dalšího hořáku.
- Žárového potrubí spalin mezi výstupem z termoreaktoru po vstup do horkovodního spalinového výměníku.
- Instalace nového zařízení na odsun popelového kontejneru z popelové jámy.
- Instalace nového horkovodního spalinového výměníku a dochlazovacího výměníku.
- Instalace technologického zařízení v úseku čištění spalin. Zařízení mokrého čištění spalin bude demontováno, včetně spalinového potrubí, až po komín a bude nahrazeno novým technologickým zařízením na třístupňové suché čištění spalin a novým spalinovým potrubím.
- Instalace automatického monitorovacího systému (AMS) v rozsahu:
 - Kontinuální měření hmotnostních koncentrací znečišťujících látek NO_x , CO , SO_2 , TOC , HCl , TZL a obsah O_2 .
 - Kontinuální měření stavových veličin nosného plynu: teplota T_s a tlak p_s .
 - Kontinuální měření parametrů nosného plynu: vlhkost φ_s a průtok Q_s .
 - Kontinuální měření parametrů spalovacího procesu:
 - teplota na výstupu ze spalovacího prostoru 2. stupně spalování T_2 ,
 - teplota na výstupu ze spalovacího prostoru 1. stupně spalování T_1 .
 - Zaznamenávání provozních stavů zařízení.
 - Zaznamenávání hmotnosti zneškodňovaného odpadu.
 - Zpracování naměřených hodnot do protokolů.
 - Archivace naměřených hodnot a protokolů o měření.

4.2 Návrh modernizace technologie spalování odpadu

Zařízení termické části bude realizovat spalování odpadu technologií dvoustupňového tepelného rozkladu odpadu.

První stupeň pyrolýzního tepelného rozkladu odpadu bude probíhat ve spalovacím prostoru pyrolýzní komorové pece (Obrázek 16, pozice 1) za omezeného přísunu spalovacího vzduchu a za teplot spalovacího procesu $550 \div 750$ °C.

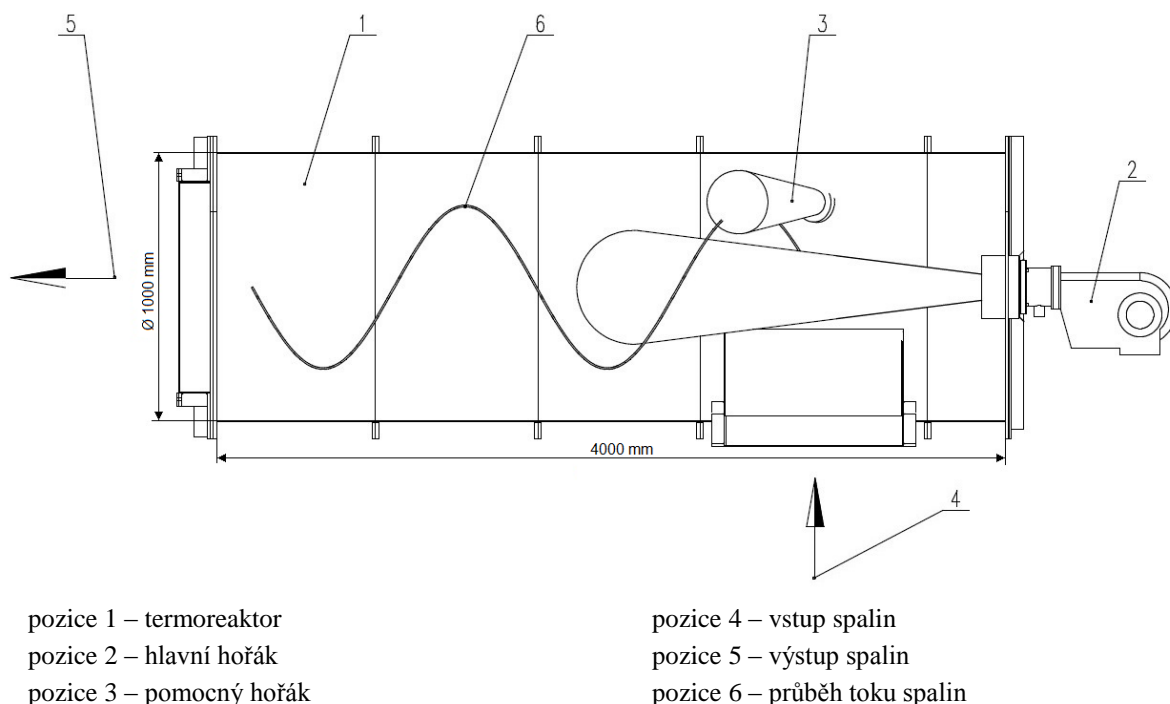
Teplota spalin T_1 z prvního stupně spalování odpadu bude kontinuálně měřena v žárově vyzdřeném přechodovém spalinovém průduchu mezi komorovou pecí a vstupní částí termoreaktoru. Nastavenou teplotu bude podle naměřených hodnot teploty spalin udržovat komorový hořák se zapalovací a stabilizační funkcí a s automatickou regulací tepelného výkonu. Palivem tohoto hořáku bude zemní plyn (ZP). Přívod spalovacího vzduchu pro hoření ZP bude zajišťovat ventilátor hořáku dle nastaveného směšovacího poměru. Spalovací

vzduch pro hoření odpadu bude do spalovacího prostoru přiváděn samostatným ventilátorem pod rošt komorové pece se sekundárním využitím na vzduchové chlazení roštu.

Při tepelném rozkladu spalitelných složek odpadu za nedostatečného přívodu spalovacího vzduchu, vzniká kouřový (hořlavý) plyn, který stále ještě obsahuje velké množství CO a organických látek TOC, schopných dalšího tepelného rozkladu – pyrolýzní plyn. Tento vysoce výhřevný plyn bude veden z komorové pece průduchem do hořákové komory termoreaktoru.

Druhý stupeň spalování bude probíhat ve spalovacím prostoru termoreaktoru (Obrázek 16, pozice 2), oxidačním spalováním pyrolýzního plynu. Přívod spalovacího vzduchu, potřebného pro hoření pyrolýzního plynu, bude regulován v oblasti mírného přebytku kyslíkovou sondou, umístěnou na spalínovém potrubí za spalínovým kotlem.

Teplota T_2 spalovacího procesu druhého stupně spalování bude, v souladu se zněním § 9 odstavec 1 písmeno d) nařízení vlády č. 415/2012 Sb. nastavena minimálně na 1 100 °C. Požadovanou hodnotu teploty T_2 , měřenou poblíž stěny spalovací komory termoreaktoru na výstupu spalin z této komory, budou zajišťovat dva hořáky na zemní plyn s automatickou regulací tepelného výkonu podle aktuální hodnoty kontinuálně měřené teploty T_2 . Čidlo měření teploty T_2 bude umístěno podle požadavku bodu § 9 odstavec 1 písmeno d) nařízení vlády č. 415/2012 Sb.



Obrázek 15: Schéma spořádání hořáků a toku spalin v termoreaktoru

Druhým legislativním požadavkem je zdržení spalovaného plynu ve spalovacím prostoru termoreaktoru (Obrázek 16, pozice 2) po dobu nejméně dvou sekundu (při dané teplotě). Splnění obou požadavků je dosaženo nově navrhovaným řešením konstrukce termoreaktoru. Vstup kouřových plynů do systému dodatečného spalování je v tangenciální

ose, čímž je proud vstupujícího plynu uměle vnučena spirálová trajektorie. Jeden z hořáků je umístěn v podélné ose zařízení a zajišťuje dostatečnou teplotu v celém průřezu termoreaktoru, druhý hořák je umístěn tangenciálně v proudě vstupu kouřových plynů a umocňuje spirálové proudění v termoreaktoru s podporou dostatečného setrvání kouřových plynů v tomto stupni dodatečného spalování. Návrh konstrukce termoreaktoru s umístěním hořáků a trajektorie toku spalovaného plynu je zobrazen na Obrázek 15.

Naměřené hodnoty teplot T_1 a T_2 budou zaznamenávány automaticky do databáze měřených hodnot emisí znečišťujících látek, provozních parametrů odpadního plynu (spalin) a údajů o provozním stavu zařízení.

Palivem hořáků termoreaktoru bude zemní plyn (ZP). Přívod spalovacího vzduchu pro hoření ZP budou zajišťovat ventilátory integrované do každého hořáku dle nastaveného směšovacího poměru.

Po výstupu z termoreaktoru budou spaliny vedeny žárovým potrubím, které bude součástí žárového kouřovodu a které vede ke spalínovému parnímu kotli (Obrázek 16, pozice 3). Na žárové potrubí je přímo napojen ve vertikálním směru havarijní komín. V případě vzniku havarijní situace, havarijní klapka automaticky otevře odtah spalin do havarijního komína. Současně se otevře i přísávací klapka, kterou se přísává do spalin, proudících havarijním odtahem, chladicí vzduch z prostoru spalovny. Každé otevření havarijní klapky a odvod spalin do ovzduší havarijním komínem bude automaticky spojeno s blokováním přísunu odpadu do komorové pece a bude automaticky zaznamenáno do databáze údajů o provozním stavu zařízení.

4.3 Modernizace technologie čištění spalin

Po výstupu ze spalínového kotle (Obrázek 16, pozice 3), budou spaliny, o teplotě $200 \div 240$ °C, vedeny spalínovým potrubím do souboru zařízení pro čištění spalin. Pro čištění spalin, které vznikají při spalování odpadu a podpůrného paliva (zemního plynu), bude použita technologie suchého trojstupňového čištění. První stupeň čištění spalin bude rozdělen na dva úseky. Úseky se od sebe odlišují teplotou spalin a typy sorbentů, které se do spalin v těchto úsecích dávkuje.

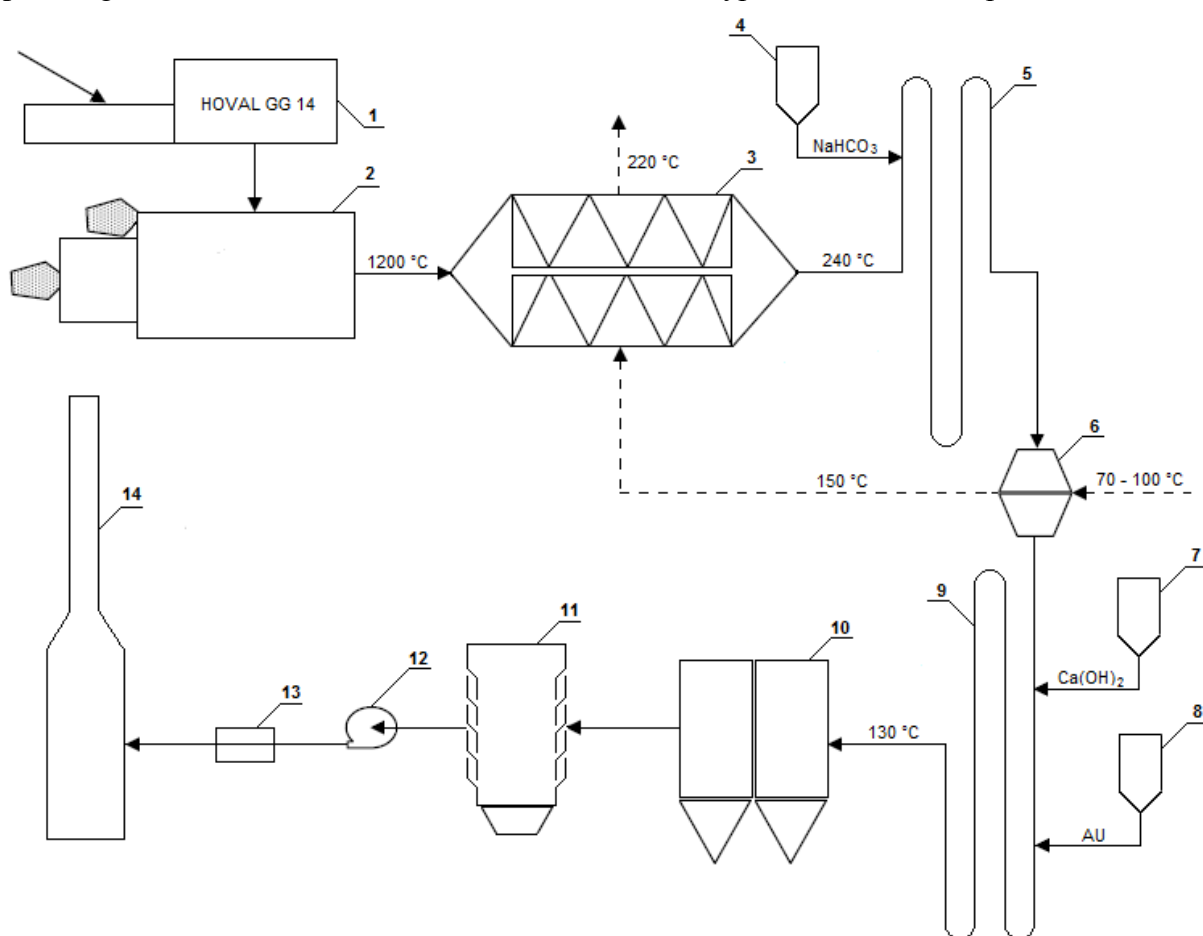
V prvním úseku prvního stupně čištění spalin se budou pomocí sorbentu I – NaHCO_3 , dávkovaného přímo do proudě spalin, odlučovat znečišťující látky kyselého charakteru: HCl , HF a SO_2 . Proces probíhá s účinností $\eta = (95 \div 99)$ %, garantováno výrobcem sorbentu.

Po dochlazení spalin na teplotu 130 °C se budou v druhém úseku nezávisle dávkovat do spalin sorbent II – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a sorbent III – aktivní uhlí. Sorbent II bude použit pro zvýšení celkového stupně odlučování kyselých znečišťujících látek a sorbent III je použit pro zvýšení celkového stupně odlučování těžkých kovů a vysoce stabilních organických látek typu PCDD/F. Všechny použité sorbenty mají charakter prášku. Potřebné doby kontaktu znečišťujících látek s aktivními látkami sorbentů budou zajištěny prodloužením dráhy spalin

pomocí kontraktoru-reaktoru, instalovaného do potrubí spalín v každém z obou teplotních úseků.

Druhý stupeň čištění bude realizován mechanickým odloučením tuhých znečišťujících látek (TZL). Všechny tuhé znečišťující látky, včetně částic zreagovaných i nezreagovaných sorbentů, budou zachycovány na filtrační tkanině tkaninového rukávového filtru, kde dobíhají zbytkové reakce (tzv. filtsorpce) s dobou zdržení min. 0,5 s. U navrhovaného tkaninového rukávového filtru výrobce zaručuje účinnost $\eta = 99,95\%$ při odlučování TZL a částic sorbentů.

Třetí stupeň čištění, takzvaný dočišťovací, je realizován záchytem (adsorpcí) převážně části zbytkových podílů těžkých kovů, aromatických uhlovodíků a látek typu PCDD/F na povrch granulek sorbentu IV – aktivní uhlí, které tvoří výplň dioxinového kapacitního filtru.



pozice 1 – pyrolýzní pec

pozice 2 – termoreaktor

pozice 3 – tepelný výměník

pozice 4 – dávkovač sorbentu I

pozice 5 – trubní reaktor I

pozice 6 – chladič spalín

pozice 7 – dávkovač sorbentu II

pozice 8 – dávkovač sorbentu III

pozice 9 – trubní reaktor II

pozice 10 – rukávový filtr

pozice 11 – dioxinový kapacitní filtr

pozice 12 – ventilátor

pozice 13 – automatický monitorovací systém

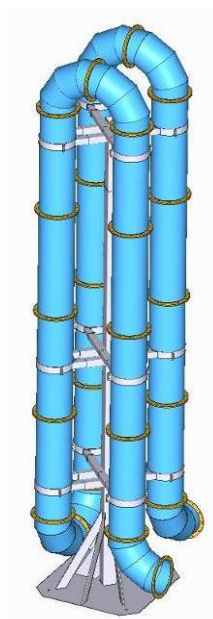
pozice 14 – komín

Obrázek 16: Schéma návrhu technologického řešení čištění spalín

4.3.1 První stupeň čištění spalin

V prvním stupni čištění spalin bude použita technologie NEUTREC[®], doplněná po dochlazení spalin o nezávislou aplikaci dalších dvou sorbentů pro chemisorpční odlučování části zbytkového podílu znečišťujících látek kyselého charakteru a pro předčištění spalin odlučováním par a aerosolů těžkých kovů a plynných látek typu PCDD/F adsorpcí na částice sorbentu III.

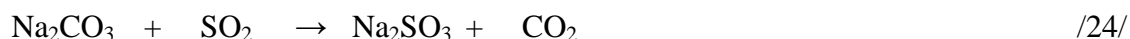
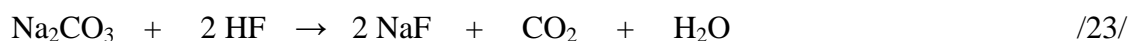
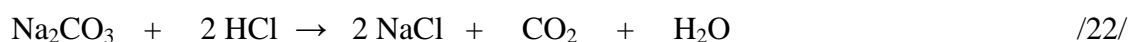
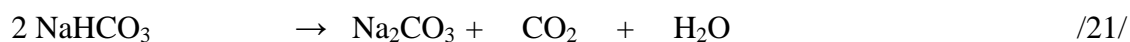
V prvním úseku bude zařízením (Obrázek 16, pozice 4) realizováno autonomní kontinuální dávkování sorbentu I (NaHCO_3) ve velmi jemně mleté, prachové konzistenci, do spalin proudících spalinovým potrubím za jejich výstupem ze spalinového kotle. Množství dávkovaného sorbentu bude možno měnit změnou otáček elektromotoru pohonu dávkovače. Potřebnou časovou prodlevu (> 2 s) pro termický rozpad sorbentu I a reakci produktu rozpadu se znečišťujícími látkami kyselého charakteru, bude zajišťovat trubní reaktor (Obrázek 16, pozice 5). Trubní reaktor bude tvořen meandrovitě vedeným spalinovým potrubím, které prodlouží dráhu spalin v kontaktu se sorbentem. Vícenásobnou změnou směru proudění se sorbent rozptýlí po celém průřezu proudu spalin, které mají v tomto prvním úseku teplotu $200 \div 240$ °C.



Obrázek 17: Trubní reaktor měnící směr 3x o 180 °

Hydrogenuhličitan sodný (NaHCO_3) se při teplotách nad 145 °C již poměrně rychle rozkládá na uhličitan sodný (Na_2CO_3), čímž vzrůstá jeho zásaditost a zejména se zvětšuje jeho reakční povrch. Při následném postupu kontraktorem-reaktorem, dochází k reakcím mezi Na_2CO_3 a kyselými znečišťujícími látkami (HCl , HF , SO_2) a také kysličníky těžkých kovů. Tyto znečišťující látky budou aktivní látkou tvořící sorbent I nejen chemicky vázány, ale i adsorbovány na její povrch.

Chemické reakce probíhají při stechiometrickém poměru sorbentu a znečišťující látky v rozsahu (1,2 ÷ 1,5). Reakce pro uvedené znečišťující látky lze popsat následujícími chemickými rovnicemi:

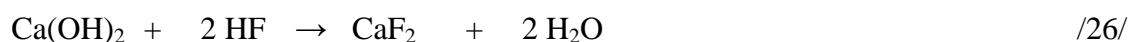
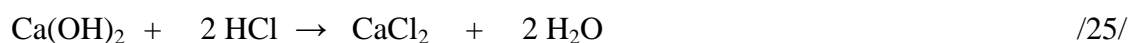


Chemickými reakcemi vznikají soli v pevném skupenství NaCl, NaF, Na₂SO₃ a tuhé uhličitany kovů, které jsou spalinami unášeny v podobě jemných částic do druhého úseku prvního stupně čištění spalin. Ostatní produkty chemických reakcí (CO₂ a H₂O) jsou ve spalinách obsaženy v plynném stavu.

Druhý úsek prvního stupně čištění spalin je oddělen dodatkovým spalinovým výměníkem (Obrázek 16, pozice 6), který dochladí spaliny na teplotu 110 ÷ 150 °C. K tomu využívá jako teplonosné medium napájecí vodu parního kotle. Tím je zajištěno přehřátí napájecí vody vstupující do kotle na teplotu okolo 150 °C, při tlaku 12 bar. V tomto úseku se do spalin nezávisle dávkuje dva sorbenty, jejichž účinnost při odlučování škodlivin je vyšší při nižších teplotách spalin.

Za výstupem ze spalinového výměníku (Obrázek 16, pozice 6) bude do spalin proudících spalinovým potrubím dávkován sorbent II [Ca(OH)₂] s velmi jemnou prachovou konzistencí. Tuto funkci bude zajišťovat zařízení (Obrázek 16, pozice 7). Množství dávkovaného sorbentu bude možno měnit změnou otáček elektromotoru pohonu dávkovače. Následně bude zařízením (Obrázek 16, pozice 8) do spalin autonomně a kontinuálně dávkován sorbent III (aktivní uhlí) ve velmi jemně mleté, prachové konzistenci. Množství dávkovaného sorbentu bude možno měnit změnou otáček elektromotoru pohonu dávkovače. Potřebnou časovou prodlevu (> 2 s) pro reakci sorbentu II se znečišťujícími látkami kyselého charakteru a pro adsorpci těžkých kovů a látek typu PCDD/F na částice sorbentu III, bude zajišťovat druhý trubní reaktor (Obrázek 16, pozice 9), který prodlouží dráhu spalin při kontaktu se sorbenty II a III vícenásobnou změnou směru proudění a rozptýlí sorbenty po celém průřezu proudu spalin.

Při teplotách 110 ÷ 150 °C a za zvýšeného obsahu vodní páry ve spalinách, která se do spalin dostala chemickými reakcemi sorbentu I s kyselými látkami v prvním úseku, hydroxid vápenatý [Ca(OH)₂] chemicky reaguje s velmi dobrou účinností se zbytkovým podílem kyselých látek ve spalinách, zejména s SO₂. Rovněž je schopen adsorpcí zachycovat těžké kovy. Chemické reakce probíhají při stechiometrickém poměru sorbentu II se znečišťujícími látkami v rozsahu (1,5 ÷ 3,5). Reakce pro uvedené znečišťující látky lze popsat následujícími chemickými rovnicemi:



Chemickými reakcemi vznikají tuhé vápenaté soli CaCl_2 , CaF_2 a CaSO_4 , které budou spalinami unášeny v podobě jemných částic.

Sorbent III je do spalin ve druhém úseku prvního stupně čištění spalin dávkován pro zvýšení celkového stupně odlučivosti těžkých kovů a látek typu PCDD/F. Sorbentem bude aktivní uhlí v podobě granulek o velikosti $1,5 \div 3$ mm. Jedná se o granulky, které mají vysoce porézní povrch a tím i velkou kontaktní plochu potřebnou pro adsorpci látek, které tento sorbent zachycuje. Před dávkování do spalin budou tyto granulky rozemlety do jemné prachové konzistence. Přesto si každá částice rozemletého sorbentu zachovává povrchové vlastnosti jako původní granule a pro adsorpci skýtají obrovský měrný povrch až $450 \div 600 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

Uvedenými postupy budou znečišťující látky obsažené ve spalinách v plynném stavu a ve formě aerosolu převedeny v obou úsecích prvního stupně čištění do tuhé fáze a je možné realizovat jejich odloučení ze spalin mechanickým způsobem v následujícím druhém stupni čištění.

4.3.2 Druhý stupeň čištění spalin

V druhém stupni čištění bude docházet k mechanickému odloučení všech tuhých částic ze spalin. Tuhé částice budou tvořeny zareagovanými a nezareagovanými částicemi sorbentů, tuhými solemi a uhličitany kovů a tuhými znečišťujícími látkami (TZL) – popílkem z procesu termické degradace odpadu (spalování).

Mechanické odloučení všech tuhých částic ze spalin se bude realizovat průchodem spalin filtrační tkaninou uspořádanou do rukávců v tělese tkaninového filtru (Obrázek 16, pozice 9). Tuhé látky, vzniklé v průběhu čištění spalin a TZL z procesu termické degradace odpadu, budou zachycovány na povrchu filtrační tkaniny rukávců filtru. Odprášení (očištění) filtračních ploch od zachycených tuhých látek bude prováděno cyklicky, pomocí zpětného proplachu filtračních ploch stlačeným vzduchem. Délka intervalu mezi dvěma po sobě jdoucími proplachy je závislá na dosažení nastavené tlakové ztráty filtru. Odprášení filtračních ploch probíhá automaticky a bude řízeno automatikou filtru. V rukávcovém tkaninovém filtru, v časovém úseku mezi po sobě následujícími cykly čištění filtračních ploch, budou probíhat současně ještě reakce mezi zbytkovými nezareagovanými sorbenty a zbytkovými volnými znečišťujícími látkami.

Odloučené produkty z čištění spalin a TZL se budou shromažďovat ve dvou výsypkách tkaninového rukávcového filtru. Výsypky budou ukončeny na spodní straně nožovým uzávěrem. Na nožový uzávěr bude připevněna dvojklapka. K odpouštění

zachycených tuhých látek bude docházet po otevření nožového uzávěru periodickým střídavým otevíráním a zavíráním klapek. Takto bude zajištěno udržení stálého podtlaku v tkaninovém filtru a rovněž i ve všech ostatních aparátech, spojených spalínovým potrubím. Na výpad z dvojklapek bude připojen plnicí rukáv velkoobjemového pytle Big-Bag. Pro tento účel se budou používat vyprázdňené pytle Big-Bag od sorbentů I a II. Pro dokonalejší plnění budou pytle zavěšeny na pomocné konstrukci a pro lepší manipulovatelnost podloženy paletou.

- **Celková filtrační plocha** – 100 m²
- **Filtrační tkanina** – Polyamid p84 tribotex, impregnace PTFE

4.3.3 Třetí stupeň čištění spalin

Ve třetím stupni čištění spalin se budou dočišťovat spaliny záchytem převážné části zbytkového podílu vysoce stabilních organických látek typu polychlorovaných dibenzodioxinů (PCDD) a polychlorovaných dibenzofuranů (PCDF) a zbytkových úletů těžkých kovů především rtuti (Hg).

Záchyt těchto látek se bude realizován adsorpcí na sorbent IV, kterým bude v tomto stupni čištění granulované aktivní uhlí (AU). Granule AU budou vyplňovat šachtu dioxinového kapacitního filtru (DKF) (10).

Spaliny o teplotě 110 ÷ 130 °C budou vstupovat do DKF, který bude konstruován tak, aby rychlost proudění spalin náplni AU byla kolem 0,5 m·s⁻¹ a zároveň byla zajištěna doba kontaktu zbytkových znečišťujících látek s povrchem AU kolem 5 sekund. Co možná největší kontaktní plocha bude zajištěna speciální úpravou povrchu granulek AU tak, že vznikne povrch s vysokou porézností (makropóry), který zajistí dostatečnou adsorpci uvedených látek. Měrný povrch granulek by měl mít v tomto stupni čištění spalin hodnotu 600 ÷ 800 m²·g⁻¹.

Vstup spalin do hranolové části DKF bude nad výsypkou DKF a bude orientován šikmo ke stěně. Výstup spalin bude na protější stěně hranolové části DKF, kolmo na stěnu.

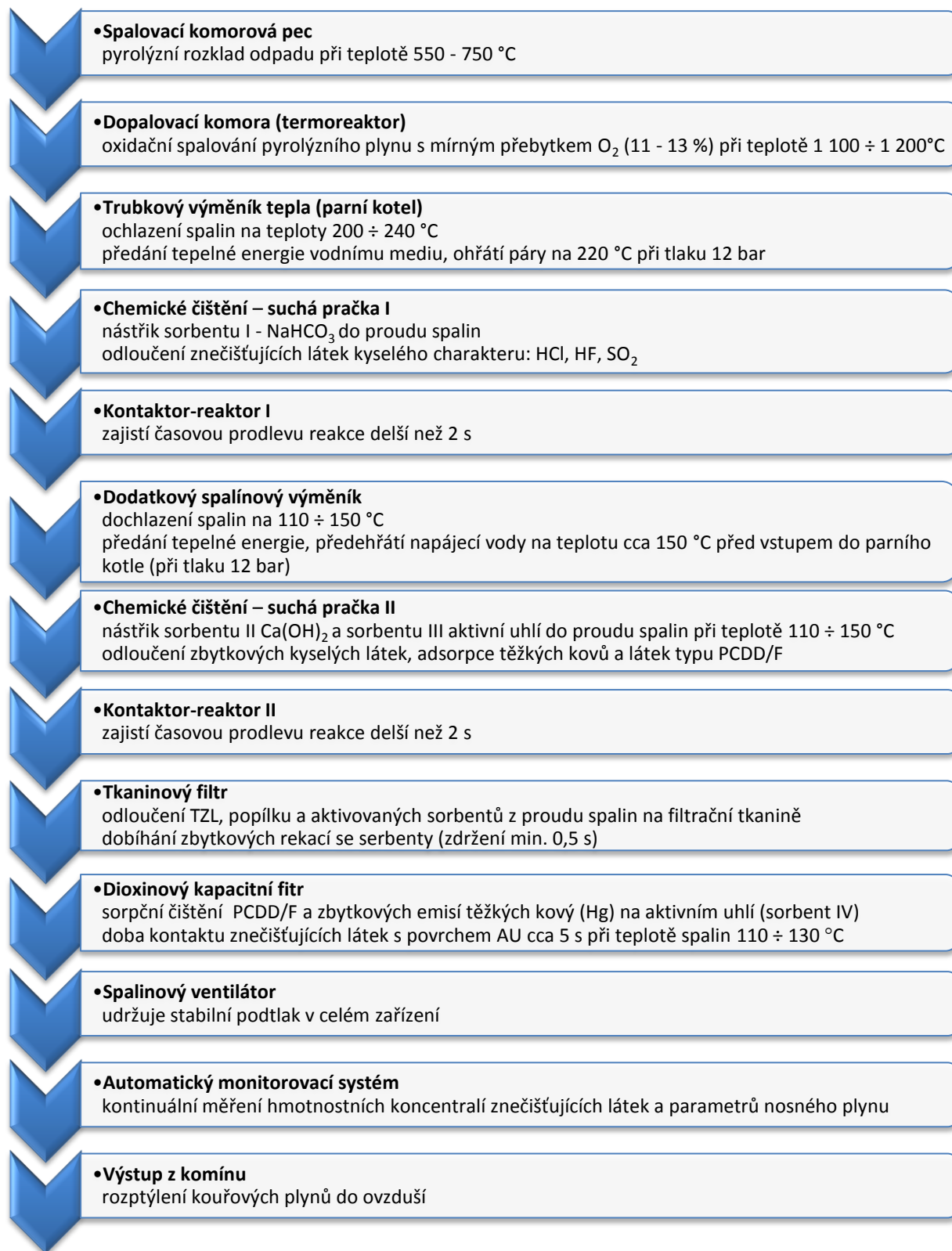
Za DKF bude zařazen do proudu spalin, vedených potrubím, spalínový ventilátor (Obrázek 16, pozice 12), který bude vytvářet podtlak ve všech zmíněných aparátech a tím odvádět spaliny ze spalova-cího zařízení přes všechna zařízení pro využití tepla spalin a čištění spalin do odtahového komína.

Objemový výkon spalínového ventilátoru bude řízen automaticky, změnou otáček motoru spalínového ventilátoru podle hodnoty podtlaku měřené kontinuálně v komorové peci.

Za spalínovým ventilátorem budou spaliny vedeny přetlakovým úsekem spalínového potrubí do provozního odtahového komína (Obrázek 16, pozice 14). V přetlakové části spalínového potrubí, mezi výtlakem ze spalínového ventilátoru a sopouchem komínu, bude vytvořen přímý úsek, (vodorovně situovaný) pro instalaci zařízení automatického monitorovacího systému a zařízení pro oprávněná měření (Obrázek 16, pozice 13). Zařízení bude kontinuálně měřit hmotnostní koncentraci znečišťujících látek NO_x, CO, SO₂, TOC, HCl, TZL a obsah O₂, stavové veličiny nosného plynu: teplota T_s a tlak p_s, a parametry nosného

plynu: vlhkost φ_s a průtok Q_s . Naměřená data budou automaticky zpracovávána a ukládána do operačního počítače.

Technologické řešení, tj. posloupnost řazení jednotlivých strojně-technologických souborů spalovny je uvedeno v následujícím schématu.



Obrázek 18: Posloupnost strojně-technologických souborů navrhovaného řešení spalovny

4.4 Výběrové řízení

V České republice existují tři hlavní společnosti zabývající se technologií čištění kouřových plynů. ZVVZ-Enven Engineering, a. s. se zaměřuje na realizaci projektů v souvislosti s odlučováním a odprašováním tuhých a plynných znečišťujících látek, což se jeví z pohledu komplexnosti tohoto projektu, který se zabývá jednak samotným technologickým řešením spalování nebezpečného odpadu a dále třístupňovým čištěním spalin kouřových plynů, jako nedostatečné. Z tohoto důvodu není doporučeno, aby firma pokračovala ve výběrovém řízení. Druhá tuzemská společnost EVECŮ Brno, s. r. o. je vhodným kandidátem pro postup do druhého kola výběrového řízení, neboť mají dlouholeté zkušenosti jednak s termickým zpracováním odpadu, tak i čištěním odpadních plynů se specializací na mokré pračky. Jako nejvhodnější kandidát pro realizaci daného projektu se jeví společnost SMS CZ s. r. o., která se zabývá problematikou termického zpracování odpadu více než 20 let. Má dlouholeté zkušenosti a bohaté reference v souvislosti s technologií čištění kouřových plynů jak mokrou, tak zejména suchou metodou, která je v této práci navrhována jako vhodná metoda pro čištění kouřových plynů ve spalovně nebezpečného odpadu Snaha.

4.4.1 Rozpočet projektu

Ve spolupráci se společností SMS CZ s. r. o. byl vypracován rozpočet pro realizaci navrženého projektu uvedený v následující tabulce.

Tabulka 19: Rozpočet realizace inovace čištění spalin

| | Dodávka | Montáž | Celkem |
|---------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Spalinové potrubí | 580 000,- | 300 000,- | 880 000,- |
| Dávkovač sorbentu (3 ks) | 1 215 000,- | 400 000,- | 1 615 000,- |
| Reaktor pro adsorpci (2 ks) | 1 800 000,- | 300 000,- | 2 100 000,- |
| Tkaninový rukávcový filtr | 1 600 000,- | 280 000,- | 1 880 000,- |
| Dioxinový filtr | 2 250 000,- | 280 000,- | 2 530 000,- |
| Ocelové konstrukce pro technologii čištění spalin | 170 000,- | 120 000,- | 290 000,- |
| Hlavní odtahový ventilátor | 240 000,- | 100 000,- | 340 000,- |
| Hlavní odtahový kouřovod | 580 000,- | 120 000,- | 700 000,- |
| Výroba a rozvod stlačeného vzduchu | 285 000,- | 100 000,- | 385 000,- |
| Celkem | 8 720 000,- | 2 000 000,- | 10 720 000,- |

4.5 Ekonomické posouzení návrhu

Abychom mohli přistoupit k hodnocení navrhované investice, musíme se nejprve znát výnosově-nákladovou charakteristiku takového provozu, ze kterého určíme celkové roční výnosy a náklady. Ty jsou podkladem pro výpočet ukazatele EBIT a po odečtení úroku a daní pro výpočet čistého zisku. Z finančních toků generovaných navrhovanou investicí jsou vypočteny ukazatele čisté současné hodnoty investice, vnitřní výnosové procento a návratnost investice.

4.5.1 Provozní výnosy

Za hlavní provozní výnosy spalovny považujeme prodej vyrobeného tepla a službu spalování nebezpečného odpadu. Pro jejich výpočet vycházíme z charakteristiky dané spalovny nebezpečných odpadů.

| | |
|-------------------------------------------|------------------------------|
| Projektovaná kapacita spalovny | 2 500 kg.den ⁻¹ |
| Množství spáleného odpadu za rok | 612 000 kg.rok ⁻¹ |
| Počet provozních dní | 250 dnů |
| Průměrná denní výkonost | 2 448 kg.den ⁻¹ |
| Projektovaná výkonnost tepelného výměníku | 800 kW |

Denně je při spalování průměrného množství 2 448 kg nebezpečných odpadů s cenou 7 Kč za zneškodnění 1 kg nebezpečného odpadu vyrobeno cca 56 GJ tepla, které je prodáváno za výkupní cenu 320 Kč.GJ⁻¹. Při 250 provozních dnech získáváme následující provozní výnosy spalovny nebezpečného odpadu.

Tabulka 20: Provozní výnosy

| | |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Produkce tepla | 56 GJ.den ⁻¹ |
| Výkupní cena tepla | 320 Kč.GJ ⁻¹ |
| Denní výnos z produkce tepla | 18 063 Kč.den ⁻¹ |
| Celkový roční výnos z produkce tepla | 4 515 840 Kč.rok⁻¹ |
| Výnos na 1 kg spáleného odpadu | 7,4 Kč.kg ⁻¹ |
| Průměrná denní výkonnost | 2 448 kg.den ⁻¹ |
| Průměrná cena spalovaného NO | 7 Kč.kg ⁻¹ |
| Denní výnos ze spalování NO | 17 136 Kč.den ⁻¹ |
| Celkový roční výnos ze spalování NO | 4 284 000 Kč.rok⁻¹ |
| Výnos na 1 kg spáleného odpadu | 7,0 Kč.kg ⁻¹ |
| Celkové roční výnosy | 8 799 840 Kč |

Celkové roční výnosy jsou určeny na úrovni 8 799 840 Kč, při výnosu 14,4 Kč za kilogram spáleného nebezpečného odpadu.

4.5.2 Provozní náklady

V následujících tabulkách jsou uvedeny hlavní provozní náklady spalovny s ohledem na spotřebu jednotlivých činitelů a jejich cenu. Prvním významným nákladem je spotřeba sorbentů dávkovaných do proudu spalin. Jejich jednotková cena spotřeba je uvedena v následující tabulce.

Tabulka 21: Náklady na sorbenty

| Sorbenty | Typ | Nákupní cena | Průměrná spotřeba | Náklad |
|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | [Kč.kg ⁻¹] | [kg.hod. ⁻¹] | [Kč.h ⁻¹] |
| Soda bicarbona | NaHCO ₃ | 12 | 7 | 84 |
| Hydroxid vápenatý | Ca(OH) ₂ | 7 | 5 | 35 |
| Aktivní uhlí práškové | Norit GL 50 | 40 | 0,1 | 4 |
| Aktivní uhlí granulované | Norit RB 4W | 70 | 0,2 | 14 |
| Denní náklad | | | 3 288 | Kč.den ⁻¹ |
| Celkový roční náklad | | | 822 000 | Kč.rok⁻¹ |
| Náklad na 1 kg spáleného odpadu | | | 1,3 | Kč.kg ⁻¹ |

Dalším významným nákladem je spotřeba energií – zemní plyn jako palivo pro hořáky a elektrická energie pro provoz celého zařízení. Jejich spotřeba a jednotková cena je uvedena v následující tabulce.

Tabulka 22: Náklady na energii

| Spotřeba energie | Nákupní cena | Průměrná spotřeba | Náklad |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| | [Kč.m ⁻³] | [m ³ .h ⁻¹] | [Kč.h ⁻¹] |
| Zemní plyn | 12 | 28 | 336 |
| | [Kč.kWh ⁻¹] | [kW.h ⁻¹] | [Kč.h ⁻¹] |
| El.energie | 2 | 32 | 64 |
| Celkový hodinový náklad | | | 9 600 Kč.den ⁻¹ |
| Celkový roční náklad | | | 2 400 000 Kč.rok⁻¹ |
| Náklad na 1 kg spáleného odpadu | | | 3,9 Kč.kg ⁻¹ |

Ve sledované spalovně se pracuje v nepřetržitém třísměnném provozu, kdy ranní a odpolední směna čítá dva zaměstnance. Vedoucího směny zodpovědného za sledování a řízení spalovacího procesu a celé technologické linky a dělníka, který spalovaný odpad přijímá, váží a s odpadem manipuluje. V případě noční směny je k dispozici pouze jeden pracovník, který dohlíží na chod zařízení. Mzdové náklady jsou významným faktorem ovlivňující hospodářský výsledek provozu.

Tabulka 23: Mzdové náklady

| Mzdové náklady | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| Měsíční mzdové náklady | 129 236 Kč.měs ⁻¹ |
| Celkový roční náklad | 1 550 827 Kč.rok⁻¹ |
| Náklad na 1 kg spáleného odpadu | 2,5 Kč.kg ⁻¹ |

Jako méně významné, avšak nezanedbatelné jsou považovány náklady na pojištění budov a strojně technologického zařízení a také ostatní náklady, mezi které je zařazeno například nákup ochranných pomůcek pro personál, náradí, maziva apod. Dále jsou uvažovány náklady na servis a opravy technologického zařízení spalovny.

Tabulka 24: Ostatní provozní náklady

| Ostatní provozní náklady | | |
|-----------------------------------------------------|----------------|----------------------------|
| Pojištění budovy a strojně technologického zařízení | 84 826 | Kč.rok ⁻¹ |
| Ostatní provozní náklady | 91 430 | Kč.rok ⁻¹ |
| Celkový roční náklad | 176 256 | Kč.rok⁻¹ |
| Náklad na 1 kg spáleného odpadu | 0,3 | Kč.kg ⁻¹ |

Tabulka 25: Náklady na servis a údržbu

| Náklady na servis a údržbu | | |
|---------------------------------|----------------|----------------------------|
| Údržba a opravy | 150 000 | Kč.rok ⁻¹ |
| Servis | 100 000 | Kč.rok ⁻¹ |
| Celkový roční náklad | 250 000 | Kč.rok⁻¹ |
| Náklad na 1 kg spáleného odpadu | 0,4 | Kč.kg ⁻¹ |

Dále jsou uvažovány náklady spojené se zneškodňováním vzniklého odpadu, který je klasifikován jako nebezpečný odpad a je nutné s ním v tomto smyslu dále nakládat. Jedná se o směs tuhých znečišťujících látek a sorbentů vstříkovaných do proudu spalin, které jsou následně společně odloučeny na rukávcovém filtru, a popílku vzniklého spalováním odpadu, který se redukuje přibližně na 7 % své původní hmotnosti.

Takto vzniklý odpad je zpracováván tzv. metodou solidifikace, což metoda smíchávání nebezpečného odpadu s elektrárenským popílkem, cementem a vodou. Následně je materiál ukládán na skládky nebezpečných odpadů, přičemž díky použité metodě nedochází k vyluhování nebezpečných látek z materiálu.

Tabulka 26: Náklady na zpracování produktů spalování

| Náklad na zpracování NO | | |
|------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Množství vzniklého NO (sorbenty, TZL, popílek) | 495 | kg.den ⁻¹ |
| | 123 840 | kg.rok ⁻¹ |
| | [Kč.t ⁻¹] | |
| Solidifikace + skládkování | 2 500 | 309 600 Kč.rok ⁻¹ |
| Celkový roční náklad | 309 600 | Kč.rok⁻¹ |
| Náklad na 1 kg spáleného odpadu | 0,5 | Kč.kg ⁻¹ |

Poslední nákladovou skupinou jsou odpisy, kde je zařazen průměrný roční odpis z pořizovací ceny strojně technologického zařízení čištění spalin (investiční záměr). Celková výše investice podle uvedeného rozpočtu je na úrovni 10 720 000 Kč s udávanou životností zařízení 15 let při dodržování kvalitativních standardů užívání a jeho pravidelné údržbě. Z těchto faktorů byl vypočítán roční odpis na 15 let s lineární metodou odpisování.

Tabulka 27: Odpisy

| Odpisy | | |
|-----------------------------------------|----------------|----------------------------|
| Roční odpis inovovaného zařízení | 714 667 | Kč.rok⁻¹ |
| Náklad na 1 kg spáleného odpadu | 1,2 | Kč.kg ⁻¹ |

Celkové roční náklady jsou 6 223 349 Kč, při jednotkových nákladech 10,2 Kč za kilogram spáleného nebezpečného odpadu.

4.5.3 Ekonomická a investiční analýza

Z uvedené analýzy výnosů a nákladů je vypočítán provozní zisk – EBIT, který je ponížěn o daň z příjmů právnických osob ve výši 19 % podle § 21 zákona č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů. Tímto způsobem je vypočítán čistý provozní zisk.

| | |
|----------------------------|---------------------|
| Celkové roční výnosy | 8 799 840 Kč |
| Celkové roční náklady | -6 223 349 Kč |
| EBIT | 2 576 491 Kč |
| Čistý provozní zisk | 2 086 958 Kč |

Pro vlastní investiční analýzu je použita metodika čisté současné hodnoty (ČSH), vnitřního výnosového procenta (VVP) a doby návratnosti (DN). ČSH vychází z peněžních toků tzv. cash-flow (CF) generovaných danou investicí po dobu životnosti zařízení, v tomto případě po dobu 15 let. Peněžní tok v jednotlivých letech vyjadřuje rozdíl výnosů a nákladů (bez odpisů) diskontovaný diskontní sazbou, která je v tomto případě stanovena na úrovni 3 %. Výše této sazby v sobě zahrnuje inflaci a riziko změny cen vstupů zejména ceny zemního plynu a elektrické energie, které se jeví z hlediska predikce vývoje cen v dlouhodobém období jako těžko předvídatelné. Čistá současná hodnota investice se vypočte podle následujícího vzorce:

$$ČSH = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad /28/$$

kde r reprezentuje diskontní sazbu a t je počet let (Eugene Brigham, 2010). Výše čisté současné hodnoty investice je určena na úrovni 21 104 594 Kč (příloha 2).

Vnitřní výnosové procento vychází jako ČSH z diskontovaného cash-flow a určuje relativní výnos, který investice během svého životního cyklu poskytuje. Vypočte se podle vztahu.

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+VVP)^t} \quad /29/$$

Výše vnitřního výnosového procenta je vypočítána na úrovni 20,3 % (příloha 2), což se pro dané odvětví jeví jako velmi vysoká hodnota.

Doba návratnosti udává z diskontovaných cash-flow počet let, za které se kumulované příjmy vyrovnají počáteční výši investice (Eugene Brigham, 2010). V případě této investice vychází doba návratnosti 4,35 let (příloha 2), což se jeví s ohledem na předpokládanou dobu využívání zařízení jako velmi dobré aktivum.

Z uvedené analýzy jednoznačně vyplývá, že navrhovaná investice vykazuje vynikající ekonomické předpoklady pro její realizaci. Doba návratnosti se pohybuje okolo 4 let při dané diskontní sazbě, což s ohledem na předpokládanou 15letou technickou životnost zařízení dává značný prostor pro generování poměrně velkých finančních zdrojů, které mohou být v budoucnu použity například pro financování rekonstrukcí a modernizace zařízení novými environmentálními technologiemi.

5 Diskuze

Návrh nového strojně technologického zařízení vychází ze základních nedostatků současného stavu spalovny nebezpečných odpadů SNAHA Brtnice, která nesplňuje legislativní normy platné pro provoz takového zařízení, což bylo prokázáno na základě měření emisí znečišťujících látek. Cílem návrhu inovace bylo zjednodušit a ekologizovat celou technologii spalování nebezpečných odpadů včetně následného zařízení pro čištění spalin.

Budeme-li hodnotit stávající stav čištění kouřových plynů, který je založen na tzv. mokřím principu, je patrné, že má několik výhod, ale z pohledu ekologizace převažují nevýhody. Účinnost mokřích praček je značně vyšší při zachycování škodlivých látek typu kyselých anorganických plynů (SO_2 , HCl , HF), kdy především v prvním stupni čištění, tzv. Quensch je absorpce poměrně vysoká a záchyt těchto látek je bezpochyby naprosto účinný. Následné propírání kouřových plynů ve vertikální několikastupňové koloně s příčně vestavenými křížovými tryskami zajišťují velmi účinný dočišťovací systém, který spolehlivě dočistí kouřové plyny od halogenidů i těžkých kovů.

Podstatnou, a to naprosto zásadní, nevýhodou daného systému čištění spalin jsou kouřové plyny, které ze zařízení vychází při teplotě okolo $42\text{ }^\circ\text{C}$ a jsou nasyceny vodní parou. V našem případě jsou pomocí kouřovodu a komínu při těchto parametrech přímo rozptylovány do ovzduší. Z toho důvodu jsou rozptylové podmínky velmi nepříznivé a imisní dopad je velmi krátký. Druhý nedostatek je zpracovávání odpadních vod odpouštěných z prvního stupně, to znamená z cirkulační nádrže. Zde jsou usazovány veškeré tuhé znečišťující látky, sedimenty a současně jsou v těchto absorpčních roztocích zakoncentrovány halogenidy, oxidy síry, i těžké kovy druhé a třetí třídy. Čištění těchto odpadních vod je velice problematické s ohledem na jednoduchost stávajícího strojně-technologického čištění odpadních vod. To znamená neutralizace, koagulace (shlukování částic) a flokulace (vysrážení částic). Všechny tyto procesy jsou podmíněny velmi dobrým pročištěním na kalolisu, kde jsou odloučeny všechny tuhé znečišťující látky obsažené v odpadních vodách.

Problematická je také manipulace s roztokem hydroxidu sodného, který je do spalovny dopravován v kapalné formě většinou jako koncentrovaný roztok. V některých případech se používá pecičkových NaOH jako tuhý louh, který se následně ve vodě rozmíchává a dále přečerpává do systému mokré pračky. Všechny tyto operace jsou velice náročné z hlediska bezpečnosti práce a je bezpodmínečně nutné dodržovat předepsané pracovní postupy.

Účinnost odlučování tuhých znečišťujících látek v mokřích pračkách není tak vysoká v porovnání s textilními filtry. Z toho důvodu koncentrace TZL v kouřových plynech přesahuje zákonem stanovené emisní limity. Strojně technologické zařízení tak, jak je navrženo, nemá ve svém procesu žádný vstup pro dávkování sorbentu, které dává záruky pro zachycování škodlivých látek typu PCDD/F. Absence takového systému podmiňuje vznik emisí takových látek v množství překračující povolené limity, což bylo prokázáno na základě provedeného měření emisí. Z tohoto důvodu jsou stávající mokré pračky doplňovány

o terciární stupeň čištění spalin, to znamená nástřik jemně mletého aktivního uhlí s následným ulpíváním na filtru, nebo systémem kapacitního filtru, nebo systémem REMEDIA navrženým firmou EVECOCO Brno. Pokud k takovému doplnění systému čištění spalin nedojde, technologie mokrého čištění není sama o sobě schopna dodržet v souvislosti s odlučováním PCDD/F zákonem stanovené limity.

Nově navrhované technické a technologické řešení vychází ze základních principů využívání suchých aditiv (tzv. suchých sorbentů) založených na principu sodíku (NaHCO_3), dále na bázi vápníku (Ca(OH)_2) a následně aktivního uhlí. Jednotlivé stupně pro maximální využívání těchto sorbentů jsem řešil v optimálních teplotních polích tak, aby procesy spojené s odlučováním kyselých anorganických plynů (HCl , HF , SO_2) za použití hydrogenuhličitanu sodného (proces NEUTREC) měly optimální procesní podmínky. Tedy teplotu, dobu reakce a počet vzájemných střetů aktivních částic. Tímto způsobem lze dosáhnout poměrně vysoké účinnosti procesu čištění spalin. Ve druhém stupni čištění jsem navrhl použití sorbentu hydroxidu vápenatého, pro který jsem optimalizoval procesní podmínky obdobným způsobem (teplota, čas a počet střetů), přičemž tyto procesní podmínky jsou odlišné od procesu NEUTREC. Posledním stupněm jsou procesy založené na nástřiku velmi jemně mletého aktivního uhlí do proudu kouřových plynů, který adsorbuje veškeré zbytkové podíly halogenidů, těžkých kovů a v neposlední řadě dibenzo-dioxinů a dibenzo-furanů. Všechny tři aditiva, tak jak jsem je uvedl, mají společnou charakteristiku. To znamená velmi jemně mletý sorbent (prášek), který se svými fyzikálními vlastnostmi dokáže v kouřovodu velice dobře promístit s kouřovými plyny a na svůj povrch adsorbovat znečišťující látky. Směs TZL a aktivovaného sorbentu je následně odlučován na tkanině rukávcového filtru, kde dobíhá reakce znečišťující látky s aktivovaným sorbentem. Takto navržené zařízení pracuje s velkou účinností, avšak vzniká poměrně velké množství odfiltrovaného materiálu, který je klasifikován jako nebezpečný odpad (NO) a je nutné s ním dále nakládat podle platné normy. Vzniklý NO doporučuji zpracovávat metodou solidifikace, což metoda smíchávání NO s elektrárenským popílkem, cementem a vodou, čímž dochází k nevyluhovatelosti škodlivých látek. Následně je materiál ukládán na skládky NO, přičemž díky použité metodě nedochází k vyluhování nebezpečných látek z materiálu. Druhou vhodnou metodou je vitifikace, což je proces zatavení NO do skla. Tímto způsobem je zabezpečeno zakonzervování nebezpečných látek na velice dlouhou dobu, avšak ekonomicky se oproti prvnímu navrženému způsobu jeví tato metoda výrazně nákladnější.

Mezi výhody metody suchého čištění spalin patří zejména používání sorbentů jako aktivního čistícího média. Tyto látky jsou nedráždivé a je možné pracovat s nimi s běžnými ochrannými pomůckami, což obecně zjednodušuje a zbezpečňuje práci v daném provozu. Vzhledem k faktu, že se jedná o jemný sypký prášek, dávkování do proudu spalin je bezproblémové a velmi přesné. V případě úniku sorbentu do okolí při jeho manipulaci nedochází ke kontaminaci půdy, ovzduší, ani podzemních či povrchových vod.

Pro snižování koncentrací CO a TOC je v mé práci navržen nový systém dodatečného spalování kouřových plynů v termoreaktoru, který plní předepsané funkce. To znamená dostatečnou dobu setrvávání kouřových plynů při legislativní normou předepsané teplotě. Tyto dva základní požadavky nebyly v případě původního strojně technologického provedení dlouhodobě plněny, což se projevilo při měření emisí znečišťujících látek, kdy byla naměřena nadlimitní koncentrace CO a TOC ve spalinách. V případně návrhu inovace vybrané spalovny nebezpečných odpadů je těchto požadavků dosaženo nově navrhovanou konstrukcí systému dodatečného spalování s tangenciálním vstupem kouřových plynů do termoreaktoru a zařazením dvou nezávislých plynových hořáků. Přičemž jeden hořák je umístěn v podélné ose zařízení a zajišťuje dostatečnou teplotu v celém průřezu termoreaktoru, druhý je umístěn tangenciálně v proudu vstupu kouřových plynů a umocňuje spirálové proudění v termoreaktoru s podporou dostatečného setrvání kouřových plynů v tomto stupni dodatečného spalování. Oba hořáky pracují automaticky. To znamená, při dosažení stanovené teploty jsou plynule regulovány.

Z pohledu ekonomické efektivity celého strojně technologického zařízení spalovny nebezpečných odpadů s využitím odpadního tepla a systémem čištění kouřových plynů se jedná se o zařízení, které energeticky využívá odpady a vznikající teplo je následně dále zpracováváno například v podobě horké vody nebo páry pro vytápění areálu Snaha, Brtnice a přilehlých budov v okolí. Z ekonomického hlediska se jednoznačně jeví jako velice důležité využívání odpadního tepla s ekonomicky efektivním prodejem tak, aby se zlepšily celkové ekonomické parametry provozu spalovny nebezpečných odpadů. Z tohoto pohledu se cena prodáváného tepla jeví jako druhý hlavní zdroj příjmů zařízení, přičemž primárním finančním zdrojem závodu jsou příjmy ze zneškodňování nebezpečných odpadů.

Bilance provozu zařízení vychází na jedné straně z ceny spalování odpadů a ceny odpadního tepla, které tvoří hlavní výnosy spalovny, na druhé straně z nákladů na provoz. Zde uvažujeme především náklad na sorbenty, spotřebu elektrické energie a zemní plyn a dále náklady na lidské zdroje. Celkové saldo příjmů a výdajů vychází výrazně v kladných číslech, což dává předpoklad návratnosti investice, kterou odhaduji přibližně na úrovni 4 let.

Na základě výstupů sledovaných parametrů doporučuji zejména z ekologického, ale i investičního hlediska přistoupit k realizaci navrhovaného řešení inovace stávajícího zařízení pro zneškodňování nebezpečných odpadů s následným čištěním spalin Snaha, Brtnice.

6 Závěr

Návrh inovace zařízení pro čištění spalin ve spalovně nebezpečného odpadu využívá suché adsorpční metody pro čištění kouřových plynů za použití suchých aditiv NaHCO_3 , Ca(OH)_2 a aktivního uhlí, které jsou ve velmi jemně mletém stavu nastříkovány do kouřových plynů. Za stanovených procesních podmínek jsou na tkanině rukávového filtru spolehlivě odlučovány veškeré znečišťující látky obsažené v kouřových plynech, které jsou navázány na povrch vstříkovaných sorbentů. Tento proces spolehlivě řeší problematiku čištění kouřových plynů právě za použití suchých sorbentů a v žádném případě zde není využívána voda jako médium pro technologické procesy, která se jeví jako problematická v souvislosti s celkovou ekologií procesu a následným čištěním odpadních vod.

Procesy spojené se suchou sorpcí prokazují vysokou účinnost a spolehlivost při provozních podmínkách spalování nebezpečných odpadů a při plnění zákonem stanovených emisních limitů.

Nově navrhované strojně technologické řešení dává spolehlivou záruku pro dobré provozní využití. Předpokládám, že dosahované výsledky koncentrací znečišťujících látek v kouřových plynech na výstupu z komína budou splněny s rezervou. Investiční náklady tohoto nového řešení dávají záruku plošného rozšíření navrhovaného zařízení do stávajících provozů spaloven nebezpečných odpadů s nevyhovujícím systémem mokrého čištění spalin.

Seznam požitých literatury

- ALL FOR POWER. *Hlavní technologická zařízení spalovny SAKO Brno* [Online]. 4. 1 2012. [cit. 2013-2-14]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/pazdera_sako.pdf.
- CENIA. *Integrovaný registr znečišťování*. [Online] 2002. Ministerstvo životního prostředí. [cit. 2015-3-14]. Dostupné z: <http://www.irz.cz/node/20>.
- ČHMÚ. Informace o spalovně. *Český hydrometeorologický ústav*. [Online] 2014. [cit. 2015-3-15]. Dostupné z: http://www.chmu.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/incinerators/612958121_CZ.html.
- ČSN 06 3003. *Průmyslové pece, termíny a definice*. Praha: Český normalizační institut, 1995.
- ČSN 06 3090. *Zařízení pro termické odstraňování/zneškodňování a energetické využívání odpadů*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- ENVICRACK. *Pyrolýzní zpracování odpadů*. [Online] 2008. [cit. 2013-3-19]. Dostupné z: http://www.strobo.cz/img/down_soubor1091.pdf.
- BRIGHAM Eugene, EHRHARD Michael. *Financial Management: Theory & Practice*. Cengage South-Western, 2010. ISBN 9781439078099.
- EUROPEAN COMMISSION. *Integrated Pollution Prevention and Control* [Online]. 2005. [cit. 2015-3-19]. Dostupné z: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf.
- EVROPSKÁ KOMISE. *Integrovaná prevence a omezování znečištění* [Online]. 2005 [cit. 2015-3-22]. Dostupné z: <https://circabc.europa.eu/sd/d/7bc3f9ba-4072-43c1-9c31-35737a9f36ff/Incineration%20CZ.DOC>.
- GRÜNWARD, Alexandr.. *Voda a ovzduší 20*. Praha: ČVUT, 1999. ISBN: 8001012417.
- HEMERKA, Jiří. *Omezování tuhých emisí*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1998.
- HEŘČÍK, Miloslav, FIEDOR, Jiří a MÜLLEROVÁ, Hana. *Legislativa a ochrana životního prostředí*. Ostrava: VŠB Ostrava, 2008. 9788024818375.
- HŘEBÍČEK, Jiří a kolektiv. 2009. *Integrovaný systém nakládání s odpady*. Brno: Littera, 2009. 978-80-85763-54-6.
- HYŽÍK, Jaroslav. *Energetická účinnost spaloven a rámcová směrnice o odpadech* [Online]. 2008. [cit. 2015-2-6]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz>.
- IBLER, Zbyněk, KARTÁK, Jan a MERTLOVÁ, Jiřina. *Technický průvodce Energetika 1.díl. BEN - technická literatura*, 2002. ISBN 8073000261.

- JAWOREK, Anatol, KRUPA, Andrzej a CZECH, Tadeusz. *Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review*. Journal of Electrostatics. 2007. ISSN 0304-3886.
- JEDLIČKA, F., a další. *Combined flue gas cleaning from persistent organic compounds and nitrogen oxides in the multifunction filter*. Chemical Engineering Transactions. 29. 8 2012, Sv. roč. 29, č. 2. ISSN 1063-1068.
- KAŠPAR, Matěj. Diplomová práce: *Zplyňování biomasy a odpadů s kogenerací pomocí mikrotubíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- KIZLINK, Juraj. *Nakládání s odpady*. Brno: Fakulta chemická VUT v Brně, 2012. 978-80-214-4413-3.
- KOPPEJAN, Jaap a LOO, Sjaak van. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Routledge, 2007. ISBN:1844072495.
- KROPÁČ, Jiří. 2012. *Statistika: náhodné jevy, náhodné veličiny, základy matematické statistiky, indexní analýza, regresní analýza, časové řady*. Brno: Vysoké učení technické, 2012. ISBN 9788072047888.
- KROPÁČ, Jiří, FRÝBA, Lukáš a VEJVODA, Stanislav. *Projekty v oblasti energetiky a strojírenství*. Ostrava: Moravskoslezský energetický klastr, 2013. ISBN 978-80-905392-6-6.
- KURAŠ , Mečislav. *Odpadové hospodářství*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o., Chrudim, 2008. ISBN 978-80-86832-34-0.
- KURAŠ , Mečislav. *Odpady a jejich zpracování*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r. o., 2014. ISBN: 978-80-86832-80-7.
- KURAŠ , Mečislav. *Technologie zpracování odpadů*. Praha: VŠCHT Praha, 1993. 80-7080-195-6.
- MALAŤÁK, Jan a VACULÍK, Petr. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- MALAŤÁK, Jan. *Termické zpracování odpadů, spalovny* [Online]. 2006. [Cit. 2013-2-8] Dostupné z: <http://odpady.tf.czu.cz/p/Spalov.pdf>.
- OBROUČKA, Karel. *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2001. ISBN 9788024800097.
- ODPADOVÉ FORUM. *Odpad je nevyčerpatelný zdroj energie*. Praha: Redakce časopisu Odpadové fórum, 2010. ISBN 978-80-85990-15-7.
- Předpis č. 415/2012 Sb., *Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. Česko. 2012.

SLIVKA, Vladimír, DIRNER, Vojtech a KURAŠ, Mečislav. Odpadové hospodářství I - praktická příručka. Praha: MŽP ČR, 2006. ISBN 80-248-1245-2.

SNAHA, kožedělné družstvo Jihlava. *Seznam odpadů* [Online]. [cit. 2015-3-15] Dostupné z: <http://www.snahajihlava.cz/seznam-odpadu.html>.

STEHLÍK, Petr. 2007. *Heat transfer as an important subject in waste-to-energy systems*. Applied Thermal Engineering. 7-2007, sv. roč. 27, č. 10.

STROJÍRNÝ Bohdalice. www.strobo.cz. [Online]. [cit. 2015-3-19] Dostupné z: http://www.strobo.cz/img/down_soubor1091.pdf.

ŠALDOVÁ, Lenka. 2012. *Databáze spaloven odpadů v Evropě*. Brno: VÚT v Brně, Fakulta stavební, 2012.

ŠRÁMEK, Václav a SOUKUPOVÁ, Zuzana. *Energetické využití komunálních odpadů* [Online]. 2008. [Cit. 2013-2-21] Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/spalovani_skladacka_8129.pdf.

VÁGNEROVÁ, Milena. *Znečišťující látky v ovzduší* [Online]. Okresní hospodářská komora Most. 2011. [cit. 2015-3-14] Dostupné z: <http://www.ohk-most.cz/Files/OHK/Most/VUHU-Nezkracenaverze.pdf>.

VODNÍ A TEPELNÉ ELEKTRÁRNÝ. *Vedlejší energetické produkty* [Online]. 2009. [cit. 2013-3-17] Dostupné z: <http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/vedlejsi-energeticke-produkty.htm>.

VOŠTOVÁ, Věra a FRIES, Jiří. 2003. *Zpracování pevných odpadů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2003. ISBN 80-01-02672-8.

Zákon č. 185/2001 Sb., *o odpadech*. Česko. 2001.

Zákon č. 201/2012 Sb. *o ochraně ovzduší*. Česko. 2012.

ZVVZ - Enven Engineering, a.s. *Popis funkce látkového filtru* [Online]. [cit. 2015-3-9] Dostupné z: <http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/produkty/latkove-filtry/popis-funkce.html>

Seznamy

Seznam obrázků

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1: Diagram spalitelnosti odpadů | 6 |
| Obrázek 2: Strukturní vzorec molekuly 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-p-dioxin a 2,3,7,8-tetrachlordibenzofuran..... | 17 |
| Obrázek 3: Schéma látkového filtru s pulzní regenerací | 19 |
| Obrázek 4: Různá provedení elektrostatických odlučovačů | 20 |
| Obrázek 5: Kondenzační elektrostatický odlučovač..... | 21 |
| Obrázek 6: Závislost vniku NO_x na teplotě | 24 |
| Obrázek 7: Graf redukce NO_x , tvorbou NO_x v závislosti na teplotě..... | 25 |
| Obrázek 8: Membrána katalytické filtrace | 27 |
| Obrázek 9: Schéma provozního cyklu spalovny..... | 30 |
| Obrázek 10: Foto spalovacího zařízení | 31 |
| Obrázek 11: Posloupnost strojně-technologických zařízení současného stavu spalovny | 32 |
| Obrázek 12: Foto křížové kolony | 33 |
| Obrázek 13: Schéma mokré pračky | 34 |
| Obrázek 14: Měřicí přístroj Bravo, TECORA..... | 35 |
| Obrázek 15: Schéma spořádání hořáků a toku spalin v termoreaktoru..... | 45 |
| Obrázek 16: Schéma návrhu technologického řešení čištění spalin | 47 |
| Obrázek 17: Trubní reaktor měnící směr $3 \times 180^\circ$ | 48 |
| Obrázek 18: Posloupnost strojně-technologických souborů navrhovaného řešení spalovny | 52 |

Seznam tabulek

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1: Emisní limity pro obsah znečišťujících látek ve spalinách ze spaloven odpadů | 4 |
| Tabulka 2: Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně jednorázovým měřením | 4 |
| Tabulka 3: Typické reakční podmínky a produkty termických procesů..... | 13 |
| Tabulka 4: Nebezpečné vlastnosti škodlivých složek ve spalinách | 15 |
| Tabulka 5: mezinárodní ekvivalenty toxicity I-TEF..... | 36 |
| Tabulka 6: Použitá měřicí zařízení | 36 |
| Tabulka č. 7: Charakteristika kouřových plynů měření 1 – 3..... | 38 |
| Tabulka č. 8: Naměřené hodnoty emisí HCl | 39 |
| Tabulka č. 9: Naměřené hodnoty emisí HF | 39 |
| Tabulka č. 10: Naměřené hodnoty emisí SO_2 | 39 |
| Tabulka č. 11: Naměřené hodnoty emisí NO_x | 39 |
| Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty emisí CO..... | 40 |
| Tabulka č. 13: Naměřené hodnoty emisí TZL | 40 |
| Tabulka č. 14: Naměřené hodnoty emisí TOC | 40 |
| Tabulka č. 15: Charakteristika kouřových plynů měření 4 | 40 |
| Tabulka č. 16: Naměřené hodnoty emisí těžkých kovů I. – III. kategorie..... | 41 |
| Tabulka č. 17: Naměřené hodnoty emisí PCCD/F | 41 |
| Tabulka č. 18: Porovnání emisních limitů a hodnot měření | 42 |
| Tabulka 19: Rozpočet realizace inovace čištění spalin | 53 |
| Tabulka 20: Provozní výnosy | 54 |
| Tabulka 21: Náklady na sorbenty | 55 |
| Tabulka 22: Náklady na energii..... | 55 |

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 23: Mzdové náklady | 55 |
| Tabulka 24: Ostatní provozní náklady | 56 |
| Tabulka 25: Náklady na servis a údržbu | 56 |
| Tabulka 26: Náklady na zpracování produktů spalování | 56 |
| Tabulka 27: Odpisy | 56 |

Seznam příloh

Příloha 1: Seznam zneškodňovaných odpadů ve Spalovně nebezpečných odpadů Brtnice

Příloha 2: Výpočet ukazatelů ekonomické analýzy

Přílohy

Příloha 1: Seznam zneškodňovaných odpadů ve Spalovně nebezpečných odpadů Brtnice (Snaha, kožedělné družstvo Jihlava)

| 02 / Odpady zemědělské, zahradnické, lesní, rybářské a ze zpracování potravin | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 02 01 02 | Odpad živočišných tkání |
| 02 01 03 | Odpad rostlinných pletiv |
| 02 01 04 | Odpadní plasty (kromě obalů) |
| 02 01 07 | Odpady z lesnictví |
| 02 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 02 02 02 | Odpad živočišných tkání |
| 02 02 03 | Suroviny nevhodné ke spotřebě nebo zpracování |
| 02 03 04 | Suroviny nevhodné ke spotřebě nebo zpracování |
| 02 03 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 02 05 01 | Suroviny nevhodné ke spotřebě nebo zpracování |
| 02 05 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 02 06 01 | Suroviny nevhodné ke spotřebě nebo zpracování |
| 02 06 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 02 07 03 | Odpady z chemického zpracování |
| 02 07 04 | Suroviny nevhodné ke spotřebě nebo zpracování |
| 02 07 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 03 / Odpady ze zpracování dřeva, výroby desek a nábytku | |
| 03 01 01 | Odpadní kůra a korek |
| 03 01 04* | Piliny, hobliny, odřezky, dřevo, dřevotřískové desky a dýhy obsahující nebezpečné látky |
| 03 01 05 | Piliny, hobliny, odřezky, dřevo, dřevotřískové desky a dýhy, neuvedené pod číslem 03 01 04 |
| 03 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 03 03 01 | Odpadní kůra a dřevo |
| 03 03 07 | Mechanicky oddělený výmět z rozvlákňování odpadního papíru a lepenky |
| 03 03 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 04 / Odpady z kožedělného a textilního průmyslu | |
| 04 01 01 | Odpadní kličovka a štípenka |
| 04 01 02 | Odpad z loužení |
| 04 01 03* | Odpady z odmašťování obsahující rozpouštědla bez kapalné fáze |
| 04 01 08 | Odpady usní (postružiny, odřezky, prach z broušení) obsahující chrom |
| 04 01 09 | Odpady z úpravy a apretace |
| 04 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 04 02 09 | Odpady z kompozitních tkanin (impregnované tkaniny, elastomer, plastomer) |
| 04 02 10 | Organické hmoty z přírodních produktů (např. tuk, vosk) |
| 04 02 14* | Odpady z apretace obsahující organická rozpouštědla |

| 03 / Odpady ze zpracování dřeva, výroby desek a nábytku | |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 04 02 15 | Jiné odpady z apretace neuvedené pod číslem 04 02 14 |
| 04 02 16* | Barviva a pigmenty obsahující nebezpečné látky |
| 04 02 17 | Jiná barviva a pigmenty neuvedené pod číslem 04 02 16 |
| 04 02 19* | Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky |
| 04 02 20 | Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 04 02 19 |
| 04 02 21 | Odpady z nezpracovaných textilních vláken |
| 04 02 22 | Odpady ze zpracovaných textilních vláken |
| 04 02 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 05 / Odpady ze zpracování ropy (asfalty, tuhé dehty) | |
| 05 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 05 06 03* | Jiné dehty |
| 05 06 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 07 / Odpady z organické a chemické výroby | |
| 07 02 13 | Plastový odpad |
| 07 02 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 07 03 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 07 04 13* | Pevné odpady obsahující nebezpečné látky |
| 07 04 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 08 / Odpady nátěrových hmot, lepidel a těsnění | |
| 08 01 11* | Odpadní barvy a laky obsahující organická rozpouštědla nebo jiné nebezpečné látky |
| 08 01 12 | Jiné odpadní barvy a laky neuvedené pod číslem 08 01 11 |
| 08 01 17* | Odpady z odstraňování barev nebo laků obsahujících organická rozpouštědla nebo jiné nebezpečné látky |
| 08 01 18 | Jiné odpady z odstraňování barev nebo laků neuvedené pod číslem 08 01 17 |
| 08 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 08 03 12* | Odpadní tiskařské barvy obsahující nebezpečné látky |
| 08 03 13 | Odpadní tiskařské barvy neuvedené pod číslem 08 03 12 |
| 08 03 18 | Odpadní tiskařský toner neuvedený pod číslem 08 03 17 |
| 08 03 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 08 04 09* | Odpadní lepidla a těsnicí materiály obsahující organická rozpouštědla nebo jiné nebezpečné látky |
| 08 04 10 | Jiná odpadní lepidla a těsnicí materiály neuvedené pod číslem 08 04 09 |
| 08 04 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 09 / Odpady fotografického průmyslu | |
| 09 01 07 | Fotografický film a papír obsahující stříbro nebo sloučeniny stříbra |
| 09 01 08 | Fotografický film a papír neobsahující stříbro nebo sloučeniny stříbra |
| 09 01 10 | Fotoaparáty na jedno použití bez baterií |
| 09 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |

| 12 / Odpady z tváření a obrábění kovů a plastů | |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 01 05 | Plastové hobliny a třísky |
| 12 01 12* | Upotřebené vosky a tuky |
| 12 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 13 / Odpady z olejů | |
| 13 05 01* | Pevný podíl z lapáků písku a odlučovačů oleje |
| 13 05 03* | Kaly z lapáků nečistot |
| 15 / Odpadní obaly, sorbenty a filtrační materiály | |
| 15 01 01 | Papírové a lepenkové obaly |
| 15 01 02 | Plastové obaly |
| 15 01 03 | Dřevěné obaly |
| 15 01 04 | Kovové obaly |
| 15 01 05 | Kompozitní obaly |
| 15 01 06 | Směsné obaly |
| 15 01 09 | Textilní obaly |
| 15 01 10* | Obaly obsahující zbytky nebezpečných látek nebo obaly těmito látkami znečištěné |
| 15 02 02* | Absorpční činidla, filtrační materiály (včetně olejových filtrů jinak blíže neurčených), čisticí tkaniny a ochranné oděvy znečištěné nebezpečnými látkami |
| 15 02 03 | Absorpční činidla, filtrační materiály, čisticí tkaniny a ochranné oděvy neuvedené pod číslem 15 02 02 |
| 16 / Odpad jinde neuvedený (mimo vyřazených vozidel) | |
| 16 01 03 | Pneumatiky |
| 16 01 07* | Olejoyé filtry |
| 16 01 19 | Plasty |
| 16 01 21* | Nebezpečné součástky neuvedené pod čísly 16 01 07 až 16 01 11 a 16 01 13 a 16 01 14 |
| 16 01 99 | Odpady jinak blíže neurčené |
| 17 / Odpad stavební a demoliční (pouze hořlavé) | |
| 17 02 01 | Dřevo |
| 17 02 03 | Plasty |
| 17 03 01* | Asfaltové směsi obsahující dehet |
| 17 03 02 | Asfaltové směsi neuvedené pod číslem 17 03 01 |
| 17 04 10* | Kabely obsahující ropné látky, uhelný dehet a jiné nebezpečné látky |
| 17 04 11 | Kabely neuvedené pod 17 04 10 |
| 17 06 03* | Jiné izolační materiály, které jsou nebo obsahují nebezpečné látky |
| 17 06 04 | Izolační materiály neuvedené pod čísly 17 06 01 a 17 06 03 |
| 18 / Odpad z humánní a veterinární léčebné péče | |
| 18 01 01 | Ostré předměty (kromě čísla 18 01 03) |
| 18 01 03* | Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce |

| 12 / Odpady z tváření a obrábění kovů a plastů | |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 18 01 04 | Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce (např. obvazy, sádrové obvazy, prádlo, oděvy na jedno použití, pleny) |
| 18 01 09 | Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod číslem 18 01 08 |
| 18 02 01 | Ostré předměty (kromě čísla 18 02 02) |
| 18 02 02* | Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce |
| 18 02 03 | Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce |
| 18 02 08 | Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod číslem 18 01 07 |
| 19 / Odpad ze zařízení na úpravu a zneškodňování odpadů | |
| 19 08 01 | Shrabky z česlí |
| 19 09 01 | Pevné odpady z primárního čištění (z česlí a filtrů) |
| 19 12 06* | Dřevo obsahující nebezpečné látky |
| 19 12 11* | Jiné odpady (včetně směsí materiálů) z mechanické úpravy odpadu obsahujícího nebezpečné látky |
| 20 / Odpad komunální ze živností, úřadů a průmyslu | |
| 20 01 01 | Papír a lepenka |
| 20 01 08 | Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven |
| 20 01 10 | Oděvy |
| 20 01 11 | Textilní materiály |
| 20 01 27* | Barvy, tiskařské barvy, lepidla a pryskyřice obsahující nebezpečné látky |
| 20 01 28 | Barvy, tiskařské barvy, lepidla a pryskyřice neuvedené pod číslem 20 01 27 |
| 20 01 32 | Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod číslem 20 01 31 |
| 20 01 37* | Dřevo obsahující nebezpečné látky |
| 20 01 39 | Plasty |
| 20 03 01 | Směsný komunální odpad |
| 20 03 02 | Odpad z tržišť |
| 20 03 99 | Komunální odpady jinak blíže neurčené |

* Nebezpečný odpad

Příloha 2: Výpočet ukazatelů ekonomické analýzy

Diskontní sazba: 3 %

| Rok | Cash-flow | Diskontované CF | Kumulativní DCF |
|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 0 | -10 720 000 | -10 720 000 | -10 720 000 |
| 1 | 2 665 837 | 2 588 192 | -8 131 808 |
| 2 | 2 665 837 | 2 512 807 | -5 619 001 |
| 3 | 2 665 837 | 2 439 619 | -3 179 382 |
| 4 | 2 665 837 | 2 368 562 | -810 820 |
| 5 | 2 665 837 | 2 299 575 | 1 488 755 |
| 6 | 2 665 837 | 2 232 597 | 3 721 352 |
| 7 | 2 665 837 | 2 167 570 | 5 888 922 |
| 8 | 2 665 837 | 2 104 437 | 7 993 358 |
| 9 | 2 665 837 | 2 043 142 | 10 036 501 |
| 10 | 2 665 837 | 1 983 633 | 12 020 134 |
| 11 | 2 665 837 | 1 925 858 | 13 945 992 |
| 12 | 2 665 837 | 1 869 765 | 15 815 757 |
| 13 | 2 665 837 | 1 815 306 | 17 631 062 |
| 14 | 2 665 837 | 1 762 433 | 19 393 495 |
| 15 | 2 665 837 | 1 711 100 | 21 104 594 |
| Součet | 29 267 562 | 21 104 594 | |

$$\check{C}SH = \frac{-10720000}{(1 + 0,03)^0} + \frac{2588192}{(1 + 0,03)^1} + \dots + \frac{1711100}{(1 + 0,03)^{15}}$$

$$\check{C}SH = 21\,104\,594 \text{ Kč}$$

$$0 = \frac{-10720000}{(1 + VVP)^0} + \frac{2588192}{(1 + VVP)^1} + \dots + \frac{1711100}{(1 + VVP)^{15}}$$

$$VVP = 20,3\%$$

$$DN = 4 + \frac{|-810820|}{2299575}$$

$$DN = 4,35 \text{ let}$$