



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**MODERNÍ TECHNOLOGIE ČIŠTĚNÍ SPALIN PRO
ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ZDRAVOTNICKÝCH
ODPADŮ**

UP-TO-DATE OFF GAS CLEANING SYSTEM FOR MEDICAL WASTE-TO-ENERGY UNITS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dan Kotas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Krejčí

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Dan Kotas**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Krejčí**
Akademický rok: 2018/19

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

Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Doba, kdy první spalovací zařízení vypouštěly exhalace vznikající při spalování odpadu prostřednictvím komínu neřízeně do atmosféry bez jakéhokoliv opatření snižujícího dopad na životní prostředí, je již dávno nenávratně pryč. Zařízení pro spalování odpadu zažila markantní progres jak při využití energie uvolněné ze spalování, tak především v oblasti technologií čištění spalin. Navzdory skutečnosti, že systém čištění odpadních plynů nepřináší investorům a provozovatelům ekonomický profit, neboť takový systém obvykle pouze zajišťuje splnění legislativou stanovených koncentrací škodlivin vypouštěných do atmosféry, je třeba konstatovat, že představuje podstatnou část investice. Lze jej tedy považovat za jednu ze zcela neoddelitelných částí celé technologie o primární důležitosti. Pro zařízení k energetickému využití zdravotnických odpadů bude navržena moderní koncepce systému čištění spalin s respektováním navrhované legislativy při využití metod dle BREF/BAT. Vytvořená metodika bude obsahovat mj. analýzy energetické náročnosti, provozních a investičních nákladů systému čištění spalin. Pro navrhovaná řešení bude provedena technicko-ekonomická analýza vhodnosti zařazení dané technologie.

Cíle diplomové práce:

S respektováním požadavků na kvalitu vypouštěných emisí dle BREF/BAT a s ohledem na zpracovatelský výkon jednotky k energetickému využití zdravotnických odpadů je nutné navrhnout moderní systém čištění spalin, který zajistí splnění navrhovaných emisních limitů.

Vytvoření alternativních řešení moderního systému čištění spalin a diskutovat jejich řešení.

Provést zhodnocení variantního řešení jak z pohledu technologických požadavků na aparátové složení tak s ohledem na investičních a provozní náklady (CAPEX/OPEX).

Seznam doporučené literatury:

STEHLÍK, P. Up-to-Date Waste-to-Energy Approach, From Idea to Industrial Application. 1. 1. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2016. 115 s. ISBN: 978-3-319-15466- 4.

Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration: DRAFT 1 (May 2017). In: . European IPPC Bureau, 2017. Dostupné také z:

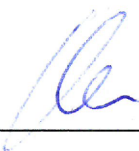
http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_5_24-05-2017_web.pdf

SANTOLERI, Joseph J., Louis THEODORE a Joseph REYNOLDS. Introduction to Hazardous Waste Incineration. Second edition. New York: John Wiley & Sons. 2000. ISBN 0-471-011790-6.

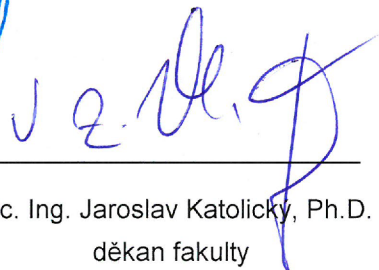
LOMBARDI, Lidia, Ennio CARNEVALE a Andrea CORTI. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. Waste Management. 2015. 37, 26-44. ISSN 0956053x.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 23. 10. 2018



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



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

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce pojednává o současné situaci nakládání se zdravotnickým odpadem na území České republiky a analyzuje stávající technologický stav zařízení pro jeho termickou likvidaci. Navazuje popis dostupných technologií čištění spalin, jež vznikají při termické likvidaci zdravotnického odpadu. Pozornost je věnována také souhrnu legislativních předpisů platných na území České republiky a z nich vyplývajících emisních limitů pro spalování odpadů, neboť právě ty tvoří zadání pro návrh systému čištění spalin.

V hlavní části práce byly navrženy dvě technologické koncepce řešení systému čištění spalin moderního zařízení pro energetické využití zdravotnického odpadu se zpracovatelskou kapacitou 1400 t/rok umístěného v krajské nemocnici modelového regionu. Na základě vstupních parametrů byla vytvořena vhodná aparátová skladba obou variantních řešení, která byla následně bilancována jak z pohledu materiálového, tak z pohledu energetického. Na základě bilancí byly navrženy hlavní aparáty obou variantních řešení, pro které byla stanovena investiční cena. V závěru práce je vybrána vhodná varianta na základě ekonomického zhodnocení, porovnáním provozních (CAPEX) a investičních nákladů (OPEX).

Klíčová slova

Zdravotnický odpad, nakládání s odpady, systém čištění spalin, DeNOx filtrace, SCR, 4D filtrace

Abstract

This master's thesis deals with current situation of medical waste management in the Czech Republic and it also analyzes the quality of existing units for thermal treatment of the medical waste. In the second part of the thesis, available off-gas cleaning methods were described as well as the emission limits for waste incineration, which correspond to the legislative regulations effective in the Czech Republic. These emission limits are considered as input data for off-gas cleaning system design.

In the main part of this thesis, two technological solutions of off-gas cleaning methods for Up-to-Date medical waste incineration unit were designed. The unit is designed for energy utilization of 1400 tons of medical waste accumulated during one year in a regional hospital of model region. From given input parameters, two appropriate apparatus concepts were created. After that, both concepts were evaluated either from energetic point of view as well as from material one. From these evaluations, key apparatuses of both concepts were designed which provided necessary design dimensions for further investment price estimation of each individual key apparatus. In the conclusion of this thesis, the best solution of an off-gas cleaning method was picked according to the comparison of operating and investment costs.

Keywords

Health-care waste, Waste management, off-gas cleaning system, DeNOx filtration, SCR, 4D filtration

Bibliografická citace

KOTAS, Dan. *Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 2019. Diplomová práce. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Krejčí. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116737>.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Krejčího. Použité zdroje jsou uvedeny na konci diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....
Bc. Dan Kotas

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Tomáši Krejčímu za vstřícnost, ochotu, obětovaný čas a velké množství cenných rad v průběhu vedení diplomové práce. Dále bych rád poděkoval zaměstnancům společnosti EVECO Brno s.r.o. za cenné rady a zkušenosti předané během dosavadní spolupráce.

V neposlední řadě bych velice rád poděkoval celé rodině a blízkým za podporu a pomoc po celou dobu studia.

Obsah

1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY	11
1.1	Složení nebezpečného zdravotnického odpadu.....	12
1.2	Klasifikace zdravotnického odpadu dle legislativy ČR	13
1.3	Produkce zdravotnického odpadu v ČR.....	15
2	ZPŮSOBY NAKLÁDÁNÍ SE ZDRAVOTNICKÝMI ODPADY	16
2.1	Technologie na úpravu zdravotnického odpadu	16
2.1.1	Nízkoteplotní tepelné procesy.....	17
2.1.2	Chemické, iradiační a biologické procesy	18
2.1.3	Mechanické procesy	18
2.2	Technologie pro likvidaci nebezpečného zdravotnického odpadu.....	19
2.2.1	Termická likvidace.....	19
2.2.2	Skládkování	20
3	METODY ČIŠTĚNÍ SPALIN	22
3.1	Snižování emisí tuhých látek a těžkých kovů.....	22
3.1.1	Elektrostatické odlučovače	22
3.1.2	Tkaninové filtry	23
3.1.3	Adsorpce na povrchu aktivního uhlí.....	24
3.2	Snižování obsahu kyselých složek	25
3.2.1	Mokrý čišťení	25
3.2.2	Suchý čišťení	27
3.3	Snižování emisí oxidů dusíku.....	28
3.3.1	SCR – selektivní katalytická redukce	29
3.3.2	SNCR – selektivní nekatalytická redukce.....	30
3.4	Snižování obsahu dioxinů a furanů.....	31
3.4.1	Katalytické rukávcové filtry.....	32
3.4.2	4D filtrace.....	33
4	EMISNÍ LEGISLATIVA	34
4.1	Směrnice 2010/75/EU	34
4.2	Zákon č. 201/2012 Sb.	34
4.3	Vyhláška č. 415/2012 Sb.	35
4.4	Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách BREF	35

4.5	Souhrn stávajících a navrhovaných emisních limitů.....	35
5	ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH SPALOVEN ZDRAVOTNICKÉHO ODPADU V ČR.....	38
5.1	Technologie spaloven zdravotnického odpadu.....	40
5.2	Množství produkovaných emisí.....	41
6	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ MODERNÍ SPALOVNY ZDRAVOTNICKÉHO ODPADU.....	44
6.1	Popis zájmové oblasti	44
6.1.1	Produkce odpadu	44
6.1.2	Charakteristika spalovaného odpadu.....	45
6.2	Zpracovatelský výkon spalovny ZO	46
6.3	Termická část.....	47
6.4	Utilizace tepla	48
7	TECHNOLOGICKÝ NÁVRH SYSTÉMŮ ČIŠTĚNÍ SPALIN	49
7.1	Vstupní data a ovlivňující parametry návrhu.....	49
7.2	Koncepční řešení systému čištění spalin.....	50
8	MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE.....	54
8.1	Vstupní parametry pro bilancování procesu	54
8.2	Materiálové bilance navrhovaných variant	56
8.2.1	Bilance navrhované varianty č.1	56
8.2.2	Bilance navrhované varianty č.2	58
8.3	Technologický návrh hlavních aparátů systému čištění spalin	59
8.3.1	Specifikace hlavních aparátů varianty č. 1	59
8.3.2	Specifikace hlavních aparátů varianty č. 2	64
8.3.3	Pomocné aparáty systému čištění spalin	65
8.4	Energetická náročnost procesu.....	67
8.4.1	Stanovení příkonu ventilátorů.....	67
8.4.2	Stanovení celkového příkonu.....	70
9	TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	72
9.1	Investiční náklady	72
9.2	Provozní náklady.....	74
10	ZÁVĚR	77

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	79
SEZNAM TABULEK	80
SEZNAM ZKRATEK	81
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83
SEZNAM PŘÍLOH	88

1 Úvod do problematiky

Produkce nejrůznějšího typu odpadu je dána mírou lidské činnosti a spojena s všeobecnými potřebami obyvatelstva. S rostoucí populací proto dochází také k navyšování množství produkovaného odpadu, jenž v mnoha státech vyvolává diskuze ohledně nakládání s ním. Jedním z mnoha diskutovaných témat je snižující se kapacita skládek. Tendencí proto je využívání dostupných alternativ nakládání s odpady, jako je jeho recyklace nebo materiálové, případně energetické využití. Zmíněná hierarchie nakládání s odpady je však preferována pro odpad, jenž nevykazuje nebezpečné vlastnosti jako je odpad komunální.

U odpadů, vykazující jednu či více nebezpečných vlastností je primárním požadavkem tyto vlastnosti eliminovat. Takovéto odpady vznikají především průmyslovou činností, avšak v rámci nebezpečných odpadů tvoří značné zastoupení také zdravotnický odpad, jehož rostoucí produkce je dána zvyšující se kvalitou a dostupností zdravotnické péče. V rozvinutých zemích je pak primárním faktorem navyšování produkce zdravotnického odpadu především rapidní stárnutí populace, která si vyžaduje čím dál více zdravotnické péče.

Dle [1] je přibližně 80 % veškerého zdravotnického odpadu tvořeno odpadem, který je svým charakterem velice podobný tomu komunálnímu a vzniká především v kancelářích, kuchyních, při úklidových pracích nebo při údržbě či opravě zdravotnického zařízení. Zbýlých 20 % bývá označováno jako nebezpečný zdravotnický odpad, který může obsahovat kontaminovaný odpad, ostré předměty (skalpely, jehly), tělesné tekutiny, chemikálie, farmaceutické, genotoxické nebo radioaktivní látky a těžké kovy. Díky svému složení představuje značné nebezpečí jak pro životní prostředí, tak pro lidskou populaci v případě, že s ním není správně nakládáno. Nebezpečný zdravotnický odpad často obsahuje široké spektrum nejrůznějších patogenních mikroorganismů, přenášených převážně tělními tekutinami, kterými jsou kontaminovány zdravotnické materiály. A právě kontakt s těmito materiály, se kterými bylo nevhodně nakládáno, může vést k šíření infekčních onemocnění. Při skládkování zdravotnického odpadu navíc hrozí kontaminace podzemních vod a půdy infekčním materiálem.

Částečné snižování množství zdravotnického odpadu je možné zajistit zvýšením kvality třídění v místě vzniku. Tímto postupem však nedochází k eliminaci nebezpečných vlastností odpadu, jenž způsobuje zvýšené nároky jak na přepravu, skladování tak samotnou likvidaci. Jak již bylo zmíněno, velká část zdravotnického odpadu vykazuje obdobné vlastnosti, jako odpad komunální, a navíc se vyznačuje vysokým obsahem plastu s vysokou výhřevností. Proto se jako vhodné řešení likvidace a snižování objemu odpadu jeví jeho termická likvidace, kterou je docíleno také požadovaného odstranění nebezpečných vlastností. Uvolněnou energii, vnikající při jeho termickém rozkladu, je možné dále využít a zajistit tak částečné snížení spotřeb fosilních paliv. Provoz a výstavba nových zařízení pro energetické využití odpadu se v České republice potýká s vlnou nevole a odmítavým postojem obyvatelstva, která je především způsobena nízkou informovaností veřejnosti a vysokou mírou desinformací ohledně termické likvidace odpadu a systému čištění spalin.

1.1 Složení nebezpečného zdravotnického odpadu

Odpad vznikající ve zdravotnických zařízeních je mnohdy velice heterogenní především svou strukturou a vlastnostmi. Proto je nutné jednotlivé složky odpadu rozčlenit a charakterizovat jejich fyzikální a chemické vlastnosti a potenciální míru nebezpečnosti. Zdravotnický odpad je dělen do několika podkategorií [2].

a) Infekční odpad

Takovýto typ zdravotnického odpadu je podezřelý z obsahu patogenů, jako jsou bakterie a plísňe v takovém množství, ve kterém jsou schopny způsobovat onemocnění hostitelů, které napadají. Do této skupiny odpadů patří například odpad vznikající při léčbě pacientů s infekčními chorobami (veškerý materiál, který přišel do styku s krví nebo tekutinami pacienta) nebo odpadní materiál vznikající při léčbě pacientů podstupujících hemodialýzu (dialyzační zařízení, jednorázové ručníky, pláště atd.).

b) Patologický odpad

Je především složen ze zbytků tkání, orgánů, částí těl, krve a tělních tekutin lidí a zvířat. Patologický odpad je podkategorií infekčního odpadu, i když může obsahovat i zdravé (neinfikované) části těl.

c) Ostré předměty

Jsou definovány jako předměty, které mohou způsobit bodné nebo řezné zranění. Do takové kategorie spadají jehly injekčních stříkaček, hypodermické jehly, skalpely, čepele, nože, infuze, pily atd. Ostré předměty jsou považovány za vysoce nebezpečné, ať už jsou infikovány či nikoliv.

d) Farmaceutický odpad

Farmaceutický odpad zahrnuje farmaceutické přípravky, léky vakcíny a séra, které jsou již po expiraci, kontaminovány, nepoužívány nebo rozlity a musí být řádným způsobem zlikvidovány. Do této kategorie bývají často zařazeny také vyřazené předměty používané při manipulaci s léčivými látkami jako láhve nebo krabice se zbytky léčiv, rukavice apod.

e) Genotoxický odpad

Genotoxickým odpadem se rozumí odpad, který může mít mutagenní, teratogenní nebo karcinogenní vlastnosti a tím pádem je považován za vysoce nebezpečný. Díky zmíněným vlastnostem představuje obrovské riziko a měla by mu být věnována vysoká pozornost především při jeho likvidaci. Do této kategorie spadají zvratky, moč nebo stolice pacientů léčených cytostatickými léky, chemickými látkami a radioaktivním materiálem. Cytostatickými léky se rozumí léky se schopností zabíjet nebo zastavit růst některých živých buněk a používají se především při léčbě rakoviny.

f) Chemický odpad

Chemický odpad se skládá převážně z vyřazených pevných, kapalných nebo plyných chemikálií, vznikajících při diagnostické a experimentální práci nebo při dezinfekci či běžném úklidu. Příkladem takovýchto chemikálií jsou formaldehyd, fotografické chemikálie, rozpouštědla, organické a neorganické chemikálie.

g) Odpad s vysokým obsahem těžkých kovů

Jedná se o podkategorii chemických odpadů, které bývají ve většině případů vysoce toxické. Tyto odpady, mezi které spadají například rozbitá klinická zařízení, stomatologické zbytky, vyřazené baterie a další, se vyznačují vysokým obsahem rtuť, olova, arsenu nebo kadmia.

h) Tlakové nádoby

Mnoho plynů používaných ve zdravotnictví je skladováno v tlakových nádobách nebo aerosolových plechovkách. Nespotebované množství inertních a potenciálně škodlivých plynů v nádobě může představovat riziko, a proto je nutné s nimi zacházet s vysokou opatrností.

i) Radioaktivní odpad

Zahrnuje především pevné, kapalné a plynné látky znečištěné radionuklidy. Vznikají při nejrozličnějších vyšetřeních a analýzách tělesné tkáně, virů, lokalizaci nádorů a dalších terapeutických a vyšetřovacích postupech.

1.2 Klasifikace zdravotnického odpadu dle legislativy ČR

I když je zdravotnický odpad rozdělen do několika skupin dle charakteru a vlastností, neexistuje pro něj v současné době jasně daná definice, a proto dochází k rozdílnému pohledu na způsob nakládání, resp. přípustné množství emisí a podobně. V České republice je nejvyšším právním dokumentem zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech. Dle paragrafu § 5 odstavce 1 je původce nebo oprávněná osoba povinna zařadit odpad do příslušné kategorie, uvedené v katalogu odpadů v příloze vyhlášky č. 93/2016 Sb. o Katalogu odpadů [3], [4].

Zdravotnický odpad lze zařadit do kategorie 18 „*Odpady ze zdravotnictví a veterinární péče a/nebo z výzkumu s nimi souvisejícího (s výjimkou kuchyňských odpadů a odpadu ze stravovacích zařízení, které se zdravotnictvím bezprostředně nesouvisí)*“, která je uvedena včetně jednotlivých podkategorií v tab. 1-1. Největší část zdravotnického odpadu je zařazena do podkategorie 18 01 „*Odpady z porodnické péče, z diagnostiky, z léčení nebo prevence nemocí lidí*“ v uvedené příloze vyhlášky.

18	Odpady ze zdravotnictví a veterinární péče a / nebo z výzkumu s nimi souvisejícího (s výjimkou kuchyňských odpadů a odpadu ze stravovacích zařízení, které se zdravotnictvím bezprostředně nesouvisí)
18 01	Odpady z porodnické péče, z diagnostiky, z léčení nebo prevence nemocí lidí
18 01 01	Ostré předměty (kromě čísla 18 01 03)
18 01 02	Části těla a orgány včetně krevních vaků a krevních konzerv (kromě čísla 18 01 03)
18 01 03*	Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce
18 01 04	Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce
18 01 06*	Chemikálie, které jsou nebo obsahují nebezpečné látky

18 01 07	Chemikálie neuvedené pod číslem 18 01 06
18 01 08*	Nepoužitelná cytostatika
18 01 09*	Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod číslem 18 01 08
18 01 10*	Odpadní amalgám ze stomatologické péče
18 02	Odpady z výzkumu, diagnostiky, léčení nebo prevence nemocí zvířat
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 05*	Chemikálie sestávající z nebezpečných látek nebo tyto látky obsahující
18 02 06	Jiné chemikálie neuvedené pod číslem 18 02 05
18 02 07*	Nepoužitelná cytostatika
18 02 08*	Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod číslem 18 02 07
* Nebezpečný odpad	

Tab. 1-1: Katalog odpadů – podskupina 18 [4]

Dle § 6 odstavce 1 zákona č 185/2001 Sb. je původce nebo pověřená osoba povinna charakterizovat odpad jako nebezpečný, pokud je uveden jako nebezpečný v Katalogu odpadů, vykazuje alespoň jednu z nebezpečných vlastností uvedených v příloze předpisu Nařízení komise (EU) č. 1357/2014 o nebezpečných vlastnostech odpadu (viz. tab. 1-2) nebo je smíchán či znečištěn některým z nebezpečných odpadů dle Katalogu odpadů [3], [5]. V daném katalogu jsou jako nebezpečné označovány odpady dle § 7 odstavce 1 symbolem „*“ [4].

Označení	Nebezpečná vlastnost	Označení	Nebezpečná vlastnost
HP 1	Výbušné	HP 9	Infekční
HP 2	Oxidující	HP 10	Toxické pro reprodukci
HP 3	Hořlavé	HP 11	Mutagenní
HP 4	Dráždivé – dráždivé pro kůži a pro oči	HP 12	Uvolňování akutně toxického plynu ¹
HP 5	Toxicita pro specifické cílové orgány/Toxicita při vdechnutí	HP 13	Senzibilizující
HP 6	Akutní toxicita	HP 14	Ekotoxický
HP 7	Karcinogenní	HP 15	Odpad schopný vykazovat při nakládání s ním některou z výše uvedených nebezpečných vlastností, kterou v době vzniku neměl
HP 8	Žíravé		

Tab. 1-2: Seznam nebezpečných vlastností odpadů [5]

1.3 Produkce zdravotnického odpadu v ČR

Dle údajů MŽP (ISOH) bylo v roce 2017 na území České republiky vyprodukováno přibližně 34,5 milionů tun odpadu (skupiny 1-20), přičemž přibližně 1,5 miliónu tun tvořil nebezpečný odpad [6]. Tab. 1-3 zobrazuje celkové vyprodukované množství odpadů na území České republiky v rozmezí let 2011-2017. Během zkoumaného období došlo k nárůstu celkového množství odpadu, avšak nejvyšší produkce byla zaznamenána v roce 2015. Takového navýšení produkovaného množství odpadu má na svědomí zvýšená produkce odpadu vznikající při stavební činnosti (kategorie 17 dle katalogu odpadů), která v roce 2015 dosáhla celkové hodnoty okolo 24 000 kt, což je přibližně o 4 000 kt více, než v roce 2014, 2016 i 2017 [6]

Rok	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Celkové množství vyprodukovaného odpadu na území ČR [kt]	30 672	30 023	30 621	32 028	37 338	34 242	34 513
Z toho nebezpečný odpad	1 841	1 637	1 443	1 566	1 504	1 444	1 508

Tab. 1-3: Celkové množství vyprodukovaného odpadu za období 2011-2017 [6]

V případě odpadu spadajícího do kategorie 18 dle výše zmíněného Katalogu odpadů, bylo vyprodukováno v roce 2017 celkem 42 417 tun, přičemž 34 514 tun tvořil nebezpečných zdravotnický odpad viz. tab. 1-4 [6]. Z dat uvedených v tab. 1-4 vyplývá, že v průběhu sledovaného období mezi lety 2011 a 2017 došlo k navýšení roční produkce zdravotnických odpadů o 18,3 % (6 559 tun), což s sebou neslo i navýšení produkce nebezpečného zdravotnického odpadu, jehož roční produkce vzrostla o 2 949 tun (navýšení o 9 %) [6].

Rok	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Celkové množství odpadu kategorie 18 [t]	35 858	36 597	36 739	37 459	39 143	41 010	42 417
Z toho nebezpečný odpad	31 565	32 244	31 681	31 583	32 248	33 624	34 514

Tab. 1-4: Množství odpadů ze zdravotnických zařízení za období 2011-2017 [6]

2 Způsoby nakládání se zdravotnickými odpady

Primární tendencí při produkci zdravotnického odpadu je jeho minimalizace. Té je možno dosáhnout především tříděním v místě vzniku. Dochází tak ke snížení kontaminace odpadu a následně je možná recyklace či využití odpadu jako materiálového zdroje. Třídění s sebou přináší i značnou finanční úsporu jak pro nemocnice, tak i pro další zdravotnická zařízení, jelikož cena likvidace nebezpečného zdravotnického odpadu několikanásobně převyšuje cenu likvidace odpadu komunálního. To je způsobeno především zvýšenými nároky na manipulaci, skladování a dopravu zdravotnického odpadu. Dále je cena likvidace odpadu ovlivněna použitou technologií termického zpracování a čištění spalin v zařízeních spalujících zdravotnický odpad. V neposlední řadě cenu ovlivňuje zpracovatelská kapacita daného zařízení, přičemž zařízení pro spalování zdravotnického odpadu bývají kapacitně menší, než spalovny odpadu komunálního.

Pro skladování odpadu ze zdravotnických zařízení je doporučováno umístit sklad odpadu v areálu zdravotnického zařízení, aby se minimalizovala možnost kontaktu s nebezpečným odpadem. Odpady je nutné skladovat ve speciálních kontejnerech či pytlích v odděleném prostoru nebo budově. Veškeré požadavky jak na sklad, tak na skladovací prostředky jsou uvedeny ve vyhlášce MŽP č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů [7]. Pokud je požadováno uskladnění zdravotnického odpadu po dobu delší než 72 hodin, je nutné uskladnit odpad při maximální teplotě +8 °C [8].

V případě převozu nebezpečného zdravotnického odpadu, je nutné využívat dopravního prostředku dle metodiky MŽP [9] certifikovaného dle předpisu ADR pro převoz takového typu odpadu. Dále je požadováno, aby byl snadno omyvatelný a čistitelný, příp. dezinfikovatelný. Musí docházet k bezpečné nakládce, převozu a vykládce odpadu, přičemž není žádoucí, aby v dopravním prostředku zůstávaly zbytky odpadů. Dále nesmí dopravní prostředek poskytovat vhodné podmínky pro přebývání jakýchkoliv škůdců, hlodavců apod. [9].

2.1 Technologie na úpravu zdravotnického odpadu

Jedním z možných řešení pro snížení rizikovosti zdravotnického odpadu je jeho úprava tzv. dekontaminace, při které dochází k částečnému nebo úplnému odstranění biologických činitelů nebo ke snížení hladiny mikrobiální kontaminace. Dekontaminace se provádí v zařízeních k tomu určených. Nejčastěji se využívá autoklávu, mikrovlnné dekontaminace, parní a horkovzdušné sterilizace apod.

V České republice není tato technologie úpravy zdravotnického odpadu příliš zastoupená a používá se velice zřídka (AVE Kralupy, SPL Jablonec) z důvodu vysoké pořizovací ceny dekontaminačních zařízení, vysoké náročnosti na obsluhu zařízení a dále nutnosti nakládání s produkovanými odpadními vodami. Úprava dekontaminací se provádí především z důvodu, aby mohl být zdravotnický odpad bezpečně přepravován do zařízení pro jeho konečnou likvidaci, kterou se rozumí termické zpracování či skládkování.

2.1.1 Nízkoteplotní tepelné procesy

Nízkoteplotními procesy se rozumí procesy, které pracují v rozmezí teplot od 9 °C do 177 °C [10]. Existují dva typy takovýchto procesů, které se dělí dle typu média využívaného pro samotnou desinfekci.

Prvním způsobem úprav je tzv. suchá desinfekce, při níž není v procesu zahrnuta žádná voda, ale desinfekce a sterilizace probíhá na principu ohřevu produkovaného infračerveným zářením při teplotě 180 °C [11].

Druhým, častěji aplikovaným typem, je mokrá desinfekce, využívající pro sterilizaci a dezinfekci zdravotnického odpadu sytou páru o teplotě 121 °C a tlaku 103,4 kPa [12] v autoklávech (viz. obr. 2-1 a obr. 2-2) či retortách. V autoklávech bývají například desinfikovány skalpely, materiály kontaminované krví a tělesnými tekutinami a odpad vznikající při operacích. Naopak se tímto způsobem nedoporučuje upravovat odpad s obsahem těkavých látek, rtuti a dalších nebezpečných chemických látek a také chemoterapeutický odpad.



Obr. 2-1: Autokláv s válcovou komorou společnosti BondTech [13]

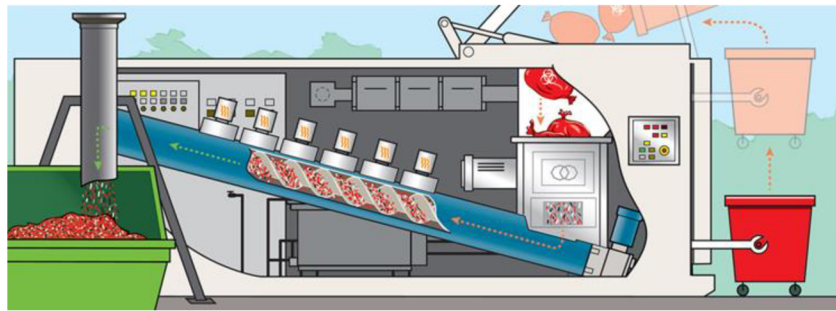


Obr. 2-2: Vysokokapacitní autokláv společnosti Tuttnauer [14]

Mezi výhody autoklávů se řadí především spolehlivost procesu a zároveň jejich nižší pořizovací cena v porovnání s jinými desinfekčními metodami. Využití autoklávu je globálně akceptováno jakožto vhodné řešení pro desinfekci zdravotnického odpadu. Naopak tato metoda neumožňuje redukci objemu vznikajícího odpadu a některé větší, tvrdé, kovové předměty mohou nenávratně poškodit zařízení.

Kromě autoklávů je mokrá desinfekce hojně využívána v mikrovlnných zařízeních, kdy je voda přímo přidána do materiálu a následným přiváděním mikrovlnné energie dochází ke generování páry, která ničí veškeré mikroorganismy [15]. Touto metodou bývá sterilizován zdravotnický odpad obsahující patogenní odpad. Obdobně jako v případě autoklávu není doporučována úprava odpadu s obsahem těkavých látek, rtuti a dalších nebezpečných chemických látek a také chemoterapeutického odpadu [15].

Výhodou mikrovlnných zařízení je jejich dlouhá životnost a nízké produkované a vypouštěné emise v případě, že jsou dodržovány provozní doporučení výrobce. V některých případech bývají tyto zařízení vybaveny drtícím mechanismem viz. obr. 2-3, čímž je redukován objem odpadu.



Obr. 2-3: Mikrovlnné zařízení Sanitech vybavené drtičem odpadu [16]

2.1.2 Chemické, iradiační a biologické procesy

Chemické procesy

Při chemické úpravě zdravotnického odpadu se využívají desinfekční činidla jako rozpuštěný oxid chloričitý, bělidlo (chlornan sodný), kyselina peroctová a jiné suché anorganické chemikálie [15]. Nové technologie využívají ozon jako chemické činidlo nebo alkálie při hydrolýze tkanin ve vyhřívaných nerezových nádobách. Pro zlepšení kontaktu mezi desinfekčním činidlem a samotným odpadem je často celý proces podpořen mechanickým mícháním a drcením.

Iradiační procesy

Využívají především ozařování proudem elektronů, kobaltem-60 nebo UV zářením [15]. V případě využití proudu elektronů je pro ničení mikroorganismů použit elektronový paprsek s vysokou energií, který způsobuje disociaci a praskání buněčných stěn. Účinnost této metody úzce souvisí s hustotou odpadu, jeho schopností pohlcovat elektrony a také s množstvím energie uložené v elektronech. Ozařováním nedochází k fyzické změně odpadu, a proto bývají iradiační procesy doplňovány procesy mechanickými jako je dezintegrace, drcení, míchání apod.

Biologické procesy

Biologické procesy využívají pro zničení organické hmoty enzymy. Pro zdravotnický odpad není v dnešní době tato metoda příliš využívaná vzhledem k jeho nebezpečným infekčním vlastnostem. [15].

2.1.3 Mechanické procesy

Jsou takzvanými doplňkovými procesy k procesům předešlým, jelikož při nich dochází pouze k fyzické úpravě zdravotnického odpadu, nikoli k samotné dekontaminaci. Řadí se mezi ně například dezintegrace, mletí, míchání třídění či drcení, jež přetvářejí přivedenou elektrickou energii na mechanickou. Mechanické procesy jsou často využívány u ostrých odpadů jako jsou jehly, stříkačky nebo skalpely, čímž se minimalizuje hrozba poranění a pořezání takovýmito předměty. Zamezují také proražení přepravních nádob a obalů ostrými předměty. V případě tepelných a chemických procesů zlepšují mechanické procesy výměnu tepla nebo kontakt mezi desinfekčním činidlem a odpadem.

2.2 Technologie pro likvidaci nebezpečného zdravotnického odpadu

Ať už byla provedena stabilizace zdravotnického odpadu či nikoli, je nutné odpad příslušným způsobem likvidovat. První řešenou technologií je spalování, které je aplikováno jak pro upravený zdravotnický odpad, který má charakter odpadu komunálního, tak pro nebezpečný zdravotnický odpad. Druhou metodou likvidace je skládkování, které je aplikováno pouze pro stabilizovaný zdravotnický odpad, aby nedocházelo ke kontaminaci ostatních odpadů uskladněných na skládce.

2.2.1 Termická likvidace

Spalování zdravotnického odpadu je způsob likvidace odpadu, při kterém dochází zároveň ke snižování jeho objemu. V případě, že zdravotnický odpad prošel dekontaminací jednou z výše uvedených metod, je možné tento odpad bezpečně likvidovat ve spalovnách komunálního odpadu za cenu podstatně nižší, než by byla cena bez dekontaminace. Pokud nedojde k úpravě zdravotnického odpadu, je jediným možným odstraněním spalování ve spalovnách zdravotnického a nebezpečného odpadu.

Odpad ze zdravotnických zařízení obvykle obsahuje materiál s vysokou výhřevností (plasty apod.), ale také residua s vysokým obsahem vody (tělních tekutin). Z tohoto důvodu je nutné zaručit požadovanou dobu spalování, aby došlo k dokonalému vyhoření paliva a byl získán spalovací zbytek požadované kvality [10].

Spalovny odpadů zahrnují několik operací. Nejprve je odpad dávkován do spalovací komory, kde dojde ke spálení odpadu a s tím související produkci horkých spalin a zbytků po spálení. Následně je teplo ve spalinách využito ke generování energie, ať už ve formě páry či horké vody. Pro zajištění splnění požadovaných emisních limitů jsou spaliny podrobeny čištění v systému čištění spalin.

Dle referenčního dokumentu BAT jsou pro spalování zdravotnického odpadu doporučovány 3 metody [10]:

1. Spalování v peci s pohyblivým nebo statickým roštem
2. Spalování v rotační peci
3. Pyrolýzní spalování

Spalování v peci s pohyblivým nebo statickým roštem

Tento typ pecí se hojně využívá pro spalování komunálního odpadu, přičemž přibližně 90 % [10] všech spalovacích zařízení v Evropě likvidujících komunální odpad využívá roštových pecí. Roštové pece je možné použít pro termickou likvidaci různých druhů odpadu včetně nebezpečných odpadů z průmyslu či zdravotnictví.

Pece jsou navrhovány tak, aby došlo k úplnému vyhoření těkavých složek spalin tím, že jsou vystaveny požadované spalovací teplotě po dobu nejméně 2 s při referenčním množství kyslíku minimálně O_2 6 % [10]. Typické teploty pro roštové pece se pohybují v rozmezí od 850

do 1100 °C [10], přičemž závisí jak na typu a složení odpadu, tak na obsahu Cl. Koncentrace oxidu uhelnatého (CO) ve spalinách je klíčovým ukazatelem kvality spalování.

Spalování v rotační peci

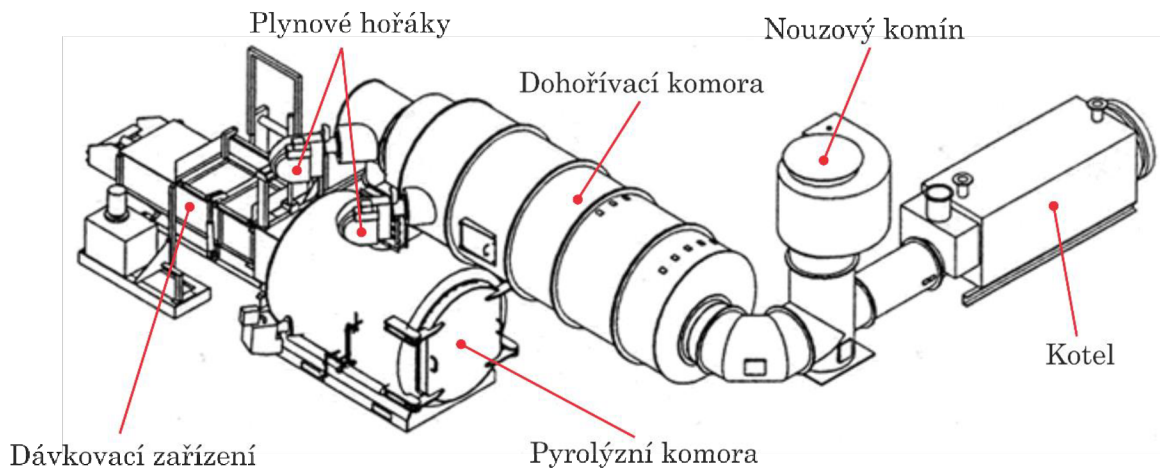
Rotační pece jsou velice robustní zařízení a mohou být využity pro spalování téměř jakéhokoliv odpadu bez ohledu na jeho typ a složení. Proto jsou vhodné pro spalování nebezpečných odpadů vykazujících značnou nehomogenitu složení.

Provozní teploty se pohybují v rozmezí od 900 do 1200 °C, v závislosti na typu spalovacího režimu (sypný, tavný). Pro spalování nebezpečných a zdravotnických odpadů s obsahem Cl pod 1 %_{hm} se obvykle pohybuje teplota v rozmezí od 850 do 1100 °C.

Pyrolýzní spalování

Pyrolýza je alternativním řešením tepelného zpracování ke klasickým oxidačním procesům, neboť se jedná o redukční proces bez přístupu kyslíku. Tato technologie spočívá v oddělení plynných, kapalných a pevných produktů v pyrolýzním reaktoru. Produktem pyrolýzy je pyrolýzní plyn, pyrolýzní olej a tuhý zbytek obsahující uhlík ale také minerální a kovové částice.

Pyrolýzní komora je ve většině zařízení pro termické zpracování zdravotnického odpadu doplněna o dohořivací komoru (termoreaktor), kde dochází k dopálení pyrolýzního plynu (uhlovodíkové směsi) a spalin.



Obr. 2-4: Sestava spalovacího zařízení Hoval - typ GG [17]

Obr. 2-4 zobrazuje spalovací zařízení Hoval (typ GG) společnosti Scheisttl [17], ve kterém dochází k pyrolýze v roštové peci, na níž přímo navazuje dohořivací komora, vybavená hořáky pro účinné dopálení pyrolýzního plynu.

2.2.2 Skládkování

Obecně je dle Směrnice Rady č. 1999/31/ES o skládkách odpadů skládkování infekčního a nebezpečného odpadu zakázáno [18]. Jediná výjimka nastává u vytríděného a jasně nekontaminovaného odpadu spadajícího do kategorie 18 01 04 - Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce dle Katalogu odpadů. Avšak v případě, že došlo k roztrídění, dekontaminaci a destrukci nebezpečných

vlastností zdravotnického odpadu, je možno takovýto odpad skládkovat podle kritérií uvedených ve vyhlášce MŽP č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů [9], [19].

Infekční odpad ze zdravotnických zařízení bývá zařazován do kategorie 18 01 03* dle katalogu odpadů. V případě, že dojde k jeho bezprostřední dekontaminaci dle metod uvedených v kapitole 2.1, je odpad zařazen do kategorie 18 01 04 a lze jej skládkovat [9].

Dle § 8 vyhlášky 294/2005 Sb. je možné skládkovat popílek vzniklý při spalování nebezpečných odpadů v zařízeních k tomu určených pouze v případě, že byla provedena jejich stabilizace postupem uvedeným v příloze č. 6 dané vyhlášky [19]. V § 9 je popsáno, že nebezpečný odpad je možné skládkovat na skládkách s označením S-ostatní odpad až po jeho stabilizaci stejnými postupy, jaké jsou vyžadovány pro residua ze spaloven nebezpečného opadu.

3 Metody čištění spalin

Při návrhu komplexního systému čištění spalin pro zařízení k energetickému využití zdravotnického odpadu, který kombinuje jednotlivé operace čištění, je vhodné se řídit nejlepšími dostupnými technikami dle referenčního dokumentu BREF. Tento dokument specifikuje metody čištění spalin pro zařízení k energetickému využití nebezpečných odpadů, do kterých lze zařadit i spalovny zdravotnického odpadu.

Systém čištění spalin je zpravidla rozdělen na dílčí technologické operace dle toho, jaká znečišťující látka je ve spalinách odstraňována. Obecně lze technologie rozdělit do 4 základních bloků:

- Snižování emisí tuhých látek (TZL) a těžkých kovů
- Snižování obsahu kyselých složek (HCl, HF, SO_x)
- Snižování obsahu dioxinů a furanů (PCDD/F)
- Snižování emisí oxidů dusíku (NO_x)

3.1 Snižování emisí tuhých látek a těžkých kovů

Při spalování odpadů dochází ke vzniku (úletu) tuhých znečišťujících látek, které jsou často označovány jako poléťavý prach nebo PM (particulate matter). Vzhledem ke své velikosti a vysokému měrnému povrchu, na kterém může docházet k adsorpci těžkých kovů, mohou tyto částice představovat značná zdravotní rizika spojená s ulpíváním TZL v dýchacích cestách.

Z tohoto důvodu je důležité snížení koncentrace TZL v proudu spalin na požadovanou hodnotu udávanou legislativou. Pro tento účel jsou v technologii čištění spalin zařazeny filtrační aparáty jako jsou tkaninové filtry a elektrostatické odlučovače.

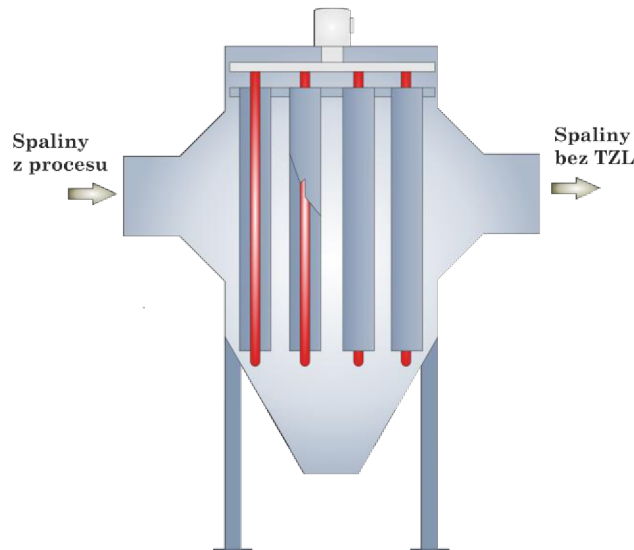
Pro zvýšení zachytu těžkých kovů je do proudu spalin dávkován sorbent (aktivní uhlí + přírodní zeolit), jenž je schopen díky svému velkému měrnému povrchu adsorbovat tuhé znečišťující látky. Vzniklá směs adsorbentu a těžkých kovů je z proudu spalin odloučena za pomoci filtrů nebo elektrostatických odlučovačů.

3.1.1 Elektrostatické odlučovače

Elektrostatické odlučovače využívají pro zachyt TZL měrný elektrický odpor, který závisí na reálném složení spalin. Účinnost této technologie je závislá na velikosti částic TZL, čím větší částice, tím větší odpor. Pro částice o velikosti větší než 1 μm se odpor pohybuje v rozmezí od 10⁴ do 10¹¹ Ω.cm [20]. V případě zvyšujícího se odporu 10¹² - 10¹³ Ω.cm dochází ke snížení účinnosti zachytu TZL [20].

Elektrostatický odlučovač je schematicky znázorněn na obr. 3-1. Základem jsou dvě rozdílně nabitě elektrody. Prvním typem je sršící neboli vybíjecí elektroda, která je napojena na záporný náboj vysokonapěťového zdroje stejnosměrného proudu a má relativně malou plochu. Druhou elektrodou je elektroda sběrná, která má naopak velkou sběrnou plochou a je napojena na kladně nabitý pól zdroje. Obě elektrody vytvářejí silné elektrostatické pole, které způsobuje výboj zvaný korona, jenž produkuje vysoké množství záporně nabitých iontů. Vlivem

tohoto jevu jsou tuhé částice nabitý záporným nábojem a jsou tedy přitahovány kladně nabitou elektrodou, na jejímž povrchu se zachytávají [21]. Následně jsou zachycené částice mechanicky odstraněny pulzním oklepem.



Obr. 3-1: Schématické znázornění elektrostatického odlučovače

Výhodou elektrostatických odlučovačů je poměrně nízká tlaková ztráta v rozmezí 20 - 200 Pa [22].

3.1.2 Tkaninové filtry

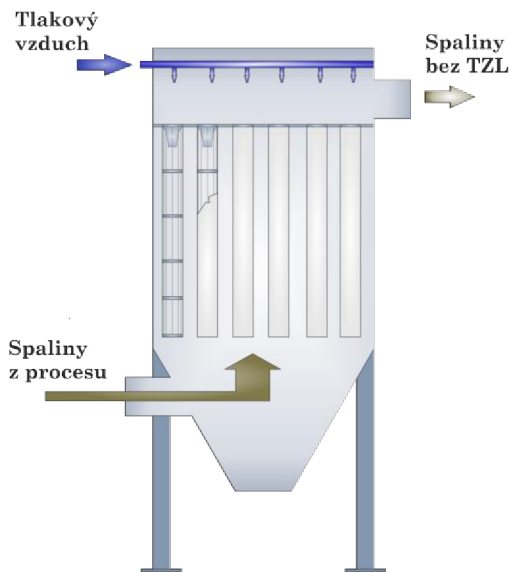
Rukávcové nebo tkaninové filtry slouží především k odstranění TZL z proudu spalin průchodem přes filtrační plochu. Zachycené částice vytvářejí na povrchu filtru tzv. filtrační koláč, který je v různých časových intervalech odstraňován. Pomocí tkaninového filtru je možné zachytávat částice s velikostí od 100 do 0,1 μm s účinností dosahující hodnot kolem 99 % [23].

Samotný filtr, jenž je schematicky znázorněn na obr. 3-2, je tvořen z několika částí. Filtrační hadice (rukávce) jsou navlečeny na filtrační koše viz. obr. 3-3. Koše jsou často vybaveny dýzou, která zvyšuje rychlost proudění tlakového vzduchu při pulzním čištění. Filtrační hadice jsou umístěny v různých uspořádáních v konstrukci filtru, která je opatřena výsypkou pro záchyt popílku a zreagovaného sorbentu odstraněného z filtračních rukávců.

Filtrační koláč je možné odstraňovat 3 různými způsoby [23]:

1. Mechanickým pohybem rukávců
2. Tlakovým vzduchem – pulzní čištění
3. Zpětným proděním vzduchu

Nejvýhodnější metodou čištění je využití tlakového vzduchu tzv. pulse jet, jelikož je možné tuto metodu využít bez nutnosti přerušení provozu, na rozdíl od zbylých dvou zmíněných metod. K pulzní metodě čištění je využít tlakový vzduch s přetlakem 1–6 barů (v závislosti na použitém filtračním materiálu).



Obr. 3-2: Tkaninový filtr



Obr. 3-3: Filtrační rukávce a koše [24]

Materiál filtračních hadic je nutné volit dle provozních podmínek a s ohledem na teplotu spalin, která může dosahovat až 260 °C. V tab. 3-1 jsou pro přehled srovnány vlastnosti 5 typů materiálů v závislosti na maximální teplotě spalin.

Filtrační materiál	Vlastnosti				
	Maximální provozní teplota	Odolnost vůči abrazi	Filtrační vlastnost	Odolnost proti zásadám	Odolnost proti minerální kyselinám
Polypropylen	77 °C	Výborná	Dobrá	Výborná	Výborná
Polyester	135 °C	Výborná	Dobrá	Nízká	Nízká
Aramid	204 °C	Výborná	Výborná	Dobrá	Nízká
Skelná vlákna	260 °C	Nízká	Nízká	Nízká	Slabá
Teflon	260 °C	Dobrá	Nízká	Výborná	Výborná

Tab. 3-1: Vlastnosti filtračních materiálů [25]

Výhodou tkaninových filtrů je především vysoká účinnost. Díky širokému spektru materiálů a jejich povrchové úpravě je možné aplikovat tento druh čištění spalin do různých provozů. Výhodou oproti elektrostatickým odlučovačům je také fakt, že není nutné brát ohled na elektrický odpor filtrovaných tuhých částic. Naopak oproti ESP vykazují vyšší tlakovou ztrátu, což se projevuje zvýšenými provozními náklady na pokrytí spotřeby elektrické energie.

3.1.3 Adsorpce na povrchu aktivního uhlí

Adsorpce je separační proces, při kterém dochází k zachytávání a odlučování těžkých kovů a PCDD/F z proudu spalin na povrchu pevné látky (adsorbentu). Adsorpce je výrazně účinnější při nižších teplotách.

Sorbent je dávkován přímo do proudu spalin, kde dochází k adsorpci těžkých kovů, dioxinů a furanů PCDD/F. Jako sorbent je využíváno aktivní uhlí nebo směs aktivního uhlí a přírodního zeolitu, které se vyznačují vysokým měrným povrchem. Po nadávkování již není zapotřebí dalšího aparátu v podobě kontaktoru pro tzv. chemisorpci (kontakt sorbentu se spalinami), neboť k adsorpci dochází na filtračním koláči na povrchu filtračních elementů. Průchodem spalin přes tuto vrstvu dochází k zakonzervování těžkých kovů v pórech adsorbentu.

3.2 Snižování obsahu kyselých složek

V závislosti na složení spalovaného odpadu může jeho termickým zpracováním dojít ke zvýšenému obsahu kyselých složek jako je například HCl, HF a SO_x ve spalinách. Tyto látky jsou odstraňovány ze spalin alkalickými činidly, které se různí v závislosti na typu procesu. Technologie odstraňování kyselých plynů dělíme do tří skupin:

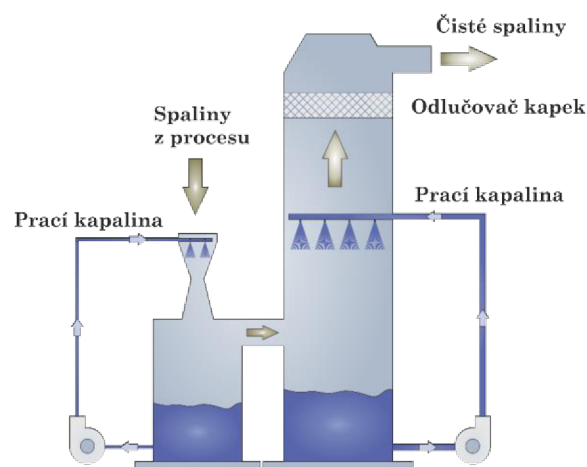
Suché procesy – reakční činidlo (hydroxid vápenatý Ca(OH)₂, hydrogenuhličitan sodný NaHCO₃) je dávkováno do proudu spalin jako sorpční prostředek. Produkt vzniklý reakcí je suchý.

Polosuché procesy – sorpční činidlo je přidáváno do procesu buď ve formě vodného roztoku Ca(OH)₂ (vápenné mléko) nebo v suspenzi. V průběhu dochází k odpařování vody a výsledný reakční produkt je suchý.

Mokré procesy – reakčním činidlem v tomto procesu je často voda, peroxid vodíku nebo prací roztok (roztok hydroxidu sodného NaOH). Výsledný reakční produkt je kapalný.

3.2.1 Mokré čištění

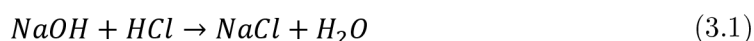
Procesy mokrého praní využívají různých druhů praček („scrubber“) jako jsou například tryskové, otáčivé, suché věžové, rozprašovací, náplňové nebo Venturiho pračky. Obecně je proces mokrého čištění rozdělen do dvou stupňů. Takováto dvoustupňová vypírka spalin je schematicky znázorněna na obr. 3-4.



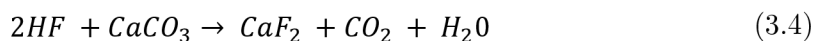
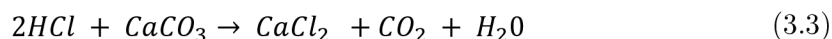
Obr. 3-4: Dvoustupňová vypírka spalin

Pro čištění je využíváno tzv. pracích kapalin, které jsou rozstříknuty do proudu spalin. Mezi běžně využívané prací kapaliny se řadí vodný roztok uhličitanu vápenatého CaCO_3 , vápenného mléka (vodní suspenze vápna) nebo roztoku NaOH (hydroxid sodný).

V prvním stupni dochází k ochlazení horkých spalin prací vodou přibližně na teplotu 60-65 °C. Dochází také k nasycení kouřových plynů vodou, což má za následek pohlcování plynných kyselin HCl a HF a kondenzaci plynných oxidů kovů (např Hg). Prací voda má nízké pH (2 až 4). Rovnice (3.1) a (3.2) zobrazují chemické reakce prací kapaliny hydroxidu vápenatého (NaOH) a plynných kyselých složek spalin (HCl a HF), ke kterým dochází v prvním stupni praní spalin.

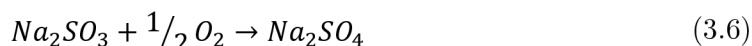
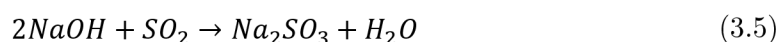


V rovnici (3.3) a (3.6) je zobrazena chemická reakce kyselých složek s prací kapalinou ve formě vodného roztoku uhličitanu vápenatého CaCO_3 .

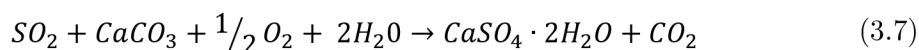


Těmito reakcemi dochází k tvorbě vodného roztoku s nízkým pH.

Ve druhém stupni dochází k odstranění oxidu siřičitého SO_2 absorpcí prací kapaliny (NaOH). Spaliny proudí zdola nahoru, proti proudu vstříkované prací kapaliny. Nad vstříkovacím zařízením je instalován odlučovač kapek. Tímto procesem dochází k výměně látek a redukci kyselých složek spalin. Prací kapalina bývá často recyklována zředěním procesní vodou a následně opakovaně využita v procesu. Část prací vody je však vypouštěna ve formě vody odpadní, která je před vypuštěním speciálním způsobem čištěna (neutralizace, srážení těžkých kovů). Rovnice (3.5) a (3.6) popisují chemické reakce odehrávající se ve druhém stupni praní při využití hydroxidu sodného jako prací kapaliny.



Rovnice (3.7) pak zobrazuje sumární vzorec odsíření spalin pomocí vodní suspenze uhličitanu vápenatého za vzniku energosádrovce.



Obrovskou výhodou tohoto procesu praní je především nízká spotřeba absorpčního činidla, které je dávkováno v stechiometrickém poměru 1 - 1,2 [10].

Mokrý čištění spalin je považováno za velice efektivní metodou odstraňování kyselých složek spalin (95 % a více pro SO_2 , nad 90 % pro HCl a HF [26]). Snižují také emise prachu, dioxinů a furanů (PCDD/F) rtuti (Hg^{2+}) a dalších polutantů (bromidy, jodidy atd.). Pro zajištění správně funkce je nutné před technologií mokrého praní zařadit EPS nebo tkaninový filtr z důvodu snížení koncentrace prachových částic ve spalinách. Metoda je vhodná pro čištění

spalin z procesu spalujícího odpad, jehož prvkové složení je proměnlivé (vysoké koncentrační špičky). Za nevýhodu lze považovat vysokou investiční cenu spojenou s výstavbou technologie čištění odpadní vody, nároky na zastavěný prostor a provozní náklady spojené s čištěním odpadní vody a energetickou náročností procesu, jelikož tepelná energie spalin je mařena jejich zchlazením prací kapalinou nebo vodou.

3.2.2 Suché čištění

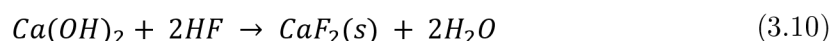
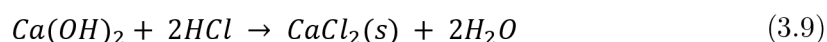
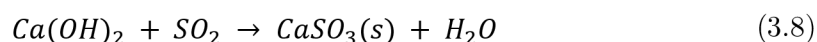
Suchá metoda odstraňování kyselých složek plynů je prováděna pomocí absorpčního činidla, které je rozprášeno buď přímo do spalinovodu, nebo do speciálního reaktoru. Jako absorpční činidlo je nejčastěji využíván hydroxid vápenatý neboli vápno Ca(OH)_2 nebo hydrogenuhličitan sodný NaHCO_3 [27]. Po absorpci látek činidlem vzniká pevný reakční produkt (soli a nezreagovaný zbytek), který je nutné z proudu spalin odstranit. Nejčastěji se tak děje za pomoci tkaninového filtru nebo elektrostatického odlučovače. Sorbent je uložen v zásobníku (silo, big-bag apod.), odkud je pomocí dávkovacího zařízení dávkováno potřebné množství sorbentu do proudu spalin.

Tato metoda je použitelná pro čištění spalin vznikajících při spalování různých druhů odpadů. V porovnání s mokřím praním je zde zvýšená spotřeba činidel, větší požadavky na filtrační plochu tkaninového filtru a také zvýšené náklady na odstraňování reakčních zbytků. Naopak výhodou je nižší pořizovací cena, možnost zpětného zisku různých chemických prvků, nulová spotřeba vody a zároveň nulová produkce odpadních vod.

Neutralizace spalin Ca(OH)_2

Při využití sorbentu ve formě Ca(OH)_2 pro neutralizaci kyselých složek spalin je sorbent dávkován do spalinového potrubí při provozní teplotě okolo $150\text{ }^\circ\text{C}$. Pro zvýšení účinnosti procesu bývají spaliny vlhčeny procesní vodou před samotným dávkováním sorbentu.

Pro bližší představu o chemickém průběhu reakcí jsou níže uvedeny reakční rovnice (3.8), (3.9) a (3.10) mezi hydroxidem vápenatým (vápenným hydrátem) a SO_2 , HCl a HF [27]



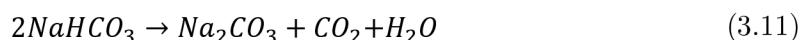
Množství dávkovaného sorbentu je závislé na provozní teplotě a pro každý sorbent se může lišit. Například u vápna je doporučený stechiometrický přebytek 1,8-2 s ohledem na koncentraci kyselých složek ve spalinách a možnou nerovnoměrnost rozprášení sorbentu [10].

Z důvodu zvýšení efektivity neutralizace kyselých složek vzhledem k vysokému stechiometrickému přebytku sorbentu je možné využít částečné recyklace sorbentu, kdy je zpětně dávkován do reaktoru.

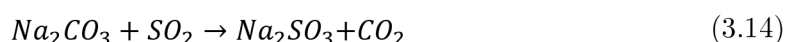
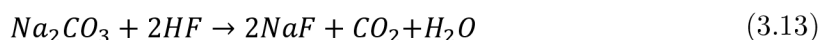
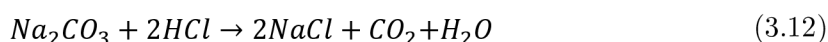
Neutralizace spalin NaHCO_3

Při neutralizaci kyselých složek spalin pomocí NaHCO_3 je dávkován do proudu spalin ve formě jemně mletého prášku (pod $20\text{ }\mu\text{m}$). Při teplotě vyšší než $140\text{ }^\circ\text{C}$ dochází ke kalcinaci sorbetu

za vzniku uhličitanu sodného Na_2CO_3 , vody H_2O a oxidu uhličitého CO_2 . Kalcifikační proces zobrazuje rovnice (3.11).



Takto vzniklý uhličitan se vyznačuje značnou pórovitostí a zvýšeným měrným povrchem. Při promíchávání uhličitanu sodného a spalin v kontaktoru dochází k neutralizační chemické reakci kyselých složek spalin (HCl , SO_2 a HF) s aktivní látkou (Na_2CO_3) a také k jejich adsorpci na povrchu vzniklého uhličitanu sodného. Neutralizační reakce jsou popsány v rovnicích (3.12), (3.13) a (3.14).



V posledním kroku dochází k oxidaci siřičitanu sodného, viz. reakce (3.15).



Ideální teplota spalin pro účinnou funkci NaHCO_3 se pohybuje v rozsahu 200-220 °C. Teploty nad 300 °C nejsou doporučovány z důvodu začínající sintrace sorbentu. Stechiometrický přebytek hydrogenuhličitanu sodného je výrazně nižší než u hydroxidu vápenatého (1,1-1,5) [10].

3.3 Snižování emisí oxidů dusíku

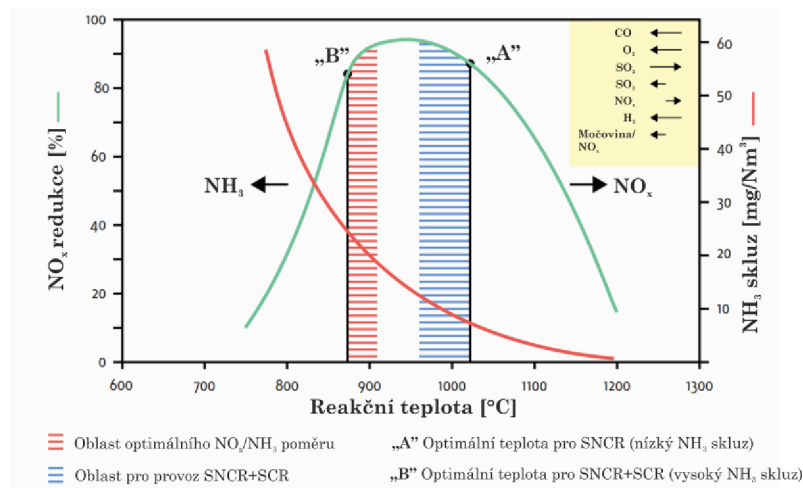
Obecně při spalování odpadu obsahujícího organické látky dochází k tvorbě oxidů dusíků tzv. NO_x , které se nejčastěji vyskytují ve formě oxidu dusnatého NO a oxidu dusičitého NO_2 [28]. Tvorba NO_x probíhá primárně oxidací chemicky vázaného dusíku ve spalovaném odpadu (palivové NO_x) a také reakcí molekulárního dusíku s kyslíkem ve spalovacím vzduchu při teplotách vyšších než 1300 °C [10] (termické NO_x). Množství NO_x ovlivňují především spalovací teplota, množství spalovacího vzduchu a také množství dusíku vázaného v palivu.

Existuje celá řada primárních opatření, kterými je možné ovlivnit množství vznikajících oxidů dusíku při spalování. Níže jsou popsána možná opatření.

- Snížení přebytku vzduchu, čímž se automaticky sníží také množství přebytečného dusíku.
- Snížení teploty plamene – snížená produkce především termických NO_x
- Zajištění vhodné distribuce spalovacího vzduchu, eliminace vzniku teplotních zón.
- Zavedením recirkulace spalin je možné nahradit část spalovacího vzduchu. Snížení je způsobeno menším obsahem kyslíku ve spalinách než ve vzduchu.
- Vstřikováním čistého kyslíku je dodáván potřebný kyslík ke spalování bez dodávky nadbytečného dusíku ve spalovacím vzduchu.
- Vstřikování zemního plynu – rozstřík zemního plynu nad rošt, čímž dojde k opětovnému spalování vzniklých plynů.

Sekundárním opatřením je rozstřík reagentu do proudu spalin, kde dojde k jeho reakci s oxidy dusíku obsaženými ve spalinách. Často je využíváno amoniaku nebo jeho derivátů (např. močovina), které fungují jako redukční činidla. Oxidy dusíku jsou redukovány na elementární dusík N_2 a vodní páru H_2O . Nejvyužívanějšími procesy jsou: selektivní katalytická redukce (SCR) a selektivní nekatalytická redukce (SNCR). Pro zajištění správné funkce redukčních reakcí je zapotřebí dodržet vhodnou reakční teplotu.

Reakční teplota má nejen vliv na redukcí dusíku, ale i na množství nezreagovaného reagentu NH_3 , tzv. čpavkového skluzu. Obr. 3-5 zobrazuje vliv teplotního okna na účinnost redukce NO_x a NH_3 skluzu. Na obrázku jsou stanoveny optimální teplotní rozmezí pro co nejvýhodnější poměr NO_x/NH_3 . Obecně lze říci, že čím je reakční teplota vyšší, tím dochází k vyšší redukci NO_x , čpavkový skluz se snižuje, ale naopak roste množství NO_x vznikajících oxidací čpavku. Při nižších teplotách dochází k většímu skluzu čpavku a redukce NO_x je méně účinná. Z tohoto důvodu je nutné stanovit přijatelné množství vstříkovaného NH_3 (ať už ve formě čpavkové vody nebo močoviny).

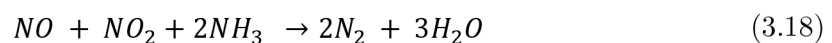
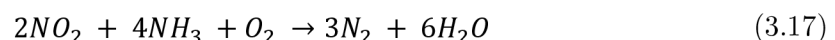
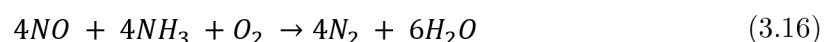


Obr. 3-5: Vliv teplotního okna na redukcí NO_x a skluz NH_3 [29]

3.3.1 SCR – selektivní katalytická redukce

Selektivní katalytická redukce je proces, ve kterém je redukční činidlo, tvořené amoniakem NH_3 nebo vodným roztokem močoviny ($CO(NH_2)_2$), vstříknuto do proudu spalin. Směs následně prochází katalyzátorem, kde dochází k reakci redukčního činidla s oxidy dusíku za vzniku elementárního dusíku a vodní páry. Celý proces SCR je znázorněn na obr. 3-6.

Katalytická redukce probíhá dle níže uvedených rovnic:



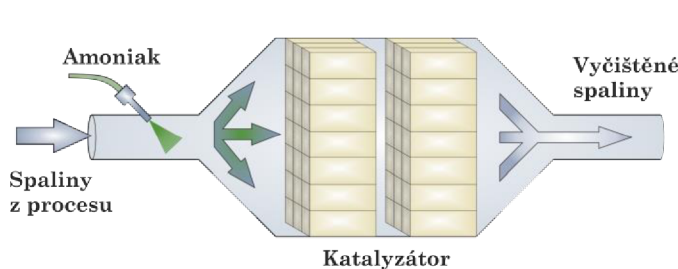
Obvyklé provozní teploty katalyzátoru se nejběžněji pohybují v rozmezí od 230 do 320 °C, přičemž dosahují vysoké účinnosti, která se běžně pohybuje kolem 90 % při téměř

stechiometrické spotřebě redukčního činidla (1-1,1) [10]. Obecně lze říci, že čím je provozní teplota nižší, tím je také nižší reakční rychlost a zvyšuje se množství unikajícího amoniaku (čpavkového skluzu). Při nižších teplotách je proto potřeba využít větší plochy katalyzátoru. Naopak vyšší provozní teploty snižují živostnost katalyzátoru a mohou vést k oxidaci NH_3 a produkci nadbytečných NO_x .

Reaktor je obvykle tvořen kovovou konstrukcí, ve které jsou umístěny jednotlivé bloky katalyzátorů v nejrůznějších kombinacích a uspořádáních. Katalyzátory jsou vyráběny z různých druhů materiálů, které jsou rozděleny dle provozní teploty spalin na [30]:

1. Drahé kovy pro nízkoteplotní využití – pro teploty 180 - 290 °C
2. V_2O_5 nebo WO_3 (aktivní látky) na TiO_2 (nosič) – pro teploty 260-430 °C
3. Zeolity (krystalické, porézní nebo syntetické aluminosilikát) – pro teploty 460-600 °C

Dalšími faktory, které ovlivňují volbu správného typu katalyzátoru, je například požadovaný stupeň redukce NO_x , čpavkový skluz, koncentrace katalytických jedů a TZL, životnost katalyzátoru atd. Hojně využívaným typem katalyzátoru jsou voštinové bloky typu Honeycomb, zobrazené na obr. 3-7.



Obr. 3-6: Schéma SCR



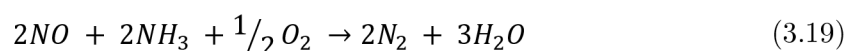
Obr. 3-7: SINOx Honeycomb katalyzátor společnosti JM [31]

Selektivní katalytická redukce může být aplikována pro čištění spalin z různých druhů odpadů. Univerzální je také velikost provozu, avšak kvůli vyšším pořizovacím nákladům je spíše využívána pro střední a větší spalovací zařízení. Díky vysoké účinnosti odstranění NO_x je uplatňována v případě vysokých legislativních nároků a na čistotu spalin, především pak nízkou požadovanou koncentrací NO_x . SCR slouží také ke katalytické destrukci PCDD/F s účinností až 98-99,9 % při volbě vhodného materiálu a provozní teploty [10].

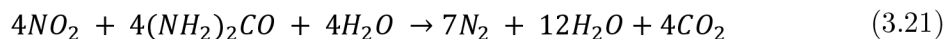
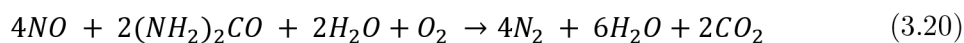
3.3.2 SNCR – selektivní nekatalytická redukce

Selektivní nekatalytická redukce využívá pro snižování oxidů dusíku ve spalinách amoniak (NH_3) nebo močovinu ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), které jsou vstříkovány přímo do pece při teplotách od 850 do 1100 °C [10]. Stejně jako u SCR jsou redukcí produkovány elementární dusík a voda ve formě vodní páry.

Redukce NO_x s využitím amoniaku je efektivnější při nižších provozních teplotách doporučeného teplotního rozsahu (850-950 °C) [10]. Rovnice (3.19) vyjadřuje redukci oxidu dusnatého s využitím amoniaku při teplotním rozsahu od 850 do 1100 °C [30].



Při využití močoviny pro redukci oxidů dusíku je doporučovaná teplota reakce v rozmezí od 950 do 1050 °C a reakce probíhá dle následujících reakčních rovnic [32]:



Metoda SNCR dosahuje maximální účinnosti odstranění NO_x až 75 % v případě vhodné optimalizace, avšak ve většině procesů je dosažená účinnost procesu okolo 55 %. Pro co nejúčinnější provoz je potřeba kromě správné provozní teploty také zajistit správné promíchání reagentu (velikosti kapek) se spalinami a potřebnou dobu kontaktu v teplotním okně (0,2-0,5 s).

Dle literatury [32] by množství nezreagovaného amoniaku NH₃ nemělo překročit hodnotu 5 mg/mN³. Pro optimální poměr čpavkového skluzu k redukci NO_x je dle zdroje [33] doporučován molární poměr NH₃/NO_x mezi 1,5 a 2,5. Následně je možné čpavkový skluz redukovat např. mokrou vypírkou. Negativním jevem při využití močoviny při redukci je nadměrná tvorba N₂O, která je 2-2,5x vyšší než v případě amoniaku.

SNCR je ve srovnání s SCR velice jednoduchým technologickým řešením, kde není zapotřebí doplnění technologie o katalyzátor. Navíc se jedná o poměrně levné řešení, jak pořizovacími, tak i provozními náklady. Dle referenčního dokumentu BAT je možné tuto metodu využít nezávisle na typu spalovaného materiálu a kapacitě zařízení.

3.4 Snižování obsahu dioxinů a furanů

Spaliny vznikající nejen ve spalovnách zdravotnických odpadů mohou obsahovat široké spektrum organických látek. Nejvíce se ve spalinách vyskytují polychlorované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany (PCDD/F), které bývají často zkráceně nazývány jako dioxiny a furany. V menší míře se ve spalinách vyskytují také halogenové aromatické uhlovodíky, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) a BTX (benzen, toluen, xylen).

Dioxiny a furany jsou klasifikovány jako karcinogenní, reprotoxické a halogenované látky, které způsobují poruchy imunitního, nervového a endokrinního systému a negativně ovlivňují reprodukční funkci člověka [34]. Dle směrnice 2000/76/ES je limitní obsah PCDD/F ve spalinách 0,1 ng TEQ/Nm³ [35].

Při spalování nebezpečných odpadů dochází k tvorbě PCDD/F třemi níže uvedenými mechanismy [10]:

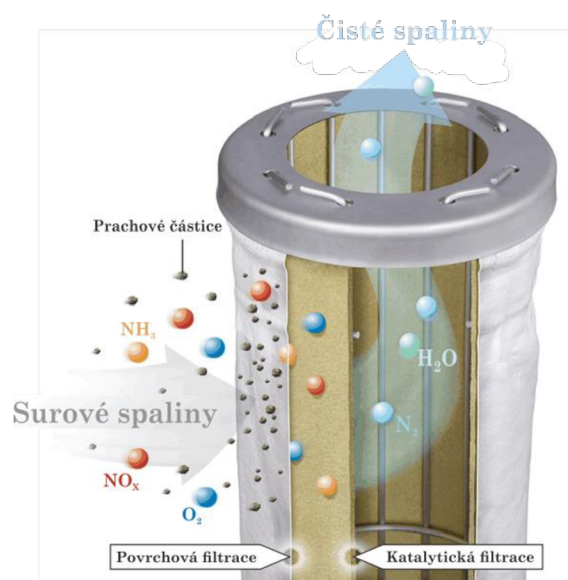
1. Tvorba PCDD/F z chlorovaných uhlovodíků (chlorohydrobenzen nebo chlorbenzen), vznikajících nebo vzniklých přímo v peci.
2. Katalytickou reakcí mezi uhlíkem, uhlíkatými sloučeninami a sloučeninami anorganického chlóru při nízkých teplotách (200-450 °C).
3. Neúplná destrukce dioxinů a furanů dodaných spolu s odpadem spálením v peci.

Primárním opatřením snižujícím produkci PCDD/F je dobře regulovaný proces spalování, kterým je možné předejít tvorbě prekurzorů. Prevencí tvorby PCDD/F v systému čištění spalin je omezení doby zdržení spalin v teplotním rozmezí 200-450 °C [10].

Sekundárním opatřením je využití adsorpčních procesů a oxidačních katalyzátorů. Dle referenčního dokumentu nejlepších dostupných technik BAT [10] je pro odstraňování dioxinů a furanů ze spalin vznikajících při spalování nebezpečných zdravotnických odpadů doporučováno využití SCR, adsorpce aktivním uhlím nebo katalytických rukávcových filtrů.

3.4.1 Katalytické rukávcové filtry

Jedná se o speciální typ rukávcových filtrů, které jsou buď impregnovány katalyzátorem nebo je katalyzátor mísen rovnou s organickým materiálem při výrobě vlákna rukávců. Nekatalytickým materiálem rukávců je PTFE (polytetrafluorethylen), který je doplněn katalyzátorem $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ [10]. Takovéto filtry slouží k odstraňování prachových částic spalin, zajištění katalytické redukce NO_x a rozkladu plyných PCDD/F. Příkladem katalytických filtračních hadic jsou dvouvrstvé rukávce DeNOx společnosti GORE [36], viz. obr. 3-8.



Obr. 3-8: Filtračně katalytický systém DeNOx společnosti GORE [37]

Provozní podmínky jsou velice podobné jako u klasických tkaninových filtrů, avšak pro zajištění účinného odbourání PCDD/F by provozní teplota spalin neměla být nižší než $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]. Účinnost snížení koncentrace dioxinů a furanů ve spalinách se pohybuje okolo 99% [10].

Jelikož nedochází k zachytávání rtuti, je možné tuto metodu doplnit technologií dávkováním aktivního uhlí. Další nevýhodou je vyšší tlaková ztráta spalin při průchodu filtrem, která je dána strukturou filtračního materiálu. V porovnání s tkaninovými filtry se jedná o technologii zatíženou vyššími pořizovacími náklady, ale vzhledem ke kombinaci několika dílčích operací čištění spalin do jednoho aparátu snižuje nároky na zastavěný prostor, investiční náklady a provozní náklady vlivem minimalizace tlakových ztrát jednotlivých aparátů (místní odpory). Díky své univerzálnosti je možné tuto technologii využít pro široké spektrum spalovaných odpadů.

3.4.2 4D filtrace

4D filtrace, kterou představuje technologie Cerafil® TopKat společnosti Clear-Edge [38], je obdobně jako technologie GORE DeNOx komplexní metoda čištění spalin, která kombinuje několik jednotkových operací do jednoho aparátu. Filtrační elementy 4D filtru (obr. 3-9) jsou vyrobeny z mikroporézní keramiky, do které je implementován katalyzátor na bázi V₂O₅/TiO₂ pro účinný rozklad PCDD/F, těkavých uhlovodíků a NO_x. Jednotlivé operace jsou uvedeny níže.

- **DeDusting - Filtrace tuhých znečišťujících látek ze spalin (TZL)**
Dochází k povrchové filtraci a tvorbě filtračního koláče na povrchu keramického elementu. Průniku mikroskopických částic je zabráněno speciálním povlakem (obdoba membrány tkaninových filtrů). Oklepání filtračního koláče je prováděno pulsem stlačeného vzduchu, tzv. „pulse jet“.
- **DrySorption - Neutralizace kyselých složek dávkováním práškového sorbentu**
Snížení obsahu kyselých složek (SO₂, HCl a HF) je prováděno dávkováním jemně namletého práškového sorbentu do potrubí přes 4D filtr. Z důvodu vyšších provozních teplot okolo 220 °C je využíváno sorbentu NaHCO₃.
- **DeNOx - Selektivní katalytický rozklad NO_x**
Díky implementovanému katalyzátoru je možné snižovat obsah oxidů dusíku ve spalinách. Redukční činidlo (plynný amoniak, vodný roztok amoniaku nebo močovina) je vstříkováno do proudu spalin přes keramické elementy. Průchodem přes katalyzátor dochází k rozkladu oxidů dusíku na elementární dusík a kyslík.
- **DeDiox - Katalytický rozklad dioxinů a furanů (PCDD/F)**
Při průchodu spalin keramickým elementem 4D filtru dochází nejprve k záchytu pevných částic včetně na ně navázaných dioxinů. PCDD/F navázané v plynné fázi jsou rozkládány průchodem porézní keramikou s katalyzátorem.

Další výhodou této metody je především její vysokoteplotní odolnost, kdy keramické elementy mohou být vystaveny teplotám dosahujícím až 900 °C. Kombinace jednotkových operací do jednoho aparátu s sebou přináší také snížení investičních nákladů.



Obr. 3-9: Keramický element 4D filtru Cerafil® TopKat [38]

4 Emisní legislativa

Množství emisí v plynech nebo pevných látkách vznikajících spalováním zdravotnických odpadů je nutné regulovat na úroveň, kterou stanovuje příslušná legislativa. Nejvyšším právním dokumentem, který určuje povolené množství produkovaných emisí, je Směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/75/EU o průmyslových emisích. Tuto směrnici na území České republiky upravuje a doplňuje již dříve zmíněný zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, a také vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Na základě směrnice 2010/75/EU je také vydán referenční dokument o nejlepších dostupných technikách BREF/BAT (integrováná prevence a kontrola znečištění) při nakládání s odpady.

4.1 Směrnice 2010/75/EU

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrováné prevenci a omezování znečištění) ze 4. listopadu 2010 je nejvyšší právní dokument pojednávající o emisích ze spaloven odpadů platný ve všech členských státech Evropské unie. Primárně slouží ke stanovení pravidel týkajících se integrováné prevence a omezování znečištění vznikajícího v důsledku průmyslových činností.

Kapitola IV (zvláštní ustanovení pro zařízení na spalování odpadu a zařízení na spoluspalování odpadu), která nahrazuje směrnici Evropského parlamentu a Rady 2000/76/ES o spalování odpadů, pojednává o nejrůznějších typech zařízení spalujících odpad (také nebezpečný), o příjmu, skladování a úpravě odpadu, ale také o technologiích spalování odpadů včetně příslušného čištění spalin a kontroly emisí vypouštěných do ovzduší.

Dle kapitoly IV nesmějí emise do ovzduší ze zařízení na spalování odpadu nebo případně spoluspalování odpadu překročit mezní hodnoty, jež jsou uvedeny v částech 3 a 4 přílohy VI, nebo určené v souladu s částí 4 uvedené přílohy. Tyto emisní limity jsou následně zmíněny v tab. 4-1.

4.2 Zákon č. 201/2012 Sb.

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší implementuje předpisy Evropské unie týkající se ochrany ovzduší a upravuje:

- a) Přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší
- b) Způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení
- c) Nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší
- d) Práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší

Zákon je dále doplněn příslušným prováděcím předpisem, kterým je vyhláška 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.

4.3 Vyhláška č. 415/2012 Sb.

Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší vešla v platnost 1. 12. 2012. Jedná se o dokument dále upravující zákon č. 201/2012 Sb. na základě předpisů Evropské unie, jako jsou směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/76/ES o spalování odpadu a 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění).

Vyhláška předepisuje emisní limity pro daná zařízení a pojednává také o způsobu určování úrovně znečišťování měřením a výpočtem. Dále pak specifikuje požadavky na kvalitu paliv a způsoby jejich prokazování. V neposlední řadě jsou ve vyhlášce zmíněny kompenzační opatření stacionárních zdrojů k minimalizaci úrovně znečištění.

V příloze č. 4 jsou popsány veškeré podmínky provozu stacionárního zdroje tepelně zpracovávajícího odpad. Tyto hodnoty jsou pak vyobrazeny v tab. 4-1 a porovnány s ostatními udávanými emisními limity.

4.4 Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách BREF

Referenční dokument BREF (Reference Document on Best Available Techniques) určuje nejlepší dostupné techniky BAT (Best Available Techniques) pro dosažení co nejnižších množství emisí vznikajících průmyslovou činností na území Evropské unie. Dokumenty BREF poskytují státním orgánům členských států, fyzickým a právnickým osobám informace o BAT, jež vznikají v souladu se směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích, na základě výměny technických a ekonomických informací daných průmyslových odvětví mezi jednotlivými členskými státy [39].

Srovnávací dokument BREF o spalování odpadů WI (Waste Incineration) pojednává především o nejlepších dostupných technikách spalování a následného čištění spalin pro dosažení požadovaných emisních limitů. Nejnovější verzí je revidovaný dokument BAT/BREF draft 1 z roku 2017.

4.5 Souhrn stávajících a navrhovaných emisních limitů

V níže uvedené tab. 4-1 jsou shrnuty a porovnány hodnoty emisních limitů uložené směrnicí 2010/75/EU, potažmo vyhláškou 415/2012 Sb. a referenčním dokumentem BREF WI. Veškeré hodnoty emisních limitů jsou vztaženy na normální podmínky (0 °C, 101 325 Pa) a přepočteny na suché spaliny při uvažovaném referenčním obsahu kyslíku O₂ 11 %_{obj.}. Všechny hodnoty uvedené v tabulce jsou v jednotkách mg/m_N³, kromě látek PCCD/F, které jsou vyjádřeny v jednotkách toxického ekvivalentu ng TEQ/m_N³. Rtuť je v současné době vyjádřena také v mg/m_N³, avšak v draftu dokumentu BREF/BAT z roku 2017 dochází k posunu jednotky na µg/m_N³.

Znečišťující látka	2010/75/EU o průmyslových emisích	Vyhláška 415/2012 Sb.	BREF/BAT Nová zařízení	BREF/BAT Existující zařízení
TZL	10	10	2-5	2-5 ¹
TOC/TVOC	10	10	3-10	3-10
SO ₂	50	50	5-30	5-40
NO _x	200 ² / 400 ³	200	50 ⁴ -120	50-150 ⁵
CO	50	50	10-50	10-50
HCl	10	10	2 ⁶ -6	2-8 ⁷
HF	1	1	<1	<1
PCDD/F (ng TEQ/mN ³)	0,1	0,1	<0,01-0,04	<0,01-0,06
Hg (µg/mN ³)	50	50	5-20	5-25
Cd, Tl	0,05	0,05	0,005-0,02	0,005-0,02
ostatní těžké kovy	0,50	0,50	0,01-0,3	0,01-0,3
NH ₃	-	-	2 ⁸ -10	2-10 ⁹

Tab. 4-1: Srovnání stávajících a navrhovaných denních emisních limitů pro spalování odpadu

K významnému zpřísnění dojde především v případě látek PCDD/F, jejichž navrhovaný emisní limit je o řád nižší než ten stávající. Pro dodržení tohoto limitu se jeví nezbytnou součástí technologie čištění spalin SCR, která slouží nejen k redukci NO_x, ale také pro synergický rozklad PCDD/F při průchodu katalyzátorem. Další možností je využití adsorpce na povrchu uhlíkatého sorbentu s vysokým měrným povrchem.

¹ Pokud při spalování nebezpečných odpadů není v technologii čištění spalin zahrnut tkaninový filtr je vyšší hranice koncentrace 7 mg/mN³.

² Uvažovaný limit 200 mg/mN³ NO_x platí pro nová zařízení pro termickou likvidaci odpadu, nebo pro stávající zařízení přesahující svou zpracovatelskou kapacitou spalovaného odpadu 6 t/h.

³ Uvažovaný limit 400 mg/mN³ NO_x platí pro stávající zařízení nepřesahující svou zpracovatelskou kapacitou spalovaného odpadu 6 t/h.

⁴ Spodní hranice doporučeného rozsahu může být dosaženo v případě využití SCR.

⁵ Pokud není stávající zařízení vybaveno SCR, je horní hranice doporučeného rozsahu 180 mg/mN³.

⁶ Spodní hranice doporučeného rozsahu může být dosaženo v případě využití mokré vypírky spalin.

⁷ Horní hranice doporučeného rozsahu může být dosaženo v případě využití suché sorpce.

⁸ Spodní hranice doporučeného rozsahu může být dosaženo v případě využití SCR.

⁹ Horní hranice doporučeného rozsahu u nových zařízení, využívajících SNCR bez mokřých metod čištění spalin je 15 mg/mN³.

Snížení obsahu TZL s sebou přináší nutnost zvýšení účinnosti zachytu pevných částic, kterou je možné navýšit například duplikací tkaninových filtrů. Toto řešení je nezbytné v případě, kdy je využito suché sorpce kyselých složek spalin spolu s adsorpcí na povrchu uhlíkatého sorbentu.

Nově navrhované limity také zahrnují emise čpavku ve spalinách vypouštěných do ovzduší. Toto množství není v současné době limitováno ani směrnicí 2010/75/EU o průmyslových emisích, ani vyhláškou 415/2012 Sb. Pro dodržení limitů bude potřebné zajištění vhodného poměru NH_3/NO_x pro efektivní fungování technologií SNCR a SCR při současném splnění limitu na čpavkový skluz.

5 Analýza stávajících spaloven zdravotnického odpadu v ČR

V současné době se na území České republiky nachází 20 aktivně provozovaných zařízení, která termicky zpracovávají nebezpečný průmyslový či zdravotnický odpad. Dle informací z [40] byla sestavena přehledová tab. 5-1, ve které jsou sumarizovány detailní informace o jednotlivých zařízeních, jako je rok zahájení provozu, maximální provozní kapacity a množství termicky zpracovaného odpadu (zdravotnický, průmyslový nebezpečný) v letech 2015, 2016 a 2017.

Dle zdroje [40] zařízení s pořadovým číslem 9–20 slouží ke spoluspalování zdravotnického odpadu, jehož poměrové zastoupení v celkovém množství spalovaného odpadu jednotlivá zařízení nevykazují. Z tohoto důvodu se bude práce dále zabývat pouze spalovnami s pořadovým číslem 1-8, které dle zdroje [40] slouží primárně ke spalování zdravotnického odpadu.

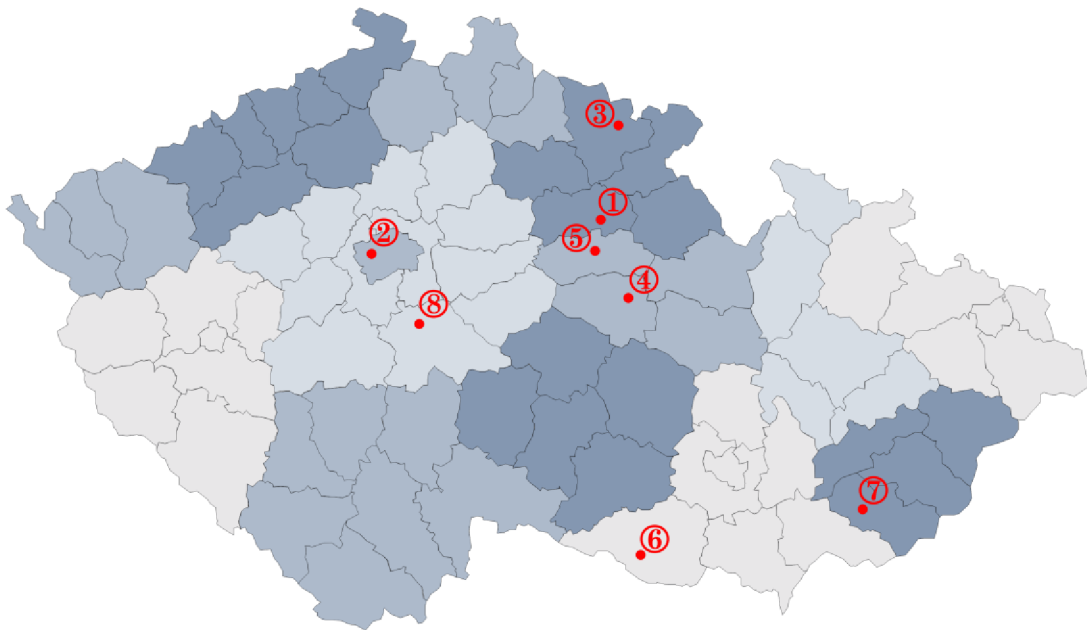
Pořadové číslo	Provozovna	Zahájení provozu	Maximální provozní kapacita	Množství spáleného odpadu za rok 2015 (t/rok)	Množství spáleného odpadu za rok 2016 (t/rok)	Množství spáleného odpadu za rok 2017 (t/rok)
1	Fakultní nemocnice Hradec Králové	1996	1 900	667	181	980
2	Fakultní nemocnice v Motole	2005	2 940	1 188	1 243	1 259
3	Oblastní nemocnice Trutnov a. s.	1996	1 000	121	131	139
4	Hamzova odborná léčebna pro děti a dospělé	1993	750	542	612	605
5	Nemocnice Pardubického kraje, a.s.	1994	750	644	723	687
6	Nemocnice Znojmo	1994	780	661	631	618
7	Uherskohradištská nemocnice a.s.	1996	350	343	332	325
8	Nemocnice Rudolfa a Stefanie Benešov, a.s.	2001	1 000	818	874	844
9	SUEZ Využití zdrojů a.s. - Spalovna Plzeň	1993	2 500	2 120	2 406	2 165

10	E K O T E R M E X, a.s.	2004	3 240	2 907	2 775	2 835
11	MEGAWASTE- EKOTERM, s.r.o.	1993	4 000	3 305	3 434	3 659
12	RUMPOLD s.r.o. - Spalovna Jihlava	2005	1 900	1 153	1 383	1 656
13	RUMPOLD s.r.o. - Spalovna Strakonice	1990	1 500	1 497	1 426	1 466
14	SPL Jablonec nad Nisou, s.r.o.	2000	2200	1 893	1 862	1 946
15	SPORTEN, a.s.	1997	864	758	458	580
16	SUEZ Využití zdrojů a.s. - spalovna průmyslových odpadů Trmice	1993	16 000	13 018	14 485	15 472
17	SUEZ Využití zdrojů a.s. - spalovna NO Ostrava	2000	25 000	20 404	9 993	24 763
18	SUEZ Využití zdrojů a.s. - Spalovna NO Zlín	1993	4 730	5 246	5 215	4 653
19	AVE Kralupy s.r.o.	1976	15 000	10 000	10 000	13 983
20	DEZA, a.s.	2000	10 000	7 010	8 884	8 600

Tab. 5-1: Seznam spaloven pro spalování zdravotnického odpadu na území ČR [40]

Na základě informací z tab. 5-1 je patrné, že zařízení s největší kapacitou pro termické zpracování zdravotnického odpadu se nachází v pražské Fakultní nemocnici v Motole, kde bylo také od roku 2015 až do roku 2017 zlikvidováno nejvíce zdravotnického odpadu v rámci zkoumaných spaloven.

U spaloven spoluspalujících zdravotnický odpad by bylo nutné znát zastoupené množství spalovaného zdravotnického odpadu v rámci celkového množství likvidovaného odpadu spaloven 9-20. Tyto hodnoty však nejsou dostupné, a proto nelze jasně určit, kolik bylo zlikvidováno zdravotnického odpadu v těchto zařízeních v porovnání se spalovnami zdravotnického odpadu.



Obr. 5-1: Rozmístění spaloven zdravotnického odpadu na území ČR

Při podrobnějším pohledu na obr. 5-1 je možné konstatovat, že největší koncentrace spaloven zdravotnického odpadu je na území Pardubického a Královohradeckého kraje, kde se nachází celkem 4 spalovny. Naopak v Moravskoslezském, Jihočeském, Karlovarském, Libereckém, Ústeckém, Plzeňském kraji a v kraji Vysočina se nenachází žádná spalovna primárně sloužící k likvidaci zdravotnického odpadu (ZO).

Z důvodu malého počtu zařízení pro termickou likvidaci zdravotnického odpadu na území České republiky je odpad likvidován ve spalovnách nebezpečného odpadu. Jestliže je zdravotnický odpad vhodným způsobem stabilizován, je možné jej likvidovat také ve spalovnách komunálního odpadu. Toto řešení však zvyšuje cenu za likvidaci 1 kg odpadu, jelikož je zapotřebí využití vhodné technologie pro úpravu odpadu.

V případě svozu ZO z krajů, které nedisponují spalovnou ZO, do zařízení vyznačených na obr. 5-1, je zvyšována jak finanční náročnost procesu, tak riziko spojené s přepravou odpadu.

Primární tendencí je snížení svozových vzdáleností, případně likvidace přímo v místě vzniku odpadu. Jelikož se spalovny dle obr. 5-1 nacházejí pouze v některých krajích, jsou svozové vzdálenosti z místa produkce do místa likvidace v rámci celé České republiky vysoké.

5.1 Technologie spaloven zdravotnického odpadu

Spalovny zdravotnického odpadu jsou tvořeny různými kombinacemi spalovacích zařízení a technologiemi čištění spalin. Pro dané spalovny zdravotnického odpadu na území České republiky jsou jednotlivé metody spalování a čištění spalin uvedeny v tab. 5-2. Při porovnání jednotlivých technologií spaloven je možné konstatovat, že jako spalovací zařízení je nejčastěji používáno dvoustupňové spalování využívající pyrolýzní komory a termoreaktoru. V případě čištění spalin se technologie liší, avšak hojně je využívána suchá sorpce spolu s tkaninovými filtry.

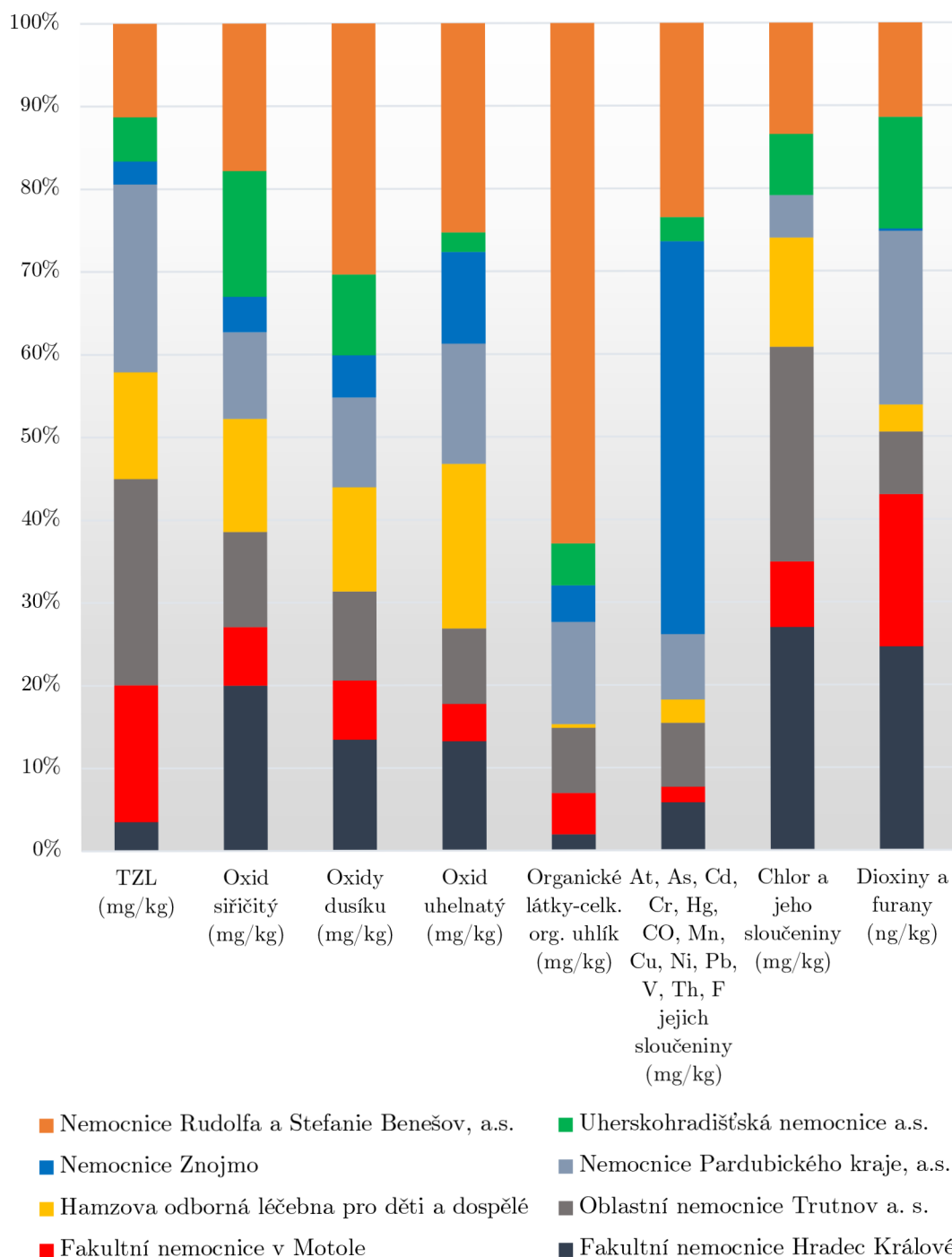
Pořadové číslo	Provozovna	Typ spalovacího zařízení	Technologie čištění spalin
1	Fakultní nemocnice Hradec Králové	Spalovací komora s pohyblivým roštem a termoreaktorem	Suchá sorpce (Ca(OH)_2 , NaHCO_3 a aktivní uhlí), látkový filtr, dioxinový filtr
2	Fakultní nemocnice v Motole	Pyrolýzní komora HOVAL GG 14 s termoreaktorem	Suchá sorpce (Ca(OH)_2 a aktivní uhlí), tkaninový filtr
3	Oblastní nemocnice Trutnov a. s.	Pyrolýzní komora s termoreaktorem	Dvoustupňové čištění spalin – suchá sorpce (Ca(OH)_2 a aktivní uhlí), tkaninový filtr, mokrá alkalická vypírka s roztokem NaOH
4	Hamzova odborná léčebna pro děti a dospělé	Pyrolýzní komora HOVAL GG 7 s termoreaktorem	Dvoustupňové čištění spalin – suchá sorpce Neutrec, kazetový dioxinový filtr
5	Nemocnice Pardubického kraje, a.s.	Pyrolýzní komora HOVAL GG 14 s termoreaktorem	Suchá sorpce s filtračně katalytickým systémem REMEDIA
6	Nemocnice Znojmo	Pyrolýzní komora HOVAL GG 14 s termoreaktorem	Suchá sorpce (Ca(OH)_2 a aktivní uhlí), tkaninový filtr
7	Uherskohradištská nemocnice a.s.	Pyrolýzní komora HOVAL GG 7 s termoreaktorem	Dvoustupňové čištění spalin – suchá sorpce (Ca(OH)_2 a aktivní uhlí), katalyticko-filtrační systém REMEDIA, mokrá alkalická vypírka s roztokem NaOH
8	Nemocnice Rudolfa a Stefanie Benešov, a.s.	Pyrolýzní komora s termoreaktorem spalovací pec	Dvoustupňové čištění spalin – suchá sorpce (Ca(OH)_2 a aktivní uhlí), tkaninový filtr, mokrá alkalická vypírka

Tab. 5-2: Technologie spalování a čištění spalin použité spalovnách zdravotnického odpadu v ČR [41]

5.2 Množství produkováných emisí

Produkce znečišťujících látek úzce souvisí jak se složením spalovaného zdravotnického odpadu, které se může pro jednotlivé zařízení lišit, tak s použitou technologií spalování a čištění spalin. Ve vybraných zařízeních jsou využity různé technologie čištění spalin s odlišnou účinností, proto dochází k různému zatížení životního prostředí znečišťujícími látkami.

Dle statistik ČHMÚ byl vytvořen graf zobrazený na obr. 5-2, který zobrazuje procentuální podíl zkoumaných spaloven zdravotnického odpadu na produkci jednotlivých polutantů v roce 2017, vztážený na kilogram likvidovaného zdravotnického odpadu v daném zařízení.



Obr. 5-2: Podíly znečištění danými polutanty pro jednotlivé spalovny [41]

Z obr. 5-2 je jasně patrné, která spalovna zdravotnického odpadu je majoritním producentem dané znečišťující látky na kilogram likvidovaného odpadu. Benešovská nemocnice Rudolfa a Stefanie v roce 2017 vyprodukovala nejvíce NO_x , CO a TOC na kilogram likvidovaného odpadu. V případě TOC svou produkcí mnohonásobně převyšuje zbylé spalovací zařízení, čímž se nabízí možnost modernizace spalovacího zařízení, především pak úprava stávající technologie čištění spalin.

Spalovna znojemské nemocnice vykázala signifikantně větší produkci těžkých kovů na kilogram spalovaného odpadu oproti zbylým zařízením. Jako možné opatření pro zvýšení účinnosti odstranění těžkých kovů vázaných v TZL se jeví modernizace filtrační technologie, případně úprava dávkování sorbentů (aktivní uhlí).

Relativně vysokou produkci TZL a PCDD/F vykazuje spalovna nemocnice Pardubického kraje. V roce 2018 bylo vyhlášeno výběrové řízení na modernizaci technologie spalovny zdravotnického odpadu, proto lze v příštích letech očekávat snížení produkovaných množství znečišťujících látek na kilogram odpadu oproti roku 2017.

6 Koncepční řešení moderní spalovny zdravotnického odpadu

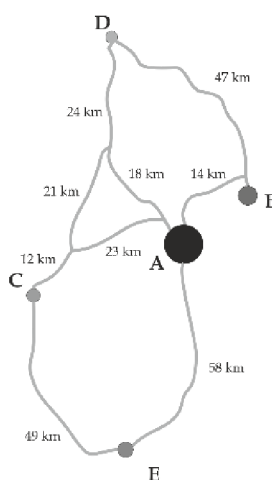
Pro potřeby implementace moderní jednotky pro termické zpracování zdravotnického odpadu a jeho energetické využití byl navržen modelový region. Parametry modelového regionu, jako je produkce opadu, rozmístění producentů zdravotnického odpadu a další, byly korigovány na základě aktuálních hodnot produkce v obdobném region a současných konzultací s odborníky ze společnosti EVECŮ Brno s.r.o. [42]. Souběžně zpracovávaná diplomová práce [43] se zabývá analýzou složení likvidovaného odpadu, shromažďováním a svozem odpadu, jeho následným termickým zpracováním a utilizací tepla.

6.1 Popis zájmové oblasti

Důležitým faktorem pro stanovení odpovídající kapacity spalovny zdravotnického odpadu je především určení počtu zařízení produkujících takovýto odpad v zájmové oblasti, včetně jeho množství. V dalším kroku je nutné vhodně umístit zařízení v rámci zkoumaného regionu. V potaz je nutné brát jak dopravní dostupnost z míst produkce zdravotnického odpadu, tak možnost uplatnění uvolněné energie vzniklé v zařízení energetického využití zdravotnických odpadů.

6.1.1 Produkce odpadu

V rámci modelového regionu se nachází celkem 5 zdravotnických zařízení produkujících zdravotnický odpad. Jejich kapacity jsou různé a produkce odpadu je vztažena na celkový počet lůžek. Hlavním producentem je krajská nemocnice A s celkovým počtem lůžek 1100. Zbylé 4 nemocnice mají podstatně nižší lůžkovou kapacitu. Součet lůžek všech 5 nemocnic je roven 1837. Na obr. 6-1 je možné vidět rozmístění producentů zdravotnického odpadu v rámci regionu včetně infrastruktury pro svoz odpadu. Svozová analýza je detailněji řešena v souběžně zpracovávané diplomové práci [43].



Obr. 6-1: Rozmístění nemocnic v rámci modelového regionu [43]

V současné době se v areálu zdravotnického zařízení A nachází zařízení pro likvidaci zdravotnického odpadu spalováním, které je na hranici životnosti. Svou kapacitou je navíc schopno likvidovat pouze vlastní produkci odpadu. Energie odebraná spalinám je využita ve formě syté páry pro částečné krytí spotřeb nemocnice (vytápění, sterilizace) a prádely. Pro krytí zbylých energetických potřeb nemocnice je sytá pára vyráběna v přilehlé plynové kotelně. Zbývá 4 zdravotnická zařízení v současnosti platí externím subjektům za likvidaci produkovaného odpadu a také využívají externích subjektů pro dodávky tepla.

Z těchto důvodů se jeví jako vhodné řešení vybudování moderního zařízení pro termickou likvidaci zdravotnického odpadu, které bude svou kapacitou schopno likvidovat veškerou krajskou produkci zdravotnického odpadu a produkovaná energie bude využita pro potřeby nemocnice. Takovéto zařízení bude možné provozovat minimálně po dobu 20 let.

Zvýšením tepelného výkonu produkované páry dojde k úspoře fosilních paliv, využívaných plynovou kotelnou. Dále budou sníženy svozové vzdálenosti odpadu z okolních nemocnic, čímž dojde ke snížení nákladů nemocnic B-E na svoz odpadu. Poplatky za likvidaci odpadu odváděné nemocnicemi B-E nemocnici A budou stanoveny na základě smluvních podmínek, přičemž dojde ke snížení poplatků odpadu na bráně, jelikož tendencí nemocnice A bude zajištění potřebného množství odpadu pro plné využití kapacity spalovacího zařízení. Poplatky za likvidaci odpadu bude nemocnice A schopna použít jak pro návratnost investice, tak pro částečné pokrytí provozních nákladů a případný servis zařízení.

6.1.2 Charakteristika spalovaného odpadu

Pro modelový region bylo stanoveno dle katalogu odpadů složení zdravotnického odpadu a produkované množství jednotlivých složek. Typ spalovaného odpadu velice ovlivňuje celou technologii likvidace odpadu. Z tohoto důvodu je vhodné uvažovat pouze odpad označený jako nebezpečný. Celková produkce odpadů v jednotlivých zdravotnických zařízeních odpovídá lůžkové kapacitě daného zařízení. V tab. 6-1 jsou vyjádřeny denní produkce i celková roční produkce odpadů typu N (dle Katalogu odpadů viz. tab. 1-1) zdravotnickými zařízeními v modelovém regionu.

Produkce odpadu typu N	A	B	C	D	E	Celkem
Průměrná denní produkce (kg/d)	2 354	537	310	277	367	3 836
Celkem (t/rok)	856	196	113	101	134	1 400

Tab. 6-1: Produkované množství odpadu kategorie N zdravotnickými zařízeními v modelovém regionu

Důležitým parametrem termicky likvidovaného odpadu je jeho elementární složení, jež značně ovlivňuje prvkové složení vznikajících spalin, především pak koncentraci polutantů. Potřebné informace pro stanovení prvkového složení odpadu v modelovém regionu byly stanoveny na základě konzultace s odborníky ze společnosti EVECŮ Brno [42].

V tab. 6-2 je shrnuto prvkové složení odpadu včetně obsahu Cl ve vlhkém vzorku odpadu, který ovlivňuje minimální požadovanou teplotu spalování odpadu. Stanovená hodnota 0,78 %_{hm} Cl tedy určuje minimální teplotu spalování 850 °C.

Elementární složení odpadu				
Prvky	Jednotka	Druh vzorku		
		Hořlavina	Suchý vzorek	Vlhký vzorek
uhlík (C)	% _{hm.}	63,20	57,45	37,92
vodík (H)	% _{hm.}	6,80	6,18	4,08
dusík (N)	% _{hm.}	3,00	2,73	1,80
kyslík (O)	% _{hm.}	25,40	23,09	15,24
síra (S)	% _{hm.}	0,30	0,27	0,18
chlór (Cl)	% _{hm.}	1,30	1,18	0,78
Ostatní				
Obsah vody (H ₂ O)	% _{hm.}	-	-	34,00
Anorganický podíl	% _{hm.}	-	9,09	6,00
Obsah hořlaviny	% _{hm.}	100	90,91	60,00
Celkem	% _{hm.}	100	100	100

Tab. 6-2: Elementární složení spalovaného odpadu

Dalším důležitým parametrem likvidovaného odpadu, který úzce souvisí s elementárním složením odpadu, je jeho výhřevnost, jež byla stanovena na základě výpočtu váženého průměru produkce jednotlivých subtoků a jejich výhřevností. Pro prvkové složení odpadu uvedené v tab. 6-2 byla stanovena výhřevnost 15 MJ/kg. Podrobnější výpočet výhřevnosti je uveden v kapitole 7 souběžně zpracovávané diplomové práce [43].

6.2 Zpracovatelský výkon spalovny ZO

Jedním ze vstupních požadavků je, aby nově vzniklá spalovna kapacitně odpovídala celkové krajské produkci odpadů a byla schopna veškerý produkovaný odpad likvidovat. Z tohoto důvodu byla navrženo zařízení EVO s kapacitou 1,4 kt/rok, což odpovídá při uvažovaném pracovním fondu 7000 h/rok zpracovatelské kapacitě 200 kg/h.

Dalším požadavkem nového spalovacího zařízení je produkce syté páry o tlaku 13 bar_g (195 °C), která bude využita ke krytí spotřeb nemocnice A. Pára bude využita pro vytápění budov nemocnice, k ohřevu teplé vody, v prádelně a také pro sterilizaci. Jelikož produkce odpadů nepokryje veškeré tepelné a provozní nároky nemocnice A, je ve vedlejší budově umístěna plynová kotelna. Kotelna je vybavena dvěma plynovými kotly o výkonu 2 MW a jedním kotlem o výkonu 1,1 MW.

I když je uvažován kontinuální provoz zařízení, jsou ze servisních důvodů potřebné každotýdenní odstávky za účelem čištění teplosměnných ploch kotle (trubek). Dále jsou uvažovány plánované dlouhodobé odstávky jedenkrát ročně na 10 dní z důvodu servisu zařízení, či jiných úprav technologie. Nutné je také počítat s nahodilými odstávkami v případě poruch zařízení neslučitelných s jeho dalším provozem.

6.3 Termická část

Termická část, do které spadá také samotné dávkování likvidovaného odpadu, je podrobněji řešena v diplomové práci [43]. Mezi hlavní aparáty spadá dávkovací zařízení, spalovací komora a také dohořivací komora. Dávkování odpadu a jeho posun během spalovacího procesu jsou zajišťovány hydraulicky ovládaným pohyblivým roštem.

Dávkovací zařízení

Zdravotnický odpad je skladován v kontejnerech o objemu 1000 l, které jsou zaváženy do hydraulicky poháněného zvedáku, tzv. skipu, který vyklopí odpad do dávkovacího palivového kanálu. V dávkovacím palivovém kanálu dojde působením hydraulického šneku k částečné homogenizaci odpadu a následnému vtlačení na pohyblivý rošt spalovací komory. Dávkovací zařízení je opatřeno vlastní hydraulickou stanicí.

Spalovací komora

Na základě požadavku kontinuálního provozu spalovacího zařízení byla upřednostněna roštová spalovací komora, jelikož pyrolýzní pec neumožňuje kontinuální dávkování odpadu, ani kontinuální odvod reziduí. Obě zařízení disponují obdobnou účinností odstranění infekčního zdravotnického odpadu, avšak díky kratší době zdržení odpadu na roštu vykazuje roštová komora vyšší kapacitu při stejných rozměrech než pec pyrolýzní. Vhodnou automatizací provozu roštové pece jsou navíc sníženy požadavky na obsluhu spalovacího zařízení.

Pro zvýšení tepelné odolnosti komory jsou vnitřní strany stěn vybaveny žáruvzdornou vyzdívkou. Z vnější strany je komora vybavena tepelnou izolací a plechovým opláštěním. Uvnitř spalovací komory se nachází pohyblivý posuvný rošt, který se skládá ze statických a pohyblivých roštnic, které se navzájem překrývají. Pohybem posuvných roštnic dochází k přesunu spalovaného odpadu napříč komorou. Z důvodu vysokoteplotního namáhání jsou zvoleny litinové roštnice. Za spalovacím roštem se nachází volný prostor pro výpad nespalitelných zbytků, které jsou shromažďovány v popelových kontejnerech umístěných pod úroveň spalovací komory. Pro zapálení odpadu a stabilizaci spalovací teploty je spalovací komora osazena plynovým hořákem na zemní plyn, který se nachází na protějším čele dávkovacího kanálu odpadu. Proces hoření zajišťuje především řízená dodávka primárního spalovacího vzduchu, který je přiváděn do komory ze spodní části roštu. Funkci sekundárního vzduchu zastává recykl spalín, čímž se zvyšuje účinnost procesu a dochází ke snížení emisí znečišťujících látek.

Dohořivací komora

Spaliny uvolněné ve spalovací komoře následně proudí do dohořivací komory, kde dochází k dopálení těkavých složek spalín při požadované teplotě 850 °C při koncentraci chlóru pod 1 %_{hm.}, respektive 1100 °C při koncentraci Cl vyšší než 1 %_{hm.}. Dopalovací komora je tvořena ocelovým pláštěm, který je z vnější strany opatřen tepelnou izolací a plechovým opláštěním. Pro zvýšení tepelné odolnosti dohořivací komory je vnitřní část komory vyložena žáruvzdornou vyzdívkou. Pro udržení požadované spalovací teploty je na čele komory proti pohyblivému

roštu instalován plynový hořák spalující zemní plyn. Doba zdržení spalin je 2 s v souladu s legislativou. Rozměry komory jsou stanoveny na základě bilančních výpočtů viz [43].

6.4 Utilizace tepla

Horké spaliny odcházejí spalinovodem z dohořivací komory a vstupují do sekce výměny tepla, kde dochází k předání energie ve formě tepla horké vodě. Výměna tepla probíhá přes teplosměnné plochy žárotrubného kotle. Odebrané teplo slouží k výrobě syté páry, která je dále využita v provozu zdravotnického zařízení A.

Parní kotel

Pro utilizaci tepla a výrobu páry je v technologii využito žárotrubného kotle, který je v třítahovém provedení. Spaliny vystupují z dohořivací komory přibližně při teplotě 900 °C a vstupují do kotle, kde předávají teplo vodě, čímž je produkována sytá pára o teplotě 195 °C (13 bar_g). Vyrobená pára je odváděna do rozdělovače a následně využita pro provoz nemocnice A. Spaliny vystupují z kotle o teplotě 240 °C. Pro zásobování kotle napájecí vodou je využito předehřáté procesní vody o teplotě 105 °C, která je dopravována pomocí napájecích čerpadel z ekonomizéru.

Jelikož je ve vznikajících spalinách vysoká koncentrace TZL, může docházet k usazování (zanášení) pevných částic v trubkách kotle a snižování účinnosti tepelné výměny. Z tohoto důvodu je pro snadné čištění kotel otevíratelný. Dle zkušeností je nutné provádět každotýdenní čištění, proto je počítáno s pravidelnými odstávkami technologie jednou týdně.

Ekonomizér

Spaliny vystupující z prvního stupně čištění spalin putují do ekonomizéru sloužícího k předehřevu napájecí vody parního kotle. Výměník je konstruován jako vodotrubný, ve vertikálním uspořádání, s křížovým tokem spalin. Napájecí voda kotle vystupuje z ekonomizéru o teplotě 105 °C a tlaku 13 bar_g. Výměnou tepla mezi spalinami a vodou dojde ke snížení teploty spalin na teplotu 140 °C.

7 Technologický návrh systémů čištění spalin

Pro zajištění splnění legislativou stanovených koncentrací znečišťujících látek byly vytvořeny dva koncepční návrhy systémů čištění spalin na základě stanovených vstupních parametrů. V této kapitole jsou specifikovány jednotlivé vstupní parametry spalin i spalovaného odpadu. Dále jsou popsány navržené technologické systémy čištění spalin včetně pomocných aparátů.

7.1 Vstupní data a ovlivňující parametry návrhu

Na základě výhřevnosti a složení odpadu byla provedena materiálová a energetická bilance spalovacího procesu, která určila množství a složení spalin vystupujících z parního kotle. Parametry spalin slouží především k návrhu systému čištění spalin na míru danému zařízení. Zbylé návrhové hodnoty pro systém čištění spalin byly zvoleny dle provozních zkušeností z obdobných zařízení pro termickou likvidaci zdravotnického odpadu. Při volbě návrhových hodnot bylo počítáno s dostatečnou rezervou tak, aby respektovaly provozní režimy jednotlivých zařízení.

Provozní teplota spalin za kotlem je volena v závislosti na zvolené technologii čištění spalin tak, aby došlo ke snížení energetické náročnosti vlivem minimalizace zpětných ohřevů. Teplota také koresponduje s provozními podmínkami pro dávkování sorbentu NaHCO_3 . Pro využití zbytkového tepla spalin je v technologii zařazen ekonomizér, který také zajišťuje potřebné snížení teploty spalin pro následné dávkování aktivního uhlí.

Díky konzultacím s odborníky ze společnosti EVECO Brno [42], byly získány informace ohledně nejmodernější spalovny zdravotnického odpadu, kterou tato společnost realizovala v areálu Fakultní nemocnice v Hradci Králové. Na základě těchto konzultací byly stanoveny vstupní koncentrace znečišťujících látek ve spalinách vstupujících do systému čištění spalin.

Výstupní koncentrace byly voleny s respektováním požadavků na splnění emisních limitů specifikovaných v tab. 4-1. Jednotlivé vstupní a výstupní parametry technologie čištění spalin jsou specifikovány v tab. 7-1. Je nutné podotknout, že není specifikována vstupní a výstupní koncentrace těžkých kovů, jelikož tyto hodnoty nelze přesně kvantifikovat. Proto je aktivní uhlí dávkováno s jistým přebytkem, aby byly zachyceny koncentrační špičky.

Specifikace zadávacích parametrů technologie čištění spalin		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplota spalin na vstupu do systému čištění spalin	240	°C
Průtok vlhkých spalin na vstupu do systému čištění spalin	2502	mN^3/h
Průtok suchých spalin na vstupu do systému čištění spalin	2227	mN^3/h
Množství TZL a NaHCO_3 odloučeno na filtru	8309	mg/mN^3
Dávkované množství aktivního uhlí (AU)	150,0	mg/mN^3
Uvažovaná koncentrace popílku za filtrem	< 2,0	mg/mN^3

Koncentrace polutantů ve spalinách				
Veličina	Vstup		Výstup (suché)	Jednotka
	vlhké	suché		
Koncentrace TZL	-	4500	2	mg/m _N ³
Koncentrace SO ₂	600	674,2	25	mg/m _N ³
Koncentrace HCl	500	562	4	mg/m _N ³
Koncentrace HF	40	45	0,6	mg/m _N ³
Koncentrace NO _x	500	562	80	mg/m _N ³
Koncentrace PCDD/F	-	10	< 0,01	ng TEQ/m _N ³

Tab. 7-1: Souhrn vstupních a výstupních parametrů pro systém čištění spalin

Uvažované vstupní koncentrace byly korigovány nejistotou výskytu koncentračních špiček způsobených proměnlivým složením vstupního paliva. V praxi se spotřeby sorbentů ladí během zkušebního provozu. Provozní hodnoty tak bývají nižší než návrhové.

7.2 Koncepční řešení systému čištění spalin

Pro účinné snížení koncentrací znečišťujících látek obsažených ve spalinách vznikajících při termickém zpracování zdravotnického odpadu a dosažení tak požadovaných výstupních koncentrací byly vytvořeny dvě moderní koncepce systému čištění spalin viz. příloha č. 1. Aparátová skladba a technické řešení byly navrženy na základě konzultací a provozních zkušeností společnosti EVECO Brno s.r.o. [42]. Při návrhu byl brán ohled také na referenční dokument BREF/BAT.

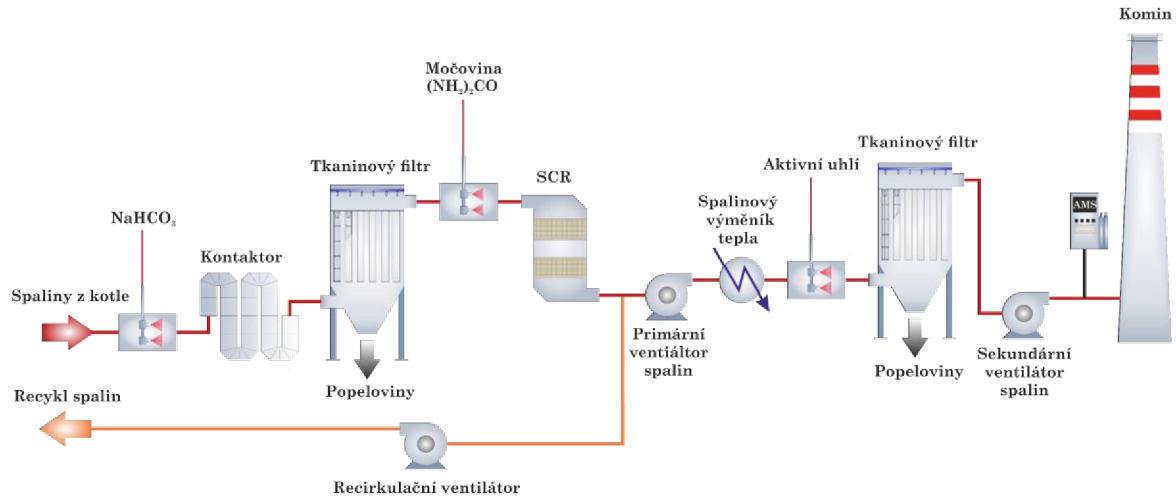
Varianta č. 1

Navržená varianta č. 1 systému čištění spalin využívá suchou sorpci dávkováním (NaHCO₃), selektivní katalytickou redukcí (SCR) oxidů dusíku (NO_x) na katalyzátoru s využitím vodného roztoku močoviny ((NH₂)₂CO) a dávkování uhlíkatého sorbentu (aktivní uhlí) pro adsorpci těžkých kovů a PCDD/F. Pro záchyt TZL včetně sorbentů je využita dvojice tkaninových filtrů. Obr. 7-1 zobrazuje aparátovou skladbu varianty č. 1.

V prvním stupni čištění spalin je k neutralizaci kyselých složek spalin využito suché sorpce. Do proudu spalin, které vystupují z parního kotle o teplotě 240 °C, je dávkován jemně mletý sorbent NaHCO₃. Samotný sorbent je uchováván v big-bagu, který je umístěn ve vyprazdňovací stanici, jež je vybavena výsypkou. Z výsypky je sorbent dopravován šnekovým dopravníkem do dávkovacího zařízení. Dávkování sorbentu je řešeno pomocí pneumatické dopravy a dávkovacích trysek, které jsou zaústěny do spalinovodu.

Pro lepší stupeň promísení sorbentu a delší dobu zdržení (kontaktu) se spalinami je využito tzv. kontaktoru, který je proveden jako potrubní had, jehož využitím dojde ke zvýšení účinnosti záchytu kyselých složek (SO₂, HCl a HF). Dávkováním sorbentu se zvyšuje koncentrace TZL ve spalinách a následně je sorbent společně s popílkem zachytáván na tkaninovém filtru. Na povrchu rukávců dochází k finálnímu dočištění průchodem přes filtrační

koláč, který je oklepáván z povrchu rukávců pulzem tlakového vzduchu „pulse jet“. Popílek a zreagovaný sorbent je zachytáván ve výsypce filtru odkud propadáva přes dvojklapku do skladovacího big-bagu.



Obr. 7-1: Grafické znázornění aparátové skladby navržené varianty č. 1

Dávkové množství sorbentu je řízeno na základě výstupní koncentrace kyselých složek pro dosažení emisních limitů s dostatečnou rezervou. Účinnost suché metody závisí na dávkovaném množství sorbentu.

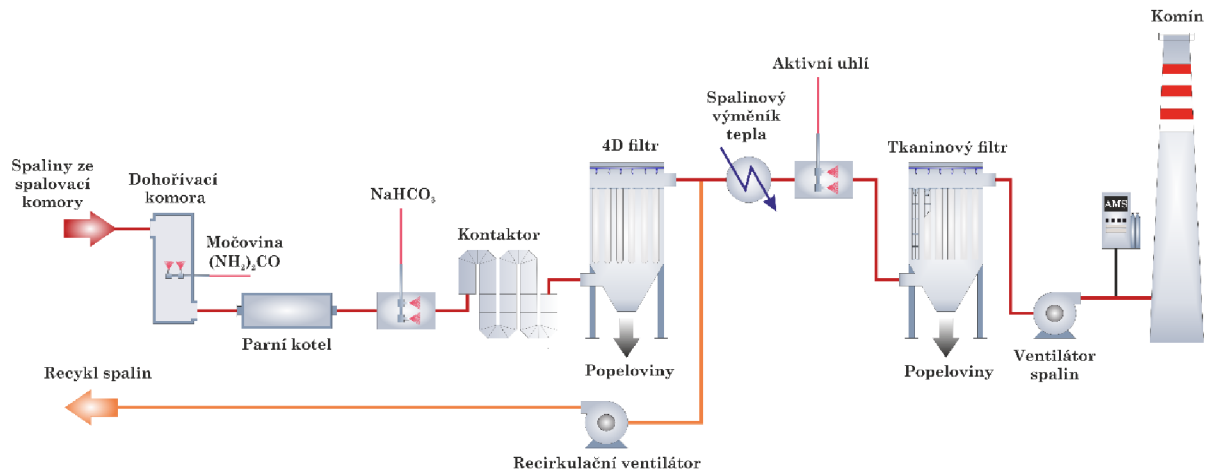
Za primárním tkaninovým filtrem je do proudu spalin dávkován reagent ve formě 40 % vodného roztoku močoviny. Ta je skladována v IBC kontejneru, odkud je dopravována pomocí dávkovacího čerpadla do vstřikovacího kopí. Tryskami dochází k rovnoměrnému rozstříku kapek do proudu spalin. Injektáž močoviny je prováděna z důvodu následné katalytické reakce spalin a reagentu průchodem přes katalyzátor. Samotný reaktor je tvořen 2 vrstvami katalyzátoru typu honeycomb.

Část spalin vycházejících z reaktoru je odtahována recyklem zpět do spalovací komory, kde podporuje proces spalování. Pro odtah části spalin je využito recirkulačního ventilátoru. Zbylé spaliny jsou odtahovány primárním ventilátorem spalin, jenž slouží pro pokrytí tlakových ztrát na spalinové cestě. Následně spaliny vstupují do tepelného výměníku (ekonomizéru), který slouží především pro odebrání zbytkového tepla spalin. Za pomoci zbytkového tepla spalin je předehřívána procesní voda, která je využita v parním kotli pro výrobu páry. Výstupní teplota vody z ekonomizéru je 105 °C při tlaku 13 bar_g.

Dále je do proudu spalin dávkován uhlíkatý sorbent ve formě aktivního uhlí pro adsorpci těžkých kovů a PCDD/F látek. Dávkování probíhá pneumaticky skrze trysky zasunuté do spalinovodu. Směs sorbentu a jím zachycených látek je odstraňována sekundárním tkaninovým filtrem, který je vybaven rukávcí stejných rozměrů jako primární filtr. Liší se však menší filtrační plochou a menším počtem rukávců. Pro pokrytí tlakových ztrát spalin, vznikajících průchodem přes tkaninový filtr a ekonomizér, je využito sekundárního spalinového ventilátoru. Pro měření výsledných koncentrací znečišťujících látek ve spalinách je před vypuštěním spalin komínem do ovzduší zařazen emisní monitoring.

Varianta č. 2

Obdobně jako v případě varianty č. 1 využívá druhá navrhovaná varianta suché sorpce prostřednictvím NaHCO_3 . Funkci katalyzátoru a primárního tkaninového filtru zastává 4D filtr vybavený keramickými elementy společnosti Clear-Edge, případně katalyticko-filtrační systém DeNOx společnosti GORE. Dále je využito dávkování uhlíkatého sorbentu ve formě aktivního uhlí, který je odstraňován spolu se zachycenými těžkými kovy a PCDD/F na tkaninovém filtru. Obr. 7-2 zobrazuje aparátovou skladbu varianty č. 2.



Obr. 7-2: Grafické znázornění aparátové skladby navržené varianty č. 2

Nejprve je do prostoru spalovací komory rozstříknut reagent ve formě 40 % vodného roztoku močoviny pomocí vstřikovacího kopí s tryskou, čímž je zaručena rovnoměrná disperze kapek reagentu. Vysoká teplota spalin ($900 - 950 \text{ }^\circ\text{C}$) zajistí částečnou ne-katalytickou redukci NO_x (SNCR).

Obdobně jako v případě varianty č. 1 jsou neutralizovány kyselé složky spalin suchou sorpcí, kdy je do spalin dávkován sorbent NaHCO_3 . Dávkování je prováděno pneumaticky pomocí speciálně navržených trysek. Následuje kontaktor sloužící k lepšímu promísení a delší době kontaktu spalin a sorbentu, který je koncepčně identický, jako v navrhované variantě č. 1.

Tím vzniknou spalinové soli vzniklé neutralizací, popílek, nezreagovaný sorbent a reagent, které jsou přiváděny na filtrační elementy 4D filtru. Elementy jsou vyrobeny z porézní keramiky s implementovaným katalyzátorem. Na 4D filtru tak dojde ke kombinovanému účinku zachycení TZL, odsíření, rozkladu látek PCDD/F včetně těkavých uhlovodíků a katalytické redukci NO_x . Pomocí pulzu tlakového vzduchu (pulse jet) jsou filtrační elementy oklepávány a popílek spolu se zreagovaným sorbentem je jímán ve výsypce filtru, odkud propadává přes dvojklopku do skladovacího big-bagu. Alternativním řešením k 4D filtru je využití katalyticko-filtračního systému DeNOx, který je tvořen dvouvrstevnými tkaninovými rukávci s implementovaným katalyzátorem umístěnými na opěrných koších.

Pro zvýšení efektivity procesu spalování a snížení obsahu znečišťujících látek je využito recyklu spalin. Spaliny za filtrem jsou prostřednictvím recirkulačního ventilátoru vháněny zpět

do spalovacího prostoru nad rošt. Následně dochází ke snížení teploty spalin v ekonomizéru, který předává tepelnou energii napájecí vodě zásobující parní kotel.

Snížením teploty spalin v ekonomizéru je dosaženo vhodných provozních podmínek pro dávkování sorbentu (aktivního uhlí), který v procesu slouží k adsorpci PCDD/F a těžkých kovů. Sorbent je dávkován do spalinovodu pomocí trysky, kde díky svému velkému specifickému povrchu adsorbuje PCDD/F a také těžké kovy obsažené ve spalinách. Následně je směs spalin a sorbentu přiváděna na tkaninový filtr, kde dochází k odloučení částic aktivního uhlí obsahující znečišťující látky na povrchu rukávceů.

Požadovaný podtlak ve spalovací komoře a tlakové ztráty vznikající zařazením místních odporů a ztrát potrubí jsou kompenzovány zařazením spalinového ventilátoru. Obdobně jako v případě varianty č. 1 je navrhovaný systém čištění spalin vybaven emisním monitoringem, který zajišťuje kontrolu koncentrací znečišťujících látek a na základě kterého jsou řízena množství sorbentu dávkovaných do spalin.

8 Materiálová a energetická bilance

Pro materiálovou bilanci technologie termické likvidace zdravotnického odpadu bylo využito modelovacího a simulačního programu W2E (Waste to Energy), který byl doplněn výpočty v programu MS Excel. Pomocí těchto programů byly na základě stanovených vstupních parametrů bilancovány jak spalovací komora, spalínový parní kotel, tak systém čištění spalin. Vzhledem k rozsahu a složitosti návrhu technologie energetického využití zdravotnického odpadu jako celku bylo přistoupeno k rozdělení prací na termickou a utilizační část (detailněji řešenou v souběžně zpracované diplomové práci [43]) a dále na technologii čištění spalin, kterou se zabývá tato práce. Proto je v rámci této práce detailně zpracována bilance technologie čištění spalin.

8.1 Vstupní parametry pro bilancování procesu

V prvním kroku je nezbytné stanovení vstupních parametrů a okrajových podmínek pro následné bilancování procesu. V níže uvedené tab. 8-1 jsou shrnuty jednotlivé vstupní parametry, které slouží pro materiálovou a energetickou bilanci systému čištění spalin. Výhřevnost odpadu byla stanovena na základě jeho složení, které je uvedeno v tab. 6-2. V rámci technologie je uvažováno s 20 % recyklem spalin, který zastupuje funkci sekundárního spalovacího vzduchu (pozitivní vliv na redukci emisí NO_x). Nezbytnou součástí procesu je stabilizační hořák na zemní plyn, který slouží k udržení potřebné spalovací teploty. Sytá pára vystupuje z kotle o teplotě 195 °C a slouží primárně pro provoz zařízení v rámci nemocnice, přičemž není uvažováno s využitím části proudu páry pro předehřev napájecí vody.

Vstupní parametry pro bilancování procesu			
	Veličina	Hodnota	Jednotka
Všeobecné	Množství odpadu	1400	t/rok
	Fond pracovní doby	7000	h/rok
	Zpracovatelský výkon jednotky	200	kg/h
Odpad	Teplota	20	°C
	Výhřevnost (LHV)	15	MJ/kg
	Měrné teplo	2	kJ/kg*K
Spalovací vzduch	Teplota	25	°C
	Množství spal. vzduchu	1603	m _N ³ /h
	Měrná entalpie spal. vzduchu	32,4	kJ/m _N ³
Sekundární palivo (zemní plyn)	Spotřeba	13	m _N ³ /h
	Teplota vzduchu pro ZP	25	°C
	Přebytek vzduchu	1,1	-

Parní kotel	Teplota páry	195,1	°C
	Tlak páry	14	bar _a
	Měrná entalpie páry	2789	kJ/kg
	Teplota spalin z parního kotle	240	°C
	Teplota napájecí vody	105	°C
	Měrná entalpie napájecí vody	441,2	kJ/kg
	Odluh, odkal	2,5	%
Tuhé zbytky	Teplota	200	°C
	Měrná entalpie tuhých zbytků	0,9	kJ/(kg*K)

Tab. 8-1: Vstupní parametry bilančního výpočtu

Při provozu zařízení k energetickému využití zdravotnických odpadů dochází jako i u jiných energetických zařízení k tepelným a tlakovým ztrátám. Tepelné ztráty, vznikající sáláním tepla jednotlivých aparátů a spalinových cest nebyly zahrnuty do materiálové ani energetické bilance procesu, jelikož je uvažováno s maximálními provozními stavy.

Tlakové ztráty uvedené v tab. 8-2 byly stanoveny na základě konzultací s odborníky společnosti EVECO Brno a s ohledem na konstrukční provedení jednotlivých aparátů. V případě SCR reaktoru, 4D filtru a katalytického filtru DeNO_x byly tlakové ztráty stanoveny na základě nabídek od výrobců daných technologií.

Tlakové ztráty jednotlivých aparátů			
Aparát	Varianta č.1	Varianta č. 2	Jednotka
	Hodnota	Hodnota	
Spalovací komora	0,5	0,5	kPa
Parní kotel	1,5	1,5	kPa
Kontaktor	0,5	0,5	kPa
Tkaninový filtr I.	1,8	-	kPa
4D filtr/katalytický filtr	-	2,2 ¹⁰ /1,5 ¹¹	kPa
SCR	0,7 ¹²	-	kPa
Ekonomizér	0,3	0,3	kPa
Tkaninový filtr II.	1,8	1,8	kPa

Tab. 8-2: Tlakové ztráty jednotlivých zařízení

¹⁰ Hodnota stanovena na základě nabídky společnosti Clear-Edge [43]

¹¹ Hodnota stanovena na základě nabídky společnosti Gore [44]

¹² Hodnota stanovena dle nabídky společnosti IBIDEN Ceram [45]

Dále byly brány v úvahu také možné netěsnosti jednotlivých aparátů a samotných spalinových cest, čímž dochází ke zvyšování množství spalin přísáváním falešného vzduchu (negativní dopad na zvýšení spotřeby el. energie). V níže uvedené tab. 8-3 jsou shrnuty hodnoty přísávání falešného vzduchu, které jsou vyjádřeny jako procentuální podíl z celkového průtoku spalin.

Přísávání falešného vzduchu			
Aparát	Varianta č. 1	Varianta č. 2	Jednotka
	Hodnota	Hodnota	
Spalovací komora	3,3	3,3	%
Tkaninový filtr	1,6	-	%
4D/katalytický filtr	-	1,6	%
SCR reaktor	1,0	-	%
Tkaninový filtr	1,4	1,4	%

Tab. 8-3: Přísávání falešného vzduchu na trase spalin

8.2 Materiálové bilance navrhovaných variant

Pro detailní materiálovou bilanci navrhovaných variant systému čištění spalin byly vytvořeny bilanční modely v programu W2E (Příloha č. 2), které byly doplněny o pomocné výpočty v programu MS Excel. Pro lepší přehlednost bilancí byla vytvořena grafická bilanční schémata obou variantních řešení systému čištění spalin (Příloha č. 3).

8.2.1 Bilance navrhované varianty č.1

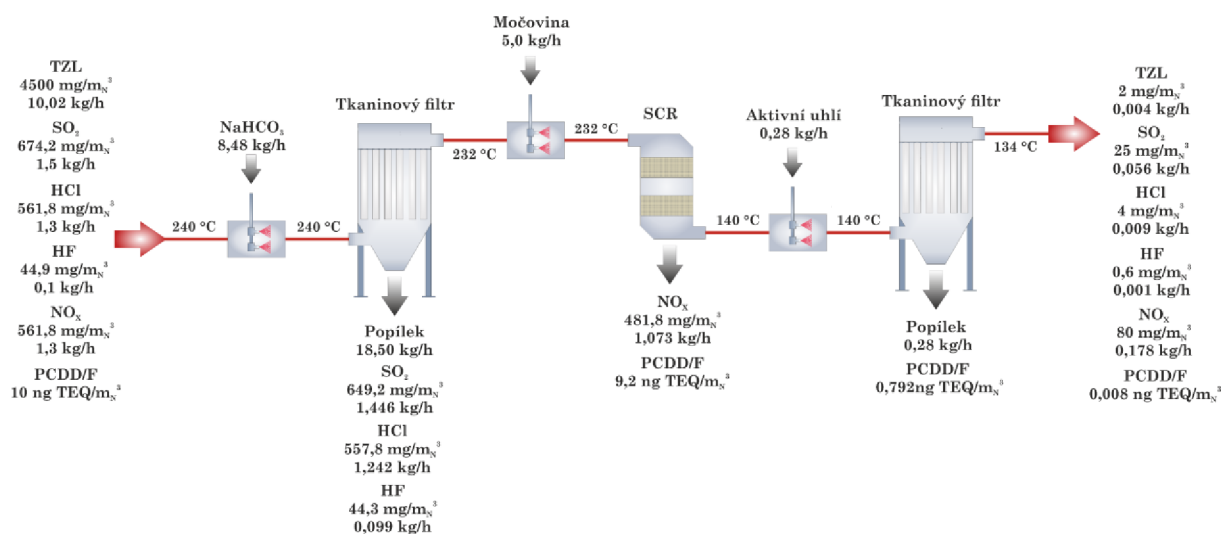
Koncepční řešení varianty č. 1 je detailně popsáno v kapitole 7.2. Pro vytvoření bilančního modelu bylo nezbytné nejprve specifikovat potřebné vstupní předpoklady. Ty jsou shrnuty v níže uvedené tab. 8-4.

Předpoklady pro materiálovou bilanci varianty č. 1		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Suchá sorpce NaHCO₃		
Přebytek sorbentu NaHCO ₃	1,2	-
Účinnost odstranění SO ₂	96,3	%
Účinnost odstranění HCl	99,3	%
Účinnost odstranění HF	98,7	%

Primární tkaninový filtr		
Předpokládaná výstupní koncentrace TZL	<2	mg/m ³
Účinnost filtrace na základě vstupní a výstupní koncentrace TZL	99,95	%
Nezreagovaný sorbent a vzniklé soli odloučeny na filtru společně s TZL		
SCR		
Požadovaná výstupní koncentrace	80	mg/m ³
Účinnost redukce PCDD/F v SCR volena v rozmezí (85-95 %)	92	%
Účinnost redukce NO _x na základě vstupní a výstupní koncentrace	85,8	%
Stechiometrický přebytek močoviny	1,2	-
Adsorpce		
Účinnost záchytu PCDD/F volena z rozmezí 95-99 %	99	%
Dávkování aktivního uhlí	150	mg/m ³
Sekundární tkaninový filtr		
Předpokládaná výstupní koncentrace	<2	mg/m ³
Účinnost filtrace na základě vstupní a výstupní koncentrace TZL	98,7	%

Tab. 8-4: Předpoklady materiálové bilance varianty č. 1

Na základě předpokladů a požadovaných vstupních a výstupních koncentrací znečišťujících látek ve spalinách byla bilančními výpočty stanovena potřebná množství sorbentů a reagentu, stejně jako odloučené koncentrace jednotlivých znečišťujících látek v daných aparátech. Obr. 8-1 zobrazuje materiálovou bilanci návrhové varianty č. 1. Veškeré koncentrace znečišťujících látek jsou vztaženy na suché spaliny.



Obr. 8-1: Materiálová bilance varianty č. 1

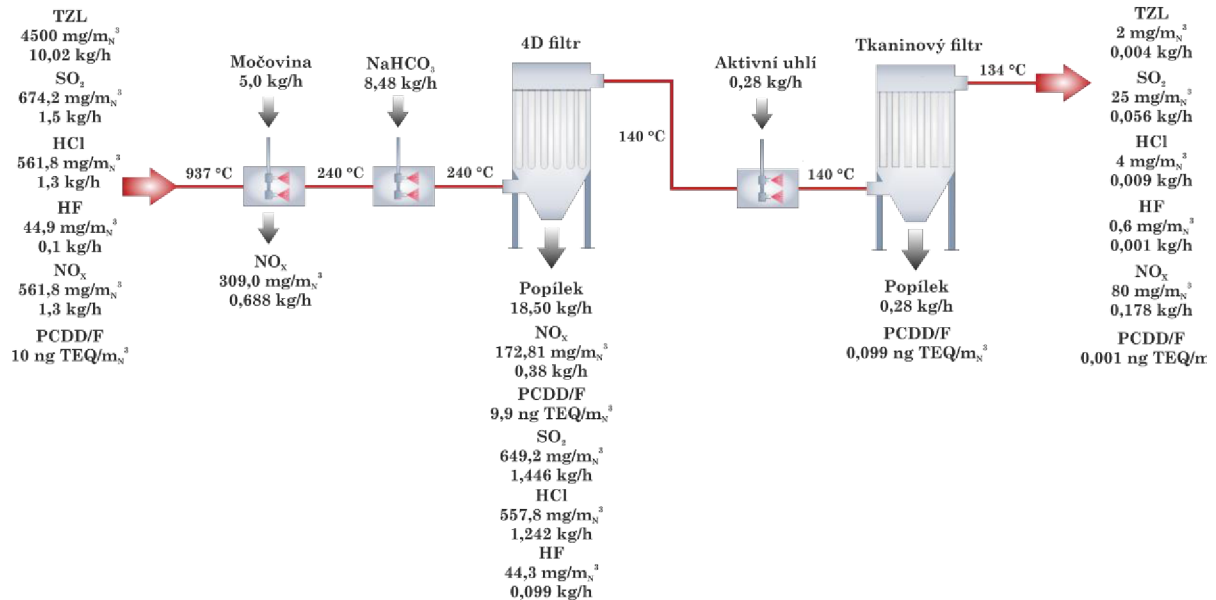
8.2.2 Bilance navrhované varianty č.2

Technologický popis navrhované varianty č. 2 je detailněji popsán v kapitole 7.2. Stejně jako v případě varianty č. 1. byly stanoveny vstupní předpoklady, viz. tab. 8-5, na základě kterých bylo možné bilancovat navrhovanou variantu č. 2.

Předpoklady pro materiálovou bilanci varianty č. 2		
Charakteristika	Hodnota	Jednotka
SCNR		
Stechiometrický přebytek močoviny	1,2	-
Teplota spalin	937	°C
Účinnost snížení koncentrace NO _x	55	%
Suchá sorpce NaHCO₃		
Účinnost odstranění SO ₂	96,3	%
Účinnost odstranění HCl	99,3	%
Účinnost odstranění HF	98,7	%
4D filtr		
Předpokládaná výstupní koncentrace TZL	< 2	mg/mN ³
Účinnost filtrace na základě vstupní a výstupní koncentrace TZL	99,95	%
Nezreagovaný sorbent a vzniklé soli odloučeny na filtru společně s TZL		
Požadovaná výstupní koncentrace NO _x	80	mg/mN ³
Účinnost redukce PCDD/F v SCR volena v rozmezí (85-95 %)	92	%
Účinnost redukce NO _x na základě vstupní a výstupní koncentrace	31	%
Stechiometrický přebytek močoviny	1,2	-
Adsorpce		
Účinnost záchytu PCDD/F volena z rozmezí 95-99 %	99	%
Dávkování aktivního uhlí	150	mg/mN ³
Tkaninový filtr		
Předpokládaná výstupní koncentrace	<2	mg/mN ³
Účinnost filtrace na základě vstupní a výstupní koncentrace TZL	98,68	%
Nezreagovaný sorbent, aktivní uhlí obsahující těžké kovy a PCDD/F jsou odloučeny na filtru		

Tab. 8-5: Předpoklady materiálové bilance varianty č. 2

Výsledky materiálové bilance varianty č. 2 jsou uvedeny na obr. 8-2. V rámci této varianty byla provedena bilance pouze pro případ využití 4D filtru, neboť u varianty obsahující DeNOx filtr je uvažováno s dosažením stejných výstupních koncentrací znečišťujících látek.



Obr. 8-2: Materiálová bilance varianty č. 2

Výstupy z materiálových bilancí byly následně využity k technologickému návrhu hlavních aparátů variantních systémů čištění spalin.

8.3 Technologický návrh hlavních aparátů systému čištění spalin

Kromě koncepčního návrhu systému čištění spalin je nutné vhodně navrhnout hlavní aparáty pro dosažení účinného odstranění znečišťujících látek. V této kapitole jsou specifikovány rozměrové a provozní parametry hlavních aparátů. Dále jsou ve stručnosti popsány a specifikovány doplňkové aparáty.

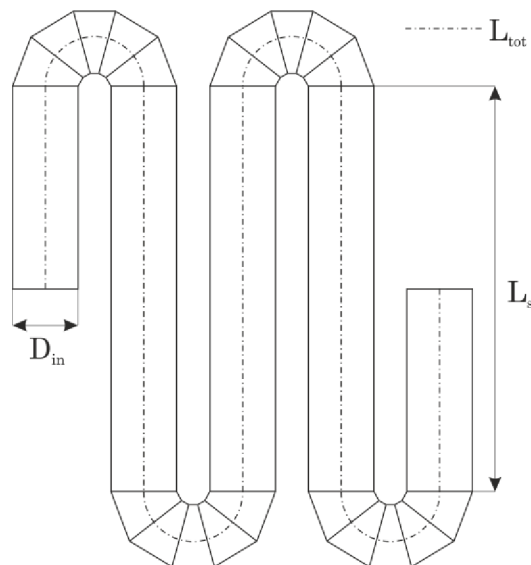
8.3.1 Specifikace hlavních aparátů varianty č. 1

V rámci uvažované varianty č.1 byl proveden rozměrový návrh hlavních aparátů, mezi které se řadí kontaktor, primární a sekundární tkaninový filtr a SCR reaktor.

Kontaktor

Pro účinné promísení dávkovaného sorbentu se spalinami je využito funkce potrubního kontaktoru, viz. obr. 8-3, který zajistí prodloužení reakční doby mezi sorbentem a spalinami. Na základě obecných zvyklostí byla zvolena rychlost proudění spalin 18 m/s, podle které byl stanoven minimální průměr potrubí pro zajištění doby zdržení 2 s. Posléze byl vybrán nejbližší větší normalizovaný rozměr DN350, který slouží pro stanovení skutečné rychlosti proudění. Na základě rychlosti je stanovena celková délka potrubí $L_{tot} = 30$ m. Ta při daném průřezu potrubí

zaručuje dobu zdržení směsi spalin a sorbentu v kontaktoru 2,23 s. Jednotlivé vypočtené rozměry kontaktoru jsou shrnuty v tab. 8-6.



Obr. 8-3: Náčrt potrubního kontaktoru

Návrhový výpočet kontaktoru		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Množství vlhkých spalin na vstupu	2502	m ³ /h
Teplota spalin na vstupu	240	°C
Tlak spalin na vstupu	97,1	kPa
Reálný průtok suchých spalin	4906	m ³ /h
Rychlost spalin	1,36	m ³ /s
Zvolená rychlost spalin ve spalinovodu	18,0	m/s
Požadovaná doba zdržení	2,0	s
Průměr spalinovodu	310,5	mm
Zvolený průměr - D _{in}	359 ¹³	mm
Skutečná rychlost spalin	13,46	m/s
Požadovaná délka potrubí	26,9	m
Zvolená délka potrubí - L _{tot}	30	m
Plocha průřezu	0,10	m ²
Objem kontaktoru	3,04	m ³
Skutečná doba zdržení	2,23	s
Délka rovné části potrubí - L _s	3500	m

Tab. 8-6: Návrhové rozměry potrubního kontaktoru

¹³ Vnitřní průměr normalizovaného potrubí DN350

Tkaninové filtry

V prvním stupni čištění je využito k zachycení dávkovaného sorbentu a TZL primárního tkaninového filtru, jehož rukávce jsou vyrobeny z polytetrafluorethylenu (PTFE). S ohledem na vstupní parametry spalin byla stanovena potřebná filtrační plocha, resp. počet rukávců, do kterého je zahrnuta také 5 % rezerva pro zajištění účinného zachycení pevných částic. Celkem je primární filtr osazen 80 ks rukávců a v areálu spalovny zaujímá půdorysnou plochu 6,19 m². V níže uvedené tab. 8-7 jsou shrnuty jednotlivé parametry primárního tkaninového filtru.

Pro zachycení aktivního uhlí obsahujícího adsorbované těžké kovy a PCDD/F je navržen sekundární tkaninový filtr. Jednotlivé rukávce jsou rozměrově i materiálově totožné, stejně jako u primárního filtru. Jelikož je část spalin odebrána recyklem a teplota spalin je snížena v ekonomizéru na 140 °C, je menší také skutečný průtok suchých spalin (3308 m³/h). Na základě průtoku byla zvolena filtrační plocha 66,9 m², která odpovídá 56 rukávcům. Sekundární filtr zaujímá plochu 4,5 m². V tab. 8-7 jsou shrnuty jednotlivé parametry filtru. Maximální zatížení filtru je dle obecné zvyklosti a know-how voleno v rozmezí 0,9 - 1,1 m/min [10]. Jelikož jsou rukávce obou filtrů z totožného materiálu, je pro výpočet zvoleno maximální zatížení filtru 1 m/min.

Návrhový výpočet tkaninových filtrů			
Veličina	I. TF	II. TF	Jednotka
	Hodnota		
Průtok vlhkých spalin na vstupu do filtru	2 502	2090	m ³ /h
Průtok suchých spalin na vstupu do filtru (skutečné)	4998	3278	m ³ /h
Skutečný objemový průtok	1,4	0,9	m ³ /s
Maximální zatížení filtru	1	1	m/min
Minimální potřebná filtrační plocha	83,3	54,6	m ²
Zvolená filtrační plocha	84,0	57,0	m ²
Rozměry filtračního rukávce			
Délka	2500	2500	mm
Průměr	152	152	mm
Počet rukávců na filtrační plochu	70,36	48	ks
Počet rukávců vč. rezervy	76	54	ks
Zvolený počet rukávců v komoře	80	56	ks
Filtrační plocha zvoleného počtu rukávců	95,5	66,9	m ²
Filtrační rychlost	0,87	0,82	m ³ /(m ² *min)
Rozměrový návrh filtru			
Počet rukávců v řadě	10	8	ks
Počet řad	8	7	ks
Rozteč mezi rukávci	0,25	0,25	m

Rozteč mezi řadou	0,25	0,25	m
Délka řady	2,75	2,25	m
Šířka řady	2,25	2	m
Plocha filtrační komory	6,2	4,5	m²
Výška filtrační komory	2700	2700	mm
Výška výsypky	2000	2000	mm
Plocha pláště filtru	45,0	37,1	m²

Tab. 8-7: Rozměrový návrh tkaninových filtrů varianty č. 1

SCR – Reaktor

V uvažované variantě č. 1 je pro účely redukce NO_x zařazena technologie SCR obsahující katalyzátor ve formě voštinových bloků, tzv. honeycomb od společnosti CERAM [44]. Do spalin o teplotě 240 °C je vstřikován vodný roztok 40 % močoviny a dochází tak ke katalytické redukci NO_x průchodem směsi spalin a reagentu přes dvě patra katalyzátoru.

Pro návrh SCR reaktoru bylo využito postupu dle diplomové práce Ing. Krejčího [45]. Výpočet byl proveden na základě následujících předpokladů:

- Oxidy dusíku jsou pro výpočet vyjádřeny jako NO, který je majoritní složkou NO_x
- K reakci dochází v uzavřeném systému bez produkce meziproductů a dalších reakcí.

V prvním kroku je určena reakční rychlost r_{NO} reakce mezi NO a močovinou dle rovnice (8.1),

$$r_{NO} = k \cdot c_{NO} = k \cdot c_{NO}^0 \cdot (1 - x_{NO}) \quad (8.1)$$

kde

k – rychlostní konstanta [mol/(m*s)]

c_{NO}^0 – koncentrace NO [mol/m³]

x_{NO} – stupeň konverze NO [-]

SCR reaktor je počítán dle rovnice odstranění NO v zidealizovaném modelu trubkového reaktoru s pístovým tokem a předpokládaným promícháním v radiálním směru, ze kterého je získána bilanční rovnice (8.2),

$$\frac{r_{NO}}{c_{NO}^0} = \frac{dx_{NO}}{d\left(\frac{S}{F}\right)} \quad (8.2)$$

kde

S – celkový povrch katalyzátoru [m²]

F – průtok spalin [m³/h]

V posledním kroku je stanoven potřebný objem katalyzátoru. Na základě zvoleného stupně konverze je dle rovnice (8.3) určena rychlostní konstanta k . Z té je dle rovnice (8.4)

stanoven povrch katalyzátoru, který slouží ke stanovení objemu katalyzátoru dle rovnice (8.5), kde s_k je měrný povrch katalyzátoru.

$$k = \frac{S}{F} \cdot \ln \frac{1}{1 - x_{NO}} \quad (8.3)$$

$$S = \frac{F}{k} \cdot \ln \frac{1}{1 - x_{NO}} \quad (8.4)$$

$$W = S \cdot s_k \quad (8.5)$$

V níže uvedené tab. 8-8 jsou shrnuty veškeré zadávací parametry výpočtu spolu s navrženými parametry SCR reaktoru. Nově navržený SCR reaktor sestává ze dvou pater katalyzátoru, který tvoří celkem 108 ks voštinových elementů. Reaktor dosahuje výšky 5,4 m při rozměrech průřezu 1,5 x 2,25 m.

Návrhový výpočet SCR reaktoru			
Veličina		Hodnota	Jednotka
Průtok vlhkých spalin na vstupu do reaktoru		2542	m ³ /h
Průtok vlhkých spalin na vstupu do reaktoru (skutečné), F		5062	m ³ /h
Teplota na vstupu do reaktoru		240	°C
Stanovení objemu katalyzátoru pro zařízení			
Vstupní koncentrace NO _x	jako NO ₂	561,8	mg/m ³
	jako NO	274	ppm
		0,0122	mol/m ³
Požadovaná výstupní koncentrace NO _x	jako NO ₂	80	mg/m ³
	jako NO	38,99	ppm
		0,0017	mol/m ³
Stupeň konverze NO, x_{NO}		0,86	-
Rychlostní konstanta, k		11,91	mol.m/h
Měrný povrch katalyzátoru, s _k		790	m ² /m ³
Objem katalyzátoru		1,05	m ³
Rezerva		10	%
Objem katalyzátoru vč. rezervy, W		1,15	m³
Celkový povrch katalyzátoru, S		911,5	m ²
Rozměry voštin			
Průřez voštin		0,15x0,15	m ²
Výška voštin		0,55	m
Počet voštin v bloku (3x3)		9	ks
Rozměrový návrh reaktoru			
Počet pater		2	ks

Plocha katalyzátoru na patře	1,06	m ²
Počet bloků na patře	6,0	ks
Počet voštin na patře	54,0	ks
Počet bloků v řadě	3,0	ks
Počet řad na patře	2,0	ks
Celková plocha katalyzátoru (dle počtu voštin)	2,43	m²
Rozměr patra reaktoru		
Průřez	1,35x0,9	m ²
Výška patra s roštem	0,70	m
Mezera mezi patry	1,00	m
Celková výška reaktoru	3,40	m
Celková šířka reaktoru	1,35	m
Plocha pláště reaktoru	17,73	m²

Tab. 8-8: Návrhové parametry SCR reaktoru

8.3.2 Specifikace hlavních aparátů varianty č. 2

Pro variantu č. 2 byl navržen filtr využívající katalyticko-filtračních rukávců DeNO_x i 4D filtr s porézními keramickými elementy. V rámci navrhované varianty nebyly navrženy kontaktor a sekundární tkaninový filtr, jelikož tyto aparáty jsou svými parametry totožné jako v navrhované variantě č. 1.

Pro posouzení vhodných možností řešení bloku selektivní katalytické redukce NO_x byli poptáni výrobci 4D elementů (Clear-Edge) a filtračních rukávců DeNO_x (GORE), kteří na základě vstupních parametrů spalin navrhli potřebnou filtrační plochu pro dosažení požadovaných výstupních koncentrací TZL, NO_x, SO_x HCl a HF ve spalinách. V rámci nabídek byly specifikovány konstrukční parametry rukávců a elementů, stejně jako jejich provozní vlastnosti.

4D filtr

V prvním případě je využito 4D filtru, který sjednocuje 4 jednotkové operace do jednoho aparátu. Na základě poptávky keramických elementů byla společností Clear-Edge navržena potřebná filtrační plocha 84 m² [46], čemu odpovídá 60 keramických elementů CERAFIL o rozměrech 150 x 3000 mm. Z důvodu vhodného uspořádání elementů do filtru bylo zvoleno 64 elementů, čemuž odpovídá filtrační plocha 90,5 m². Elementy jsou umístěny ve filtru, který zaujímá půdorysnou plochu 5,06 m². Další stanovené parametry a rozměry filtru jsou uvedeny v tab. 8-9.

Katalytický filtr DeNO_x

Na základě vstupních parametrů, které jsou stejné jako u 4D filtru a tkaninového filtru, byla společností Gore vypracována nabídka na katalyticko-filtrační systém DeNO_x. Výrobce byla navržena potřebná filtrační plocha 130 m² [36], čemuž odpovídá 109 ks DeNO_x rukávců o rozměrech 152 x 2500 mm. Z důvodu vhodného rozmístění rukávců ve filtru bylo zvoleno 110

rukávců, což při daných rozměrech jednotlivých rukávců odpovídá filtrační ploše 131,3 m². Z důvodu vyššího počtu rukávců než keramických elementů je zastavěná plocha katalytického filtru o 3,19 m² větší než v případě 4D filtru. Zbylé návrhové parametry filtru jsou uvedeny v tab. 8-9.

Návrh DeNO_x a 4D filtru			
Veličina	4D filtr	DeNO_x filtr	Jednotka
	Hodnota		
Průtok vlhkých spalin na vstupu do filtru	2502	2502	m ³ /h
Průtok suchých spalin na vstupu do filtru (skutečné)	4983	4983	m ³ /h
Skutečný objemový průtok	1,4	1,4	m ³ /s
Filtrační plocha dle nabídek výrobců	84,0	130	m ²
Rozměry filtračního elementu/rukávce			
Délka	3000	2500	mm
Průměr elementu/rukávce	150	152	mm
Navržený počet elementů/rukávců výrobcem	60	109	ks
Zvolený počet elementů/rukávců v závislosti na uspořádání ve filtru	64	110	ks
Filtrační plocha zvoleného počtu elementů/rukávců	90,5	131,3	m ²
Filtrační rychlost	0,92	0,63	m ³ /(m ² *min)
Rozměrový návrh filtru			
Počet elementů/rukávců v řadě	8	11	ks
Počet řad	8	10	ks
Rozteč mezi elementy/rukávci	0,25	0,25	m
Rozteč mezi řadou	0,25	0,25	m
Délka řady	2,25	3,0	m
Šířka řady	2,25	2,75	m
Plocha filtru	5,06	8,25	m²
Výška filtrační komory	3200	2700	mm
Výška výsypky	2000	2000	mm
Plocha pláště filtru	44,2	45,2	m²

Tab. 8-9: Rozměrový návrh katalytického a 4D filtru varianty č. 2

8.3.3 Pomocné aparáty systému čištění spalin

Důležitou součástí systému čištění spalin jsou také pomocné provozní soubory, mezi které se řadí zásobní a dopravní systém sorbentů, zásobní a dopravní systém reagentu, doprava

popelovin, kompresorová stanice pro zásobování systému čištění spalin tlakovým vzduchem a emisní monitoring (AMS).

Zásobování a doprava sorbentu

Sorbenty (NaHCO_3 , aktivní uhlí) jsou dopravovány v big-bagu o objemu 1 m^3 na paletách nákladními vozy. Ty jsou vybaveny hydraulickou plošinou pro jednoduchý převoz big-bagů do budovy spalovny. Big-bag vaky jsou následně z palet umístěny za pomoci kladky do vyprazdňovací stolice, která je opatřena výsypkou. Sorbent je dopravován z výsyvky do zásobníku dávkovacího zařízení vybaveného kapacitním snímačem hladiny pro hlídání minimální hladiny sorbentu v zásobníku. Na dno výsyvky je napojen šnekový dopravník, který dopravuje sorbent do násyvky mikrodávkače, který kontinuálně dávkuje požadované množství sorbentu přímo do potrubí spalin na základě dat z AMS.

Zásobní nádrž redukčního činidla a jeho doprava

Reagent (40 % vodný roztok močoviny) je dopravován pomocí nákladních automobilů v IBC kontejnerech o objemu 1 m^3 . Obsluha spalovny zajistí přečerpání reagentu pomocí sudového čerpadla do zásobního IBC kontejneru (objem 1 m^3), který je vybaven automatickou ochranou proti přeplnění (kapacitní snímač hladiny). Kontejner je navíc opatřen záchytnou vanou pro případ úniku reagentu. Dvojití dávkovací čerpadel, kdy jedno slouží jako záložní pro případ poruchy, dojde k čerpání reagentu potrubím do injektážních trysek, které jej rozstříkují do spalinového potrubí nebo dohořivací komory.

Skladování a doprava popelovin

Součástí tkaninových, DeNO_x a 4D filtrů jsou výsyvky, kde dochází k hromadění popelovin po oklepání filtračních elementů/rukávčů. Výsyvky jsou opatřeny elektrickým otopným tělesem, který slouží jako ochrana proti zvlhnutí popílku. Přes pneumaticky ovládanou dvojklapku je popílek vyprazdňován do zásobních big-bag vaků, které jsou následně skladovány v prostoru spalovny a v daných časových intervalech odváženy nákladními automobily na skládky NO.

Kompresorová stanice

Tlakový vzduch je v procesu čištění spalin potřebný především pro pneumatické řízení MaR prvků a pulzní oklepávání filtrů (pulse jet). Z tohoto důvodu je technologie doplněna o kompresorovnu obsahující šroubový kompresor, který produkuje tlakový vzduch o výstupním tlaku 6 barů (max. tlak 8,5 bar). Pro zajištění požadované kvality tlakového vzduchu je kompresorová stanice vybavena odstředivým separátorem, odvaděčem kondenzátu, hrubým a jemným filtrem tlakového vzduchu a separátorem oleje a kondenzátu. Požadovaná teplota tlakového vzduchu před vstupem do technologie je stanovena na 0°C . Pro tento účel je vzduch sušen v adsorpční sušičce. Pro správné fungování MaR prvků je zapotřebí vymraženého tlakového vzduchu o teplotě -40°C .

Ventilátory

Pro pokrytí tlakových ztrát vznikajících místními odpory (aparáty technologie) je využito 2 radiálních ventilátorů spalin pro variantu č.1, případně 1 ventilátoru u varianty č. 2. Pro

recirkulaci spalin je využito u obou variant recirkulačního ventilátoru. Výše zmíněné ventilátory jsou tvořeny ocelovou skříní (vč. izolace) a oběžným kolem, které je poháněno elektromotorem. Ventilátory jsou vybaveny kompenzátory sání a výtlaku včetně chráničky. Výkon ventilátoru je regulován frekvenčním měničem. Potřebné výkony ventilátorů obou variant systému čištění spalin jsou stanoveny v kapitole 8.4.1.

Emisní monitoring

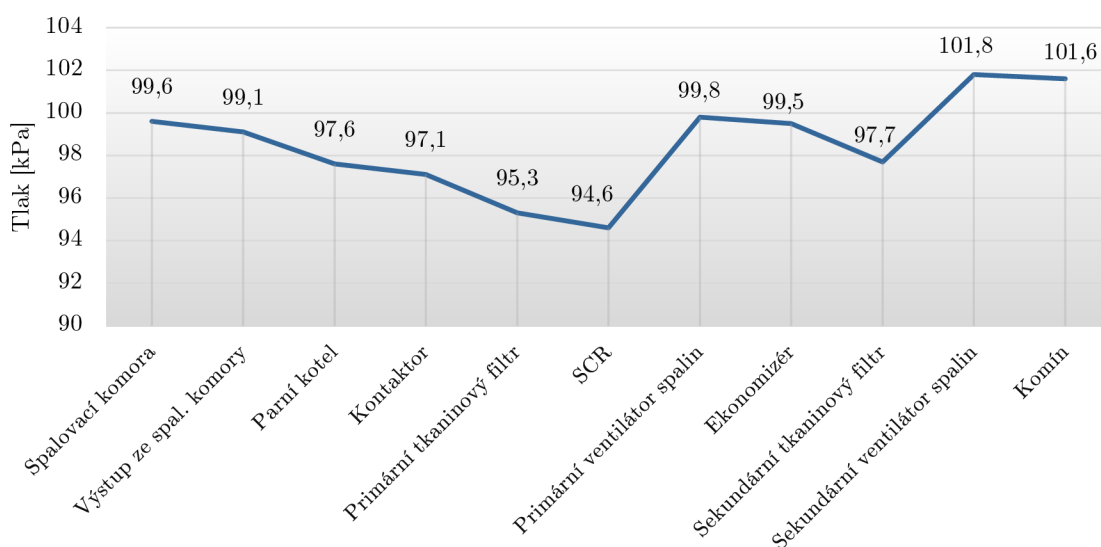
Odběr vzorku spalin je prováděn za pomoci odběrové sondy, ze které je otápěným odběrovým vedením přiváděn vzorek plynu do analyzátoru. Pro vyhodnocení koncentrace spalin je využito tří analyzátorů. První slouží k analýze NO_x, SO₂, CO a O₂. Dále je pak využito analyzátoru TOC a prachoměru pro zaznamenání koncentrace TZL ve spalinách. AMS jednotka je dále opatřena měřením procesních veličin: teploty, tlaku, vlhkosti a průtoku.

8.4 Energetická náročnost procesu

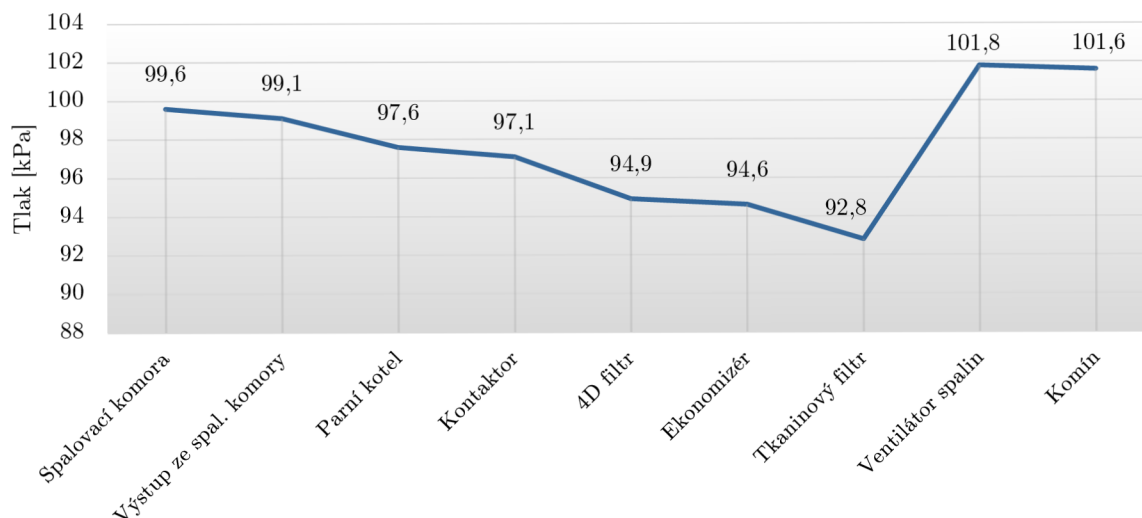
Pro vyhodnocení energetické náročnosti navrhovaných variant a následnou ekonomickou bilanci je nutné stanovit energetickou náročnost systému čištění spalin především z pohledu spotřeby elektrické energie. Nejprve je však nutné stanovit potřebný příkon jednotlivých ventilátorů spalin. Následně je vyhodnocena celková energetická náročnost obou variantních řešení.

8.4.1 Stanovení příkonu ventilátorů

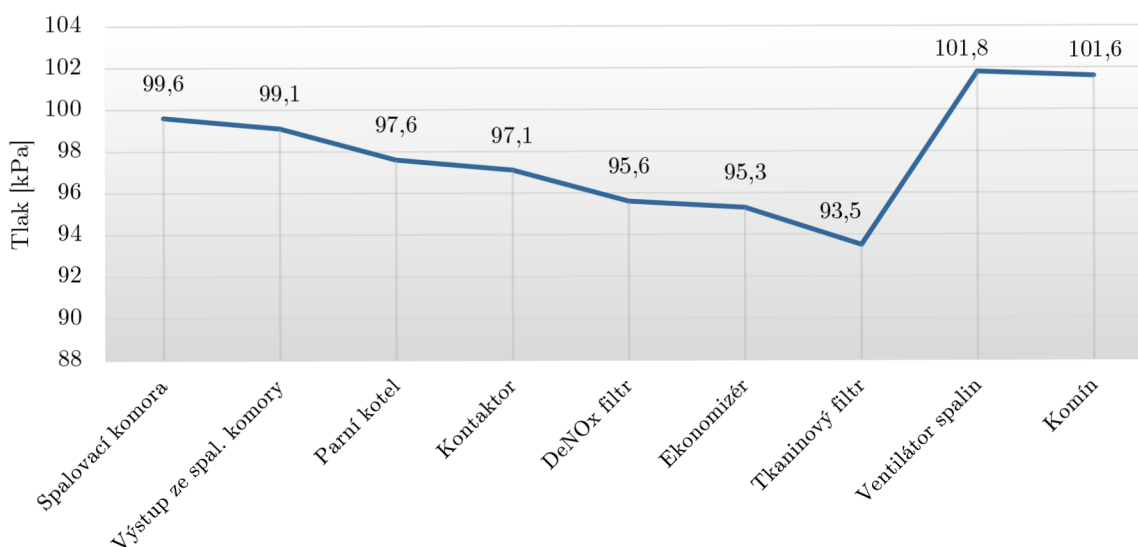
Jak již bylo zmíněno, průchodem spalin jednotlivými aparáty technologie termické likvidace zdravotnického odpadu dochází k tlakovým ztrátám na jednotlivých aparátech. Pro pokrytí tlakových ztrát případně dopravu spalin zpět do spalovací komory je využito spalinových ventilátorů. Na obr. 8-4 je zobrazen graf zobrazující průběh tlakového profilu varianty čištění spalin č. 1. Graf průběhu tlaku pro variantní řešení č. 2 je uveden na obr. 8-5 pro případ využití 4D filtru, resp. obr. 8-6 při volbě katalytického filtru s DeNO_x rukávcí.



Obr. 8-4: Tlakový průběh na spalinové trase pro variantu č. 1



Obr. 8-5: Tlakový průběh na spalinové trase pro variantu č. 2 – 4D filtr



Obr. 8-6: Tlakový průběh na spalinové trase pro variantu č. 2 – DeNOx filtr

Z důvodu pokrytí tlakových ztrát vzniklých na jednotlivých aparátech po směru proudu spalin je nutné opatřit technologii ventilátory o patřičném výkonu. Pro variantu č. 1 je využito 2 radiálních ventilátorů, jelikož je tato varianta vybavena větším počtem aparátů, který způsobuje také větší tlakovou ztrátu. Dále je v technologii využít ventilátor recyklu spalin pro odtah části spalin zpět do spalovací komory.

Varianta č. 2 je vybavena jedním radiálním ventilátorem spalin a stejně jako varianta č. 1 ventilátorem recyklu spalin.

Stanovení příkonu jednotlivých ventilátorů závisí především na tlakové diferenci, skutečném průtoku spalin a také na účinnosti ventilátoru, která byla ve všech případech uvažována jako 80 %. Příkon ventilátoru je pak vypočten dle rovnice (8.6),

$$P = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_{ven}} \quad (8.6)$$

kde Q [mN^3/h] - skutečný průtok spalin

Δp [kPa] - tlaková diference

η_{ven} [-] - účinnost ventilátoru

P [kW] – příkon ventilátoru.

Pro plynulou regulaci otáček je u všech ventilátorů využito frekvenčního měniče o účinnosti 98 %, jež reguluje elektromotor o účinnosti 97 %.

Vypočtené hodnoty požadovaných příkonů primárního, sekundárního ventilátoru a ventilátoru recyklu spalin pro navrhovanou variantu č. 1 jsou uvedeny v tab. 8-10

Výkon ventilátoru pro variantu č.1				
Veličina	Primární	Sekundární	Recykl	Jednotka
Průtok spalin	2055	2090	513	mN^3/h
Teplota spalin	240	140	213,3	$^{\circ}\text{C}$
Skutečný průtok spalin	4134	3278	978	mN^3/h
Tlaková diference	5,2	4,1	5	kPa
Příkon ventilátoru	7,5	4,7	1,7	kW
příkon FM+M	7,9	4,9	1,8	kW

Tab. 8-10: Příkony ventilátorů varianty č. 1

Pro pokrytí tlakových ztrát a zpětnou dopravu části spalin zpět do spalovací komory je pro variantu č. 1 potřeba 14,5 kW, což při zpracovatelském výkonu 200 kg/h znamená spotřebu 72,5 kWh/t.

V rámci varianty č. 2 byly stanoveny minimální požadované výkony ventilátorů (tab. 8-11) jak pro variantu využívající 4D filtru, tak pro případ zařazení katalytického filtru s rukávci DeNOx.

Výkon ventilátoru pro variantu č.2			
4D filtr	Primární	Recykl	Jednotka
Průtok spalin	2030	513	mN^3/h
Teplota spalin	140	213,3	$^{\circ}\text{C}$

Skutečný průtok spalin	3288	978	m _N ³ /h
Tlaková diference	9	4,7	kPa
Příkon ventilátoru	10,3	1,6	kW
příkon FM+M	10,8	1,7	kW
DeNOx filtr	Primární	Recykl	Jednotka
Průtok spalin	2030	513	m _N ³ /h
Teplota spalin	140	213,3	°C
Skutečný průtok spalin	3327	968	m _N ³ /h
Tlaková diference	8,3	4	kPa
Příkon ventilátoru	9,6	1,3	kW
příkon FM+M	10,1	1,4	kW

Tab. 8-11: Příkony ventilátorů varianty č. 2

Celkový příkon ventilátoru potřebný pro pokrytí tlakových ztrát a dopravu recyklu spalin zpět do spalovací komory je pro variantu č. 2 se 4D filtrem vyčíslen na 12,5 kW, což při zpracovatelské kapacitě odpadu 200 kg/h odpovídá spotřebě 62,5 kWh/kg.

Pokud je namísto 4D filtru v technologii zařazen DeNOx filtr, dojde ke snížení požadovaného příkonu ventilátorů, se kterým souvisí také snížení spotřeby elektrické energie, která klesne o 8 %. Rozdíly příkonů ventilátorů jsou způsobeny různými tlakovými diferenciemi pro 4D filtr a katalytický filtr (počet rukávců, provedení elementů/rukávců), jelikož je počítáno s totožným průtokem spalin.

8.4.2 Stanovení celkového příkonu

Kromě pohonu výše zmíněných spalinových ventilátorů je elektrická energie použita pro pohon doplňkových aparátů systémů dávkování NaHCO₃ a aktivního uhlí, dávkování močoviny, MaR instrumentaci vytápění výsypek filtrů a jejich regeneraci, kompresorovou stanicí a také pro pohon AMS.

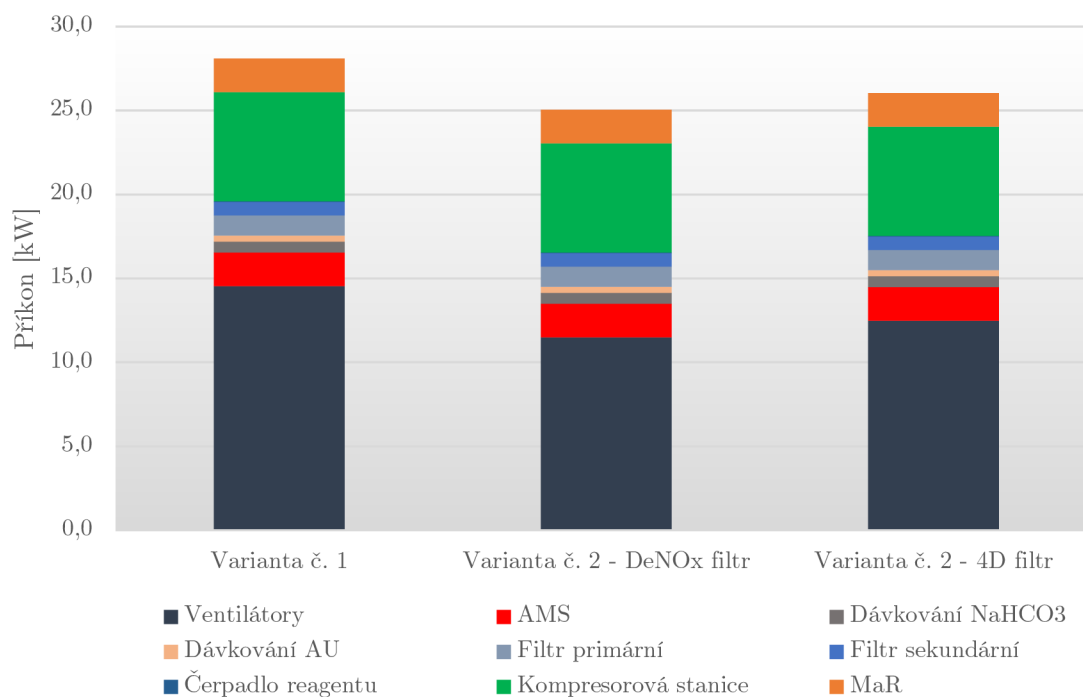
Hodnoty spotřeb elektrické energie aparátů byly, vyjma spalinových ventilátorů, stanoveny na základě inženýrského odhadu a konzultací s odborníky společnosti EVECO Brno [42]. Je nutné podotknout, že se jedná o mezní provozní stav. Ve skutečnosti budou provozní příkony nižší.

Spotřebiče elektrické energie byly rozděleny do jednotlivých provozních sekcí, jejichž příkony jsou uvedeny v tab. 8-12. Na základě zpracovatelské kapacity odpadu 200 kg/h byla stanovena celková spotřeba elektrické energie pro jednotlivá variantní řešení. Nejnižší spotřebu 125,2 kWh/t vykazuje navrhovaná varianta č. 2 s DeNOx filtrem, což je způsobeno především nejnižším celkovým příkonem ventilátorů. Celková spotřeba elektrické energie je pro variantu č. 1 a variantu č. 2 se 4D filtrem vyšší o 12 % resp. 4 %.

Veličina	Hodnota			Jednotka
	Varianta č. 1	Varianta č. 2		
		DeNOx filtr	4D filtr	
Ventilátory	14,5	11,5	12,5	kW
AMS	2	2	2	kW
Dávkování NaHCO ₃	0,65	0,65	0,65	kW
Dávkování AU	0,35	0,35	0,35	kW
Filtr primární	1,2	1,2	1,2	kW
Filtr sekundární	0,8	0,8	0,8	kW
Čerpadlo reagentu	0,04	0,04	0,04	kW
Kompresorová stanice	6,5	6,5	6,5	kW
MaR	2	2	2	kW
Příkon celkem	28,1	25,0	26,0	kW
Spotřeba energie	140,4	125,2	130,1	kWh/t

Tab. 8-12: Tabulky příkonů elektricky poháněných aparátů systému čištění spalin

Na základě stanovených příkonů jednotlivých sekcí byl vytvořen graf, který je zobrazen na obr. 8-7, ze kterého je jasně patrné, že energeticky nejnáročnější je pokrytí tlakových ztrát a odtah spalin napříč technologií čištění spalin, která tvoří přibližně polovinu celkové spotřeby elektrické energie u všech návrhových variant.



Obr. 8-7: Měrné zastoupení příkonů jednotlivých aparátů v rámci navrhovaných variant

9 Technicko-ekonomické hodnocení

Ekonomické zhodnocení navržených variant systému čištění spalin zahrnuje jak porovnání investičních nákladů pro pořízení technologie, tak srovnání nákladů spojený s provozováním navržených variantních řešení. Na základě ekonomického zhodnocení je vybrána nejvýhodnější varianta systému čištění spalin pro spalovnu zdravotnického odpadu v areálu krajské nemocnice A v rámci modelového regionu. Důležité je podotknout, že ceny, uvedené v této kapitole, jsou pouze indikativní a slouží především pro účely technicko-ekonomického vyhodnocení.

9.1 Investiční náklady

Důležitým aspektem ekonomické výhodnosti zvoleného systému čištění spalin je jeho pořizovací cena. Jelikož jsou jednotlivé aparáty navržených variant dimenzovány pro stejné výstupní koncentrace nečistot ve spalinách, je ekonomické hledisko nezbytné pro volbu nejvýhodnější z variant.

Pro vyhodnocení pořizovacích nákladů jednotlivých variant byly brány v úvahu pouze stěžejní aparáty jako jsou filtry včetně rukávců (příp. keramických elementů), spalinové ventilátory, ventilátory recyklu spalin a pro variantu č. 1 také SCR reaktor.

Naopak do celkových pořizovacích nákladů nebyly zahrnuty aparáty, které jsou svými rozměry a parametry pro všechny navržené varianty totožné, a proto by pouze navýšily celkovou pořizovací cenu. Dále by pak mohlo dojít k nepřesnému odhadu cen jednotlivých zařízení a zkrácení celkové pořizovací ceny technologie. Jedná se především o zařízení AMS, prvky MaR, spalinovody a potrubí vč. armatur, zásobní a dávkovací zařízení sorbentů a reagentu apod.

Jednotkové ceny filtračních elementů 4D filtru a DeNOx rukávců byly určeny na základě nabídek od společností Cleae-Edge, resp. společnosti Gore. Stanovení pořizovací ceny katalyzátoru bylo provedeno na základě indikativní jednotkové cenové nabídky od společnosti IBIDEN CERAM [44], vztažené na jeden element voštinového bloku katalyzátoru o rozměrech uvedených v tab. 8-8. Díky konzultacím s odborníky společnosti EVECO Brno bylo možné určit zbylé jednotkové ceny.

Pro výpočet nákladů na konstrukci jednotlivých filtrů a SCR reaktoru byla stanovena jednotková cena za m² filtru a díky výpočtu plochy pláště jednotlivých zařízení byla dopočtena celková cena konstrukce filtru a SCR reaktoru. Zvolená jednotková cena zahrnuje veškerou doplňkovou výstroj filtru (vytápění výsypky, klapky, žebřík, zábradlí atd).

Cena ventilátorů spalin je složena z fixní a proměnlivé složky celkové ceny. Fixní náklady všech ventilátorů jsou ve výši 40 000 Kč. Proměnlivá část ceny je závislá na příkonu jednotlivých ventilátorů, která je vypočtena na základě jednotkové ceny vztažené na kW. Celkové ceny ventilátorů zahrnují veškerou potřebnou výstroj ventilátoru jako jsou kompenzátory výtlaku a sání, chránička sání, ventilátorová skříň včetně izolace, apod.

V tab. 9-1 jsou shrnuty veškeré jednotkové ceny, vypočtené ceny aparátů a celkové ceny uvažovaných koncepčních variant systému čištění spalin. Nejvýhodnější variantou z pohledu pořizovací ceny je navrhovaná varianta č. 2 využívající 4D filtru s keramickými filtračními elementy, jejíž celková pořizovací cena 2,2 mil. Kč je o téměř o 37 % nižší, než celková pořizovací cena navržené varianty č. 2 s DeNOx filtrem. Podstatný rozdíl v investičních nákladech je způsoben především cenou filtračních rukávců, jelikož byla pro dosažení požadovaných koncentrací nečistot ve výstupních spalinách zvolena větší filtrační plocha dle nabídky společnosti GORE [36].

Investiční náklady pro variantu č. 1 jsou oproti zvolené variantě č. 2 se 4D filtrem o přibližně 10 % (200 tis. Kč) vyšší. Tento rozdíl je způsoben jak využitím 4D filtru, jenž sdružuje 4 jednotkové operace a není třeba v technologii využít separátního zařízení SCR, tak využitím pouze jednoho odtahového ventilátoru spalin pro pokrytí tlakových ztrát vznikajících na spalinové trase.

Zhodnocení investičních nákladů					
Jednotkové ceny					
Aparát	Cena za jednotku		Jednotka		
Plášť filtrů, SCR reaktor	17 500		Kč/m ²		
Tkaninové rukávce	1 350		Kč/ks		
Keramické elementy 4D filtru	8 738		Kč/ks		
DeNOx rukávce	10 280		Kč/m ²		
Voštinové bloky katalyzátoru	257 000		Kč/m ³		
Ventilátory spalin	5 071		Kč/kW		
Varianta č. 1					
Aparát	Položka	Množství	Jednotka	Celková cena	Jednotka
Primární filtr	Konstrukce	45,02	m ²	787 937	Kč
	Tkaninové rukávce	80	ks	108 000	Kč
Sekundární filtr	Konstrukce	37,09	m ²	648 991	Kč
	Tkaninové rukávce	56	ks	75 600	Kč
SCR reaktor	Plášť	17,73	m ²	310 275	Kč
	Katalyzátor	1,154	m ³	296 531	Kč
Ventilátory	Primární	7,5	kW	77 851	Kč
	Sekundární	4,7	kW	63 662	Kč
	Recykl	1,7	kW	48 613	Kč
Celková cena				2 417 461	Kč

Varianta č. 2 – 4D filtr					
Aparát	Položka	Množství	Jednotka	Celková cena	Jednotka
4D filtr	Konstrukce	44,19	m ²	773 301	Kč
	Keramické elementy	64	ks	559 232	Kč
Sekundární filtr	Konstrukce	37,09	m ²	648 991	Kč
	Tkaninové rukávce	56	ks	75 600	Kč
Ventilátory	Primární	10,3	kW	92 103	Kč
	Recykl	1,6	kW	48 096	Kč
Celková cena				2 197 324	Kč
Varianta č. 2 – DeNOx filtr					
Aparát	Položka	Množství	Jednotka	Celková cena	Jednotka
DeNOx filtr	Konstrukce	45,22	m ²	791 427	Kč
	DeNOx rukávce	131,32	m ²	1 349 955	Kč
Sekundární filtr	Konstrukce	37,09	m ²	648 991	Kč
	Tkaninové rukávce	56	ks	75 600	Kč
Ventilátory	Primární	9,6	kW	88 616	Kč
	Recykl	1,3	kW	46 819	Kč
Celková cena				3 001 408	Kč

Tab. 9-1: Investiční náklady navrhovaných variant

9.2 Provozní náklady

Dalším aspektem pro následující hodnocení výhodnosti jednotlivých variant je určení nákladů na provoz technologie čištění spalin jako celku. V rámci provozních nákladů je uvažováno se spotřebami médií, jež vycházejí z bilancí jednotlivých koncepčních variant.

Do bilance provozních nákladů byla zahrnuta spotřeba elektrické energie dle celkového příkonu viz. tab. 8-12. Jednotková cena 1,5 Kč/kWh elektrické energie byla stanovena jako smluvní nákupní cena s dodavatelem elektrické energie při dlouhodobém odběru. Jednotkové ceny zbylých médií potřebných pro účinný provoz technologie byly stanoveny dle provozních zkušeností. Ceny jsou uvažovány stejně jako v případě elektrické energie s ohledem na smlouvy o dlouhodobých dodávkách.

Do nákladů je také zahrnut poplatek za likvidaci popílku z filtrů, který je v současné době považován za NO, a proto s ním musí být nakládáno s ohledem na legislativu. Nejčastěji se tak děje skládkováním na skládkách NO. Zvolený poplatek ve výši 6,5 Kč/kg byl stanoven na základě poplatku za skládkování NO, který je blíže specifikován v příloze č. 6. zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.

Tab. 9-2 shrnuje veškeré jednotkové ceny médií, stejně jako spotřeby médií u jednotlivých variant. Výsledkem jsou hodinové a roční provozní náklady uvažovaných variant. Nejnižší roční provozní náklady vykazuje varianta č. 2 s DeNOx filtrem, jejíž náklady jsou o přibližně 32 tis. Kč/rok nižší než u varianty č. 1, která naopak vykazuje nejvyšší roční provozní náklady. Takovýto rozdíl je způsoben především nižším příkonem ventilátorů, jelikož variantní řešení s DeNOx filtrem vykazuje nejnižší tlakovou ztrátu. Varianta č. 2 obsahující 4D filtr, vykazuje provozní náklady pouze o 10 tis. Kč/rok vyšší než varianta č. 2 s DeNOx filtrem. Takovýto rozdíl však netvoří ani procento celkových provozních nákladů, proto jej lze uvažovat za nevýznamný.

Zhodnocení provozních nákladů				
Jednotkové ceny	Cena z jednotku		Jednotka	
Spotřeba energie	1,5		Kč/kWh	
Aktivní uhlí	35		Kč/kg	
NaHCO ₃	7,5		Kč/kg	
Močovina	6,5		Kč/kg	
Likvidace popílku	6,5		Kč/kg	
Varianta č. 1				
	Množství	Jednotka	Celková cena	Jednotka
Spotřeba energie	28,09	kW	42,1	Kč/h
Aktivní uhlí	0,28	kg/h	9,8	Kč/h
NaHCO ₃	8,48	kg/h	63,6	Kč/h
Močovina	5,00	kg/h	32,5	Kč/h
Likvidace popílku	18,78	kg/h	122,1	Kč/h
Hodinové provozní náklady	270,1			Kč/h
Roční provozní náklady	1 890 579			Kč/rok
Varianta č. 2 – 4D filtr				
	Množství	Jednotka	Celková cena	Jednotka
Spotřeba energie	26,03	kW	39,0	Kč/h
Aktivní uhlí	0,28	kg/h	9,8	Kč/h
NaHCO ₃	8,48	kg/h	63,6	Kč/h
Močovina	5,00	kg/h	32,5	Kč/h
Likvidace popílku	18,78	kg/h	122,1	Kč/h
Hodinové provozní náklady	267,0			Kč/h
Roční provozní náklady	1 868 956			Kč/rok

Varianta č. 2 – DeNO _x filtr				
	Množství	Jednotka	Celková cena	Jednotka
Spotřeba energie	25,04	kW	37,6	Kč/h
Aktivní uhlí	0,28	kg/h	9,8	Kč/h
NaHCO ₃	8,48	kg/h	63,6	Kč/h
Močovina	5,00	kg/h	32,5	Kč/h
Likvidace popílku	18,78	kg/h	122,1	Kč/h
Hodinové provozní náklady	265,5			Kč/h
Roční provozní náklady	1 858 577			Kč/rok

Tab. 9-2: Provozní náklady navrhovaných variant

Z ekonomické bilance provozních nákladů jednotlivých koncepčních řešení vyplývá, že dané varianty vykazují téměř stejné provozní náklady, které tak nehrají roli při výběru ekonomicky nejvýhodnější varianty. Z tohoto důvodu je při volbě vhodné technologie přihlédnuto k investičním nákladům, ze kterých vyplývá jako ekonomicky vhodná varianta č. 2 se 4D filtrem. Proto je toto technologické řešení systému čištění spalín zvoleno pro snižování koncentrací polutantů ve spalínách vznikajících v zařízení EVO v areálu krajské nemocnice A při spalování zdravotnického odpadu v rámci modelového regionu. Celková technologie navrženého zařízení EVO je graficky znázorněna v příloze č. 3.

10 Závěr

Diplomová práce se zabývá návrhem technologie čištění spalin v rámci moderního zařízení pro energetické využití zdravotnického odpadu, které je dimenzováno pro pokrytí krajské produkce odpadu zdravotnických zařízení na území České republiky.

V úvodní části práce byl zdravotnický odpad obecně rozčleněn a kategorizován do podkategorií na základě chemických a fyzikálních vlastností. Dle vykazovaných vlastností odpadu je dále popsána jeho klasifikace dle legislativních dokumentů platných na území České republiky. Následnou analýzou současné produkce zdravotnického odpadu bylo zjištěno, že za období 2011-2017 došlo k celkovému navýšení produkce o 18,3 %, z čehož plyne i zvýšení požadavku na jeho likvidaci.

V následující části DP jsou diskutovány používané technologie pro nakládání se zdravotnickým odpadem. Jedním z možných řešení snížení rizikovitosti zdravotnických odpadů je jeho dekontaminace tepelnými, chemickými nebo biologickými procesy, díky kterým je možné upravit vlastnosti zdravotnického odpadu a udělat z něj odpad, který vykazuje stejné vlastnosti jako odpad komunální. Tím však nedochází k požadovanému snížení objemu odpadu ani k využití jeho energetického potenciálu a jedná se tedy o nesystémové řešení. Proto je preferovaným způsobem nakládání se zdravotnickým odpadem jeho termická likvidace a s ní spojené energetické využití odpadu, čímž je dosaženo požadovaného snížení objemu odpadu. Následně jsou v této kapitole stručně popsány zařízení pro termickou likvidaci ZO. Podrobnějším rozбором a porovnáním jednotlivých zařízení, včetně popisu možné užití tepla, se zabývá souběžně zpracovávaná diplomová práce „*Systémové řešení pro energetické využití zdravotnických odpadů*“ [43].

S termickým rozkladem zdravotnického odpadu je spojen požadavek na kvalitu vypouštěných spalin, především na koncentraci TZL, NO_x, kyselých složek, těžkých kovů a PCDD/F, jejichž emisní limity jsou stále snižovány. V mnoha případech jsou stávající systémy čištění spalin v rámci České republiky zastaralé a s dalším snížením požadovaných koncentrací polutantů již nebudou schopny dodržet nové emisní limity. Právě z tohoto důvodu je v následující kapitole diskutováno využití takových metod čištění spalin, jež jsou v souladu s referenčními dokumenty BREF/BAT a jejichž aplikací v rámci nově navrženého systému čištění spalin bude možné reagovat na neustálé se zpřísnující emisní limity. Rozvíjejícím se trendem je slučování různých jednotkových operací do jednoho aparátu. Příkladem je využití filtrů se speciálními filtračními elementy či rukávci jako jsou 4D keramické filtrační elementy, resp. DeNO_x rukávce, které kombinují povrchovou filtraci se snižováním NO_x a PCDD/F díky implementovanému katalyzátoru. Těmito metodami dochází především ke snížení investičních nákladů, tlakových ztrát na spalínové cestě a také zastavěné plochy.

V hlavní části diplomové práce je pro modelový region navrženo zařízení EVO se zpracovatelskou kapacitou 1,4 kt/rok, které bude sloužit pro pokrytí produkce zdravotnického odpadu v rámci modelového regionu. Pro nové moderní zařízení EVO byly navrženy dvě koncepční řešení bloku čištění spalin v souladu s emisní legislativou a referenčním

dokumentem nejlepších dostupných technik BREF/BAT. Obě varianty kombinují suchou sorpci NaHCO_3 snižující koncentraci kyselých složek spalin, katalytickou redukcí NO_x a adsorpci PCDD/F a těžkých kovů aktivním uhlím. První varianta zahrnuje separátní zřízení SCR reaktoru. Ve druhém technologickém návrhu je funkce katalyzátoru a primárního tkaninového filtru zastoupena 4D filtrem osazeným speciálními keramickými filtračními elementy, resp. DeNOx filtrem s katalyticko-filtračními rukávci.

Na základě parametrů spalin vystupujících z parního kotle byla s využitím programu W2E provedena materiálová a energetická bilance obou koncepčních řešení, díky kterým byla stanovena potřebná množství sorbentu (NaHCO_3 , aktivního uhlí) a reagentu (močoviny) pro zajištění účinného splnění emisních limitů dle BAT/BREF.

Součástí diplomové práce je také technologický návrh klíčových aparátů jednotlivých variantních řešení, který slouží pro následné zhodnocení investičních nákladů. Pozornost byla především soustředěna na optimální návrh objemu potrubního kontaktoru pro zajištění požadované doby kontaktu NaHCO_3 se spalinami a návrh tkaninových filtrů. Pro návrh 4D filtru a DeNOx filtru byly využity nabídky filtračních elementů a rukávců od výrobců daných technologií. V neposlední řadě byl navržen SCR reaktor včetně optimálního objemu katalyzátoru voštinového typu. Celkový objem byl stanoven na $1,15 \text{ m}^3$.

V rámci energetické bilance procesu byly navrženy potřebné příkony ventilátorů pro pokrytí tlakových ztrát, vznikajících na spalinové trase a pro odtah recyklu spalin zpět do spalovací komory. Následně byly porovnány varianty z hlediska celkové energetické náročnosti, která úzce souvisí s tlakovou ztrátou systému, jelikož přibližně polovina potřebného příkonu je spotřebována na provoz spalinových ventilátorů. Nejnižší spotřebu el. energie na kg odpadu ($125,2 \text{ kWh/kg}$) vykazuje varianta č. 2 s DeNOx rukávci.

Závěrem byly jednotlivé varianty porovnány z ekonomického hlediska s přihlédnutím jak k provozním, tak investičním nákladům. Do investičních nákladů byly započteny pouze ty aparáty, které tvoří rozdíl v rámci obou variantních řešení. Jelikož rozdíl v ročních provozních nákladech netvořil ani procento celkové částky, byly při posuzování ekonomické výhodnosti zohledňovány pouze investiční náklady. Ekonomicky výhodnou variantou byla zvolena varianta č. 2 se 4D filtrem, jejíž investiční náklady 2,2 mil. Kč jsou o 37 % nižší než u varianty č. 1, resp. 10 % oproti variantě č. 2 s DeNOx filtrem. Právě kvůli své ekonomické výhodnosti je technologické řešení varianty č. 2 se 4D filtrem zvoleno pro snižování koncentrací polutantů ve spalinách navrhovaného zařízení k energetickému využití odpadu.

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 2-1: Autokláv s válcovou komorou společnosti BondTech [13].....	17
Obr. 2-2: Vysokokapacitní autokláv společnosti Tuttnauer [14].....	17
Obr. 2-3: Mikrovlnné zařízení Sanitech vybavené drtičem odpadu [16].....	18
Obr. 2-4: Sestava spalovacího zařízení Hoval - typ GG [17].....	20
Obr. 3-1: Schématické znázornění elektrostatického odlučovače	23
Obr. 3-2: Tkaninový filtr.....	24
Obr. 3-3: Filtrační rukávce a koše [24].....	24
Obr. 3-4: Dvoustupňová vypírka spalin.....	25
Obr. 3-5: Vliv teplotního okna na redukci NO _x a skluz NH ₃ [29].....	29
Obr. 3-6: Schéma SCR	30
Obr. 3-7: SINOx Honeycomb katalyzátor společnosti JM [31]	30
Obr. 3-8: Filtračně katalytický systém DeNOx společnosti GORE [37].....	32
Obr. 3-9: Keramický element 4D filtru Cerafil® TopKat [38].....	33
Obr. 5-1: Rozmístění spaloven zdravotnického odpadu na území ČR	40
Obr. 5-2: Podíly znečištění danými polutanty pro jednotlivé spalovny [41].....	42
Obr. 6-1: Rozmístění nemocnic v rámci modelového regionu [43]	44
Obr. 7-1: Grafické znázornění aparátové skladby navržené varianty č. 1.....	51
Obr. 7-2: Grafické znázornění aparátové skladby navržené varianty č. 2.....	52
Obr. 8-1: Materiálová bilance varianty č. 1	57
Obr. 8-2: Materiálová bilance varianty č. 2	59
Obr. 8-3: Náčrt potrubního kontaktoru	60
Obr. 8-4: Tlakový průběh na spalinové trase pro variantu č. 1.....	67
Obr. 8-5: Tlakový průběh na spalinové trase pro variantu č. 2 – 4D filtr	68
Obr. 8-6: Tlakový průběh na spalinové trase pro variantu č. 2 – DeNOx filtr	68
Obr. 8-7: Měrné zastoupení příkonů jednotlivých aparátů v rámci navrhovaných variant	71

SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1: Katalog odpadů – podskupina 18 [4]	14
Tab. 1-2: Seznam nebezpečných vlastností odpadů [5].....	14
Tab. 1-3: Celkové množství vyprodukovaného odpadu za období 2011-2017 [6].....	15
Tab. 1-4: Množství odpadů ze zdravotnických zařízení za období 2011-2017 [6]	15
Tab. 3-1: Vlastnosti filtračních materiálů [25]	24
Tab. 4-1: Srovnání stávajících a navrhovaných denních emisních limitů pro spalování odpadu	36
Tab. 5-1: Seznam spaloven pro spalování zdravotnického odpadu na území ČR [40].....	39
Tab. 5-2: Technologie spalování a čištění spalin použité spalovnách zdravotnického odpadu v ČR [41]	41
Tab. 6-1: Produkované množství odpadu kategorie N zdravotnickými zařízeními v modelovém regionu	45
Tab. 6-2: Elementární složení spalovaného odpadu	46
Tab. 7-1: Souhrn vstupních a výstupních parametrů pro systém čištění spalin.....	50
Tab. 8-1: Vstupní parametry bilančního výpočtu	55
Tab. 8-2: Tlakové ztráty jednotlivých zařízení	55
Tab. 8-3: Přisávání falešného vzduchu na trase spalin.....	56
Tab. 8-4: Předpoklady materiálové bilance varianty č. 1	57
Tab. 8-5: Předpoklady materiálové bilance varianty č. 2.....	58
Tab. 8-6: Návrhové rozměry potrubního kontaktu.....	60
Tab. 8-7: Rozměrový návrh tkaninových filtrů varianty č. 1	62
Tab. 8-8: Návrhové parametry SCR reaktoru.....	64
Tab. 8-9:Rozměrový návrh katalytického a 4D filtru varianty č. 2.....	65
Tab. 8-10: Příkony ventilátorů varianty č. 1	69
Tab. 8-11: Příkony ventilátorů varianty č. 2	70
Tab. 8-12: Tabulky příkonů elektricky poháněných aparátů systému čištění spalin.....	71
Tab. 9-1: Investiční náklady navrhovaných variant.....	74
Tab. 9-2: Provozní náklady navrhovaných variant	76

SEZNAM ZKRATEK

ADR	Accord Dangereuses Route
AMS	Automatizovaný měřicí systém
AU	Aktivní uhlí
BAT	Best Available Technology
BREF	Reference document
BTX	benzen, toluen, xylen
CAPEX	Capital Expenditure (Investiční náklady)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ESP	Electrostatic Precipitator (elektrostatický odlučovač)
EU	Evropská Unie
EVO	Energetické využití odpadu
IBC	Intermediate Bulk Container
ISOH	Informační Systém Odpadového Hospodářství
LHV	Lower Heating Value
MaR	Měření a regulace
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NO	Nebezpečný odpad
OPEX	Operating Expenses (provozní náklady)
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PCDD/F	polychlorované dibenzodioxiny/dibenzofurany
PM	Particulate Matter
PTFE	polytetrafluorethylen
SCR	Selective Catalytic Reduction (selektivní katalytická redukce)
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction (selektivní nekatalytická redukce)
TEQ	Toxicity Equivalent Factor
TF	Tkaninový filtr
TOC	Total Organic Carbon (celkový organický uhlík)
TVOC	Total Volatile Organic Compounds (těkavé organické látky)
TZL	Tuhé znečišťující látky



UV	Ultra Violet (ultrafialové záření)
WHO	World Health Organization (Světová zdravotnická organizace)
WI	Waste Incineration (spalování odpadu)
ZO	Zdravotnický odpad
ZP	Zemní plyn

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WINDFELD, Elliott Steen a Marianne Su-Ling BROOKS. Medical waste management - A review. *Journal of Environmental Management* [online]. Elsevier, 2015, (163), 98-108 [cit. 2019-01-13]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715302176>
- [2] PRÜSS, A., ed., E. GIROULT, ed., P. RUSHBROOK, ed. a Y. CHARTIER, ed. *Safe management of wastes from health-care activities*. 2. edice. Ženeva: Světová zdravotnická organizace, 2014, 308 s. ISBN 978-92-4-154856-4. Dostupné také z: http://www.searo.who.int/srilanka/documents/safe_management_of_wastes_from_healthcare_activities.pdf
- [3] ČESKO. Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2001, částka 71, s. 4074-4113. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=3649>
- [4] ČESKO. Vyhláška č. 93/2016 Sb., o Katalogu odpadů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2016, částka 38, s. 1802-1831. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=49731>
- [5] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1357/2014 ze dne 18. prosince 2014, kterým se nahrazuje příloha III směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2014, L 365, s. 89-96. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1357&from=CS>
- [6] CENIA, ČESKÁ INFORMAČNÍ AGENTURA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Statistická ročenka životního prostředí České republiky 2017*. 2017. ISBN 978-80-87770-66-5. Dostupné také z: http://www1.cenia.cz/www/sites/default/files/Rocenka17/Statisticka_Rocenka_zivotniho_prostredi_CR%202017_tit.pdf
- [7] ČESKO. Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2001, částka 145, s. 8355-8420. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=3723>
- [8] ČESKO. Vyhláška č. 306/2012 Sb., o podmínkách předcházení vzniku a šíření infekčních onemocnění a o hygienických požadavcích na provoz zdravotnických zařízení a ústavů sociální péče. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2012, částka 109. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24731>
- [9] *Metodika pro nakládání s odpady ze zdravotnických, veterinárních a jim podobných zařízení* [online]. Státní zdravotní ústav, 2016, 130 s. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z:

- [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/nakladani_s_odpady_zdravotnictvi/\\$FILE/OODP-metodika_zdravotnicke_odpady-20170424.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/nakladani_s_odpady_zdravotnictvi/$FILE/OODP-metodika_zdravotnicke_odpady-20170424.pdf)
- [10] *Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration: DRAFT 1 (May 2017)* [online]. In: . European IPPC Bureau, 2017 [cit. 2019-02-24].
- [11] YAHIA, M. H. Development of Infrared Ray Sterilization Oven. *UKessays* [online]. 2019 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.ukessays.com/essays/biology/development-infrared-ray-sterilization-2915.php>
- [12] Autoclave Temperature and Time Pressure Chart. *Sterilizers.com* [online]. Alfa Medical, b.r. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://sterilizers.com/autoclave-time-temperature-pressure-chart.html>
- [13] Medical Waste Autoclaves: High Vacuum Biomedical Waste Autoclaves. In: *Bondtech Corporation* [online]. Bondtech Corporation, 2018 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://bondtech.com/medical-waste-autoclaves>
- [14] Large Waste Autoclave. In: *Tuttnauer: Sterilization and Infection Control* [online]. 2019 [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: <https://tuttnauer.com/medical-autoclaves/medical-waste-autoclaves/large-autoclave>
- [15] EMMANUEL, Jorge a Čestmír HRDINKA. *Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies in Europe* [online]. Verze 10. Praha: Health Care Without Harm Europe, 2004, 42 s. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: https://www.env-health.org/IMG/pdf/altech_Europe_updated_version_10_12_2004.pdf
- [16] Healthcare Waste: Oxylus Microwave Disinfection Unit. In: *Oxylus Ventures* [online]. b.r. [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: <https://www.oxylusven.com/our-waste-solutions/>
- [17] Znázornění sestavy spalovny Hoval GG. In: *Schiestl spol. s r.o.* [online]. Schiestl, b.r. [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: http://www.schiestl.cz/upload/images/spalovna_znazornenie.gif
- [18] SMĚRNICE RADY 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů. In: *ÚŘEDNÍ VĚSTNÍK EVROPSKÝCH SPOLEČENSTVÍ*. 1999, L 182, s. 228-246. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031&from=CS>
- [19] ČESKO. Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2005, částka 105, s. 5405-5410. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=4703>
- [20] PEUKERT, W. a C. WADENPOHL. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. *Powder Technology: An International Journal on the Science and*

- Technology of Wet and Dry Particulate Systems* [online]. Elsevier Science B.V, 2001, (118), 136-148 [cit. 2019-02-24]. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591001003047/pdf?md5=59b7fba7ed6b480de4f73565a97d3f0b&pid=1-s2.0-S0032591001003047-main.pdf>
- [21] SNIŽOVÁNÍ TUHÝCH EMISÍ. *Skupina ČEZ* [online]. ČEZ, a. s, 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovani_5.html
- [22] EVECO BRNO, S.R.O., . TECHNOLOGIE KE SNIŽOVÁNÍ EMISÍ: (SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ K OMEZOVÁNÍ EMISÍ). *EKOMONITOR* [online]. b.r. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/2_tzl_filtrace_fin_oplzz_0.pdf
- [23] ZEVENHOVEN, R. 5.8. Filter system. KILPINEN, P. a R. ZEVENHOVEN. *CONTROL OF POLLUTANTS IN FLUE GASES AND FUEL GASES: Chapter 5: Particulates* [online]. Helsinki University of Technology, 2001, s. 32-58 [cit. 2019-02-24]. ISBN 951-22-5527-8.
- [24] Filtrační rukávce. In: *Filter-technics: Filtrační rukávce* [online]. b.r. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.filter-technics.be/cs/filtrani-rukavce-256.htm>
- [25] SHAH, K. P. *Working, Design Considerations and Maintenance of Bag Type Fabric Filters* [online]. b.r., , 50 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Working-Design-Considerations-and-Maintenance-of-Bag-Type-Fabric-Filters.pdf>
- [26] *Ochrana ovzduší: Odsiřování* [online]. České vysoké učení technické, b.r. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Ochrana%20ovzdusi/Odsirovani.pdf>
- [27] Lesson 7: Dry Scrubbing Systems. JOSEPH, G. T. a D. S. BEACHLER. *Scrubber Systems Operation Review: Self-Instructional Manual* [online]. 2. edice. North Carolina State University, 1998, 7.1-7.28 [cit. 2019-02-24].
- [28] Chapter 2.3 - Medical Waste Incineration. *AP 42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors: Stationary Point and Area Source* [online]. 5. edice. US Environmental Protection Agency, 1995 [cit. 2019-02-23].
- [29] FLUE GAS CLEANING RETROFIT: GUIDELINE FOR ASSESSMENT AND DESIGN RECOMMENDATIONS. In: *EPPSA Report* [online]. European Power Plant Suppliers Association, 2015 [cit. 2019-02-24].
- [30] SCHNELLE, Karl B. a Charles A. BROWN. *Air pollution control technology handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493-9588-7.

- [31] SINOx® honeycomb SCR catalyst in low, medium and high cell densities. In: *Johnson Matthey* [online]. Johnson Matthey Stationary Emissions Control, 2017 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.jmsec.com/air-pollution-solutions/selective-catalytic-reduction-denox-system/scr-catalyst-sinoxr-honeycomb/>
- [32] GAL, P., D. JECHA, J. JÍCHA a P. STEHLÍK. Selective Non-catalytic Reduction (SNCR) and its Efficiency with Respect to Various Combustion Parameters. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS* [online]. AIDIC, 2017, (56), 1915-1920 [cit. 2019-02-24]. DOI: 10.3303/CET1756320. ISSN 2283-9216.
- [33] SHIN, M. S., H. S. KIM a D. S. JANG. Numerical study on the SNCR application of space-limited industrial boiler. *Applied Thermal Engineering* [online]. Elsevier Ltd., 2007, (27), 2850-2857 [cit. 2019-02-24]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: https://ac.els-cdn.com/S1359431106002948/1-s2.0-S1359431106002948-main.pdf?_tid=2e20aa5a-08a0-497c-a274-0037cbe8a6b1&acdnat=1550998164_bcdcc8fa23a65818037538ed2af3663a
- [34] PETRLÍK, J. a P. VÁLEK. Dioxiny (PCDD/PCDF). *Arnika* [online]. 2014 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://arnika.org/dioxiny-pcdd-pcdf>
- [35] SMĚRNICE 2000/76/ES EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY ze dne 4. prosince 2000 o spalování odpadů. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2000, L 332, s. 91-101. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0076&from=CS>
- [36] *GORE* [online]. W. L. Gore & Associates, Inc., 2019 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.gore.com/>
- [37] NOx and NH3 Catalytic Filter Bags. In: *Filter Bags for the Waste-to-Energy Industry* [online]. W. L. Gore & Associates, Inc., 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.gore.com/products/nox-and-nh3-filter-bags>
- [38] Ceramics. *CLEAR EDGE: Filtration Group* [online]. Clear Edge, 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.clear-edge.com/products/ceramics/>
- [39] Referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách (BREF). *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. MPO, 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/referencni-dokumenty-o-nejlepsich-dostupnych-technikach-bref-143226/>
- [40] Seznam spaloven odpadů v ČR. In: *Český hydrometeorologický ústav: Oddělení emisí a zdrojů Oddělení emisí a zdrojů* [online]. ČHMÚ, 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/emise/spalovny/spalovny.xls>

- [41] Informace o spalovnách za rok 2017. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. ČHMÚ, 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/incinerators/index_CZ.html
- [42] *EVECO Brno* [online]. EVECO Brno, 2014 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.evecobrno.cz/>
- [43] HANUS, J. *Systémové řešení pro energetické využití zdravotnických odpadů*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Krňávek.
- [44] *IBIDEN Ceram* [online]. IBIDEN, b.r. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.ceram-ibiden.com/>
- [45] KREJČÍ, T. *Středotonážní spalovna odpadu - systém čištění spalin*. Brno, 2015, 81 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103070. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Bebár, CSc.
- [46] *Clear Edge: Filtration Group* [online]. Clear Edge., 2019 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.clear-edge.com/>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Schémata koncepčních návrhů systému čištění spalin

A: Varianta č. 1

B: Varianta č. 2

Příloha č. 2: Bilanční schémata W2E

A: V170286_01 - Bilanční schéma W2E - varianta č. 1

B: V170286_02 - Bilanční schéma W2E - varianta č. 2

Příloha č. 3: Grafická schémata materiálových bilancí

A: Varianta č. 1

B: Varianta č. 2

Příloha č. 4: Schéma celkové technologie spalovny zdravotnického odpadu