

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**SEPARACE RTUTI ZE SPALIN
VE SPALOVNĚ ODPADU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bohata** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **473697**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Procesní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Separace rtuti ze spalin ve spalovně odpadu

Název diplomové práce anglicky:

Separation of mercury from flue gas in a waste incineration plant

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši na téma výskytu rtuti ve spalinách ze spaloven různých druhů odpadů a také technologií, které umožňují rtuť ze spalin separovat. Pro vybranou spalovnu odpadu popište stávající stav použité technologie pro čištění spalin a navrhněte úpravy tak, aby bylo možné separovat i rtuť. Vytvořte technologické schéma upravené technologie, zpracujte základní bilanci a odhadněte investiční a důležité provozní náklady upravené technologie. Pokud existuje více variant technologických úprav, porovnejte zvolené varianty a zdůvodněte, která z variant je nevhodnější pro danou spalovnu.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní rešerše a dle doporučení vedoucích.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Moravec, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **18.09.2022**

Ing. Jiří Moravec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Jiřího Moravce, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

V této části bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Moravci, Ph.D. a Ing. Jiřímu Vladykovi za trpělivost, vedení a odbornou pomoc při tvorbě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval pedagogům z Ústavu procesní a zpracovatelské techniky za výbornou a velmi pestrou přípravu studentů do profesního života.

ABSTRAKT

Tématem této práce je návrh technologie pro separaci rtuti ze spalin ve spalovně odpadu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Na základě zjištěných informací v teoretické části je v praktické části navržena technologie separace rtuti ze spalin.

ABSTRACT

The topic of this thesis is the design of a technology for the separation of mercury from flue gas in a waste incinerator. The work is divided into a theoretical and a practical part. Based on the information found in the theoretical part, the technology for removing mercury from the flue gas is proposed in the practical part.

KLÍČOVÁ SLOVA

rtuť, separace rtuti, emise rtuti, aktivní uhlí, spotřeba aktivního uhlí, spaliny, spalovny odpadu, životní prostředí

1	Úvod	4
2	Problematika rtuti	5
2.1	Účinky na lidský organismus.....	5
2.2	Zdroje emisí rtuti.....	5
2.3	Složení odpadu ve spalovnách odpadu	6
2.4	Zastoupení rtuti ve spalinách	8
2.5	Měření emisí rtuti.....	8
2.5.1	Měření kapalné fáze	9
2.5.2	Měření pevné fáze.....	9
2.5.3	Měření plynné fáze	9
2.5.4	Atomová absorpční spektrometrie	11
2.5.4.1	Atomizátor	11
2.5.4.2	Zdroj záření.....	11
2.5.4.3	Monochromátor	13
2.5.4.4	Detektor	13
3	Legislativa	14
3.1	Legislativa České republiky.....	14
3.2	Legislativa Evropské unie.....	16
4	Technologie separace rtuti.....	19
4.1	Adsorpce rtuti na pevném loži	20
4.2	Adsorpce rtuti na rozprášeném sorbentu (vstříkování).....	21
4.3	Tuhý polymerní katalyzátor (SPC)	21
4.4	Mokrý pračka	22
4.5	Výběr technologie.....	22
5	Adsorpce rtuti na rozprášeném sorbentu (vstříkování).....	23
5.1	Aktivní uhlí	23
5.1.1	Bezpečnostní rizika.....	25

5.2	Faktory spalin ovlivňující separaci rtuti	27
5.2.1	Vliv přítomnosti chlóru ve spalinách	28
5.2.2	Vliv přítomnosti SO ₂ ve spalinách.....	28
5.2.3	Vliv teploty	29
5.3	Faktory aktivního uhlí ovlivňující separaci rtuti.....	29
5.3.1	Vliv velikosti částic aktivního uhlí	29
5.3.2	Impregnace aktivního uhlí	30
5.3.3	Vliv množství dávkovaného aktivního uhlí	30
5.4	Způsoby zachycení rtuti adsorbované na aktivním uhlí	36
5.4.1	Elektrostatický odlučovač.....	37
5.4.2	Látkový filtr	38
5.4.3	Srovnání látkového filtru a elektrostatického odlučovače	39
5.5	Dávkování partikulárního materiálu	40
5.6	Doprava partikulárního materiálu	44
6	Praktická část.....	46
6.1	Popis současného stavu.....	46
6.2	Zadané parametry spalin.....	47
6.3	Požadované parametry spalin na výstupu z technologie čištění spalin.....	48
6.4	Návrh řešení separace rtuti ze spalin	48
6.5	Výpočet spotřeby aktivního uhlí.....	49
6.5.1	Výpočet spotřeby aktivního uhlí podle poměru AC/fly ash	51
6.5.2	Výpočet spotřeby aktivního uhlí podle poměru C/Hg	52
6.5.3	Stanovení spotřeby aktivního uhlí	52
6.6	Stanovení typu aktivního uhlí	54
6.7	Způsob skladování a dávkování aktivního uhlí	55
6.7.1	Způsob skladování aktivního uhlí	55
6.7.2	Způsob dávkování aktivního uhlí.....	56

6.7.2.1	Návrh regulace dávkování aktivního uhlí.....	57
6.8	Vstřikování aktivního uhlí	59
6.9	Kontaktor	62
6.10	Látkový filtr	64
6.11	Měření emisí rtuti.....	65
6.12	Odhad investičních nákladů	66
6.13	Odhad provozních nákladů	67
6.14	Diskuze	70
7	Závěr.....	71
	Použitá literatura	72
	Seznam symbolů a zkratek.....	76
	Seznam tabulek	77
	Seznam obrázků	78
	Přílohy.....	79

1 ÚVOD

Tématem diplomové práce je separace rtuti ze spalín ve spalovně odpadu. Jedná se o stěžívaditelné společenské téma, které se dotýká nejen obyvatel v blízkosti dané spalovny, ale také obyvatel ve vzdálenějších místech od spalovny, v některých případech i obyvatel za hranicemi České republiky. Separace rtuti ze spalín je tématem dob minulých, současných, a hlavně budoucích. Z důvodu narůstajícího množství produkovaného odpadu vzniká i otázka, jakým způsobem bude probíhat jeho redukce. Jedno z mnoha řešení na tuto otázku je jeho spalování, kterým se nejen získá redukce odpadu, ale také i energie, jenž je v nynějších dobách velmi diskutované téma. Ovšem na druhou stranu je nutné nepřehlížet negativní věci, které toto řešení s sebou přináší. Mezi tyto negativní věci patří vznik škodlivých spalín, které jsou nutné vyčistit na takovou mez, která je přípustná a akceptovatelná pro udržitelný stav životního prostředí. I když škodlivé spaliny vypadají zprvu jako negativní produkt spalování, lze se na ně dívat i jiným pohledem, a to jako na příležitost pro kontrolované zachycování látek znečišťujících životní prostředí. Odpad disponující znečišťujícími látkami pro životní prostředí, které jsou velmi obtížně odbouratelné přímo z odpadu, se převedou procesem spalování do spalín a poté pomocí dnešních technologií lze tyto znečišťující látky velmi efektivně odloučit ze spalín. Mezi tyto kontaminanty patří i rtuť, která byla v minulých dobách legislativně upozaděna a v dnešní době patří mezi diskutované téma, které je nutné řešit.

Diplomovou práci lze rozdělit na dvě hlavní části. První část diplomové práce se zabývá hledáním dostupných informací, které se zabývají problematikou separací rtuti ze spalín. V druhé části diplomové práce se využijí nalezené informace z první části pro návrh řešení separace rtuti ze spalín ve spalovně odpadu v Trmicích.

2 PROBLEMATIKA RTUTI

2.1 ÚČINKY NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Rtuť a její sloučeniny patří mezi těžké kovy, které mají velmi negativní vliv na životní prostředí. Výskyt rtuti v přírodě je vážný problém, neboť se jedná o velmi silný neurotoxin, který ovlivňuje celý potravinový řetězec. Do kontaktu s lidským organismem se rtuť může dostat několika způsoby, např. inhalací par rtuti, nebo konzumací vodních živočichů, do kterých se rtuť dostává ze znečištěných vodních ekosystémů [1].

Přítomností rtuti v lidském těle dochází k poškození nervové soustavy, ledvin, dýchacích cest a zhoršení krevetvorby. Dále má negativní vliv na imunitní systém, reprodukci a vývoj člověka. Intoxikace člověka rtutí může vést v nejhorším případě i ke smrti [1]. Zúžením zorného pole, atrofií mozkové kůry, poruchami chování, řeči, polykáním nebo svalovým třesem se mohou projevat symptomy intoxikací rtutí. Pro rtuť je typické, že na rozdíl od ostatních těžkých kovů má rozdílné fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti. Z tohoto důvodu mají jednotlivé formy rtuti rozdílné toxické účinky na lidský organismus. Například pro ledviny je více toxická rtuť v anorganické formě, naopak pro nervový systém je toxicitější rtuť ve formě organokovových sloučenin [2]. Do lidského organismu se rtuť nejčastěji a nejnáze dostane inhalací par rtuti, kdežto rtuť v kapalně formě je špatně absorbována kůží a zažívacími orgány [1].

2.2 ZDROJE EMISÍ RTUTI

Emise rtuti vznikají buď přírodní činností (např. vulkanizační činnost) nebo antropogenní činností. V práci [2] se uvádí, že přírodní zdroje emisí jsou srovnatelné s antropogenními emisemi. Naopak v práci [1] se uvádí, že antropogenní zdroje emisí rtuti činí 60-80 % celkových emisí. Celosvětové emise rtuti z antropogenních zdrojů byly v roce 2005 odhadovány na 3 000 tun/rok, přičemž 30 % bylo tvořeno ze spalování uhlí [3].

Mezi základní antropogenní zdroje emisí rtuti patří:

- spalování fosilních paliv,
- spalování komunálního a nebezpečného odpadu,
- kremace,
- výroba cementu a vápna,

- výroba železa, oceli a litiny,
- výroba chlóru, alkálií elektrolytickým procesem se rtuťovými elektrodami,
- výroba skla,
- těžba uhlí a vzácných kovů.

Nejdůležitější antropogenní zdroj emisí rtuti je spalování fosilních paliv, jednak kvůli vyprodukovanému množství, ale také z důvodu toho, že rtuť se ze spalování fosilních paliv dostává do životního prostředí v plynné formě. Nejenom z tohoto důvodu atmosféra zaujímá pro šíření rtuti zásadní roli. V atmosféře je rtuť přítomna z 95 % ve formě elementární (kovové) rtuti Hg^0 a tato forma v atmosféře dokáže setrvat od několika dnů až po dobu 2 let [3]. Díky své stabilitě, dlouhým cyklům přeměn a povětrnostním podmínkám dokáže elementární rtuť kontaminovat oblasti na dlouhé vzdálenosti od zdroje emisí. Například skandinávské země byly v minulosti poškozovány dálkovým přenosem rtuti z jiných zemí Evropy. Zbylých 5 % rtuti je tvořeno oxidovanou formou rtuti Hg^{2+} . Oxidovaná rtuť je na rozdíl od elementární rtuti Hg^0 dobře rozpustná ve vodě, a tudíž je z atmosféry odstraňovaná pomocí dešťů nebo usazováním na pevných částicích [3].

I když spalováním fosilních paliv je do atmosféry vypouštěno největší množství rtuti, je nutné podotknout, že je známo přesné složení spalovaného paliva, tudíž lze poté účelně a efektivně dimenzovat technologie pro čištění vznikajících spalin. Naproti tomu při spalování komunálního nebo jiného odpadu není většinou známo složení odpadů a bývá také velmi různorodé. Z tohoto důvodu je velmi obtížné dimenzovat účelně a efektivně technologie pro čištění vznikajících spalin.

2.3 SLOŽENÍ ODPADU VE SPALOVNÁCH ODPADU

Spalované odpady ve spalovnách odpadů lze rozdělit na 4 základní skupiny:

- a) komunální odpad,
- b) nebezpečný odpad,
- c) čistírenské kaly,
- d) odpad ze zdravotnictví [4].

V komunálním odpadu se rtuť vyskytuje např. v teploměrech, fluorescentních zářivkách, bateriích, spínačích nebo relé. Snížení rtuti v komunálním odpadu lze docílit již efektivním tříděním komunálního odpadu, což může zajistit už producent odpadu [4]. Pro snazší

rozpoznatelnost výrobků, které obsahují sloučeniny rtuti, může napomoci i samotný výrobce, který efektivně upozorní producenta odpadu na přítomnost rtuti ve výrobcích [4].

Jak plyne již z názvu, tak nebezpečný odpad vyžaduje pro svou nebezpečnost zvýšenou znalost o původu a případně přesné složení tohoto odpadu, na základě čehož se stanoví způsob likvidace. Nebezpečný odpad se likviduje buďto v komerčních nebo specializovaných spalovnách [4]. Komerční spalovny provozují nebo vlastní soukromé společnosti nebo obce a jejich znakem je, že spalovaným odpadem není pouze nebezpečný odpad, ale také jiné druhy odpadů. Specializované spalovny provozují obvykle provozovny, které přímo produkují nebezpečný odpad a mají znalosti o povaze a složení tohoto odpadu.

Čistírenské kaly se vyznačují vysokou koncentrací těžkých kovů. Typické složení čistírenských kalů lze vidět v Tab. 1.

Tab. 1 - Typické složení čistírenských kalů [4]

složka	komunální čistírenské kaly	průmyslové čistírenské kaly
sušina [%]	10-45	
organický materiál [% sušiny]	45-85	
kovy [mg/kg sušiny]		
Cr	20-77	170
Cu	200-600	1 800
Pb	100-700	40
Ni	15-50	170
Sb	1-5	< 10
Zn	500-1 500	280
As	5-70	< 10
Hg	0,5-4,6	1
Cd	1-5	< 1
Mo	4-20	

Odpad ze zdravotnictví se zařazuje do samostatné skupiny, neboť se jedná o velmi specifický druh odpadu. Tento druh odpadu vyžaduje specifickou manipulaci a spalování, neboť obsahuje takové látky jako je krev, infikované materiály, injekční jehly nebo zbytky po operacích, plasty a jiné [4]. Proto je nutné dbát při manipulaci zvýšenou opatrnost a dlouhé doby spalování, které zajistí dokonalé vyhoření a přijatelnou kvalitu tuhých zbytků [4].

Rtuť se může v tuhých odpadech vyskytovat buď ve formě kovu nebo může být chemicky vázaná ve formě různých anorganických a organických sloučenin. V tuhých odpadech se nejčastěji vyskytuje ve formě anorganických solí (Hg_2Cl_2 , $\text{HgO}/\text{Hg}(\text{OH})_2$, HgS) a organických sloučenin (CH_3HgCl , CH_3HgOH) [5].

2.4 ZASTOUPENÍ RTUTI VE SPALINÁCH

Rtuť patří mezi nejtěkavější stopové prvky, tudíž během spalování snadno přechází ze spalovaného paliva do spalin ve formě plynné elementární rtuti Hg^0 . V práci [3] se uvádí, že v ložovém popelu se zachytí zhruba 2 % celkového množství rtuti vyskytující se v palivu. Dále se v této práci uvádí, že zhruba 75 % celkového množství rtuti přítomné v palivu přechází během spalování do plynné formy a je unášeno spalinami z kotle. V práci [6] je odhadované množství rtuti, která přechází do plynné fáze, ještě vyšší, konkrétně 79-87 % celkového množství rtuti přítomné v palivu. Obecně lze říct, že ve spalinách z uhelné elektrárny se rtuť vyskytuje v koncentracích $10\text{-}40 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, u spalin z komunálního odpadu se rtuť vyskytuje v koncentracích $200\text{-}1\,000 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ a je zastoupena ze 75-85 % jako HgCl_2 , z 10-20 % jako Hg^0 a z 1-5 % z organortuťnatých sloučenin [3].

2.5 MĚŘENÍ EMISÍ RTUTI

Měření a vyhodnocení rtuti a jejích sloučenin je velmi komplexní problém, který vyžaduje jak přesnost měřicí techniky, výběr vhodné metody, tak i odbornost obsluhy, která dbá na dodržení příslušných postupů zvolené metody. Existuje mnoho metod pro stanovení množství rtuti, avšak v dnešní době převládají spektroskopické metody, které jsou velmi citlivé [7]. Pro efektivnější odstraňování rtuti ze spalin je důležité znát jednotlivé formy rtuti a jaká forma rtuti ve spalinách převládá. Proto se provádí tzv. speciace rtuti, tj. stanovení jednotlivých forem rtuti přítomných ve spalinách.

Způsoby měření rtuti lze rozdělit dle několika hledisek:

dle typu fáze média, kterou rtuť znečišťuje:

- a) měření pevné fáze,
- b) měření kapalně fáze,
- c) měření plynné fáze,

dle intervalu odebrání vzorků:

- a) jednorázové měření,
- b) kontinuální měření,

dle stanovení rtuti:

- a) stanovení celkové rtuti,
- b) stanovení jednotlivých forem rtuti, tzv. speciace.

2.5.1 MĚŘENÍ KAPALNÉ FÁZE

Pro stanovení emisí rtuti ve vodě existují standardizované postupy, např. ČSN EN ISO 12846 [8]. Tento postup popisuje dvě metody pro stanovení koncentrace rtuti v pitné, povrchové, podzemní, dešťové a odpadní vodě po vhodné digesci. První metodou je metoda se zkoncentrováním, která se využívá pro rozsah koncentrace od 0,01 $\mu\text{g/l}$ do 1 $\mu\text{g/l}$. Tato metoda je popsána v kapitole 6 této normy. Druhou metodou je metoda bez zkoncentrování, která se využívá pro koncentrace od 0,05 $\mu\text{g/l}$. Tato metoda je popsána v kapitole 7 této normy. Digeste znamená rozklad všech sloučenin rtuti ve vzorcích. Pro stanovení nízkých koncentrací rtuti až do 0,002 $\mu\text{g/l}$ bez zkoncentrování lze využít metodu atomové fluorescenční spektrometrie (AFS) [8].

2.5.2 MĚŘENÍ PEVNÉ FÁZE

Pro stanovení emisí rtuti v půdě existují standardizované a nestandardizované postupy. Do standardizovaných postupů patří např. metoda ISO 16772:2004 [9]. Jedná se o postup, který využívá pro získání extraktu lučavku královskou podle ISO 11464 a ISO 11466. Pro stanovení koncentrace rtuti se využívá atomová absorpční spektrometrie s generováním studených par CVAAS nebo atomová fluorescenční spektrometrie s generováním studených par CVAFS.

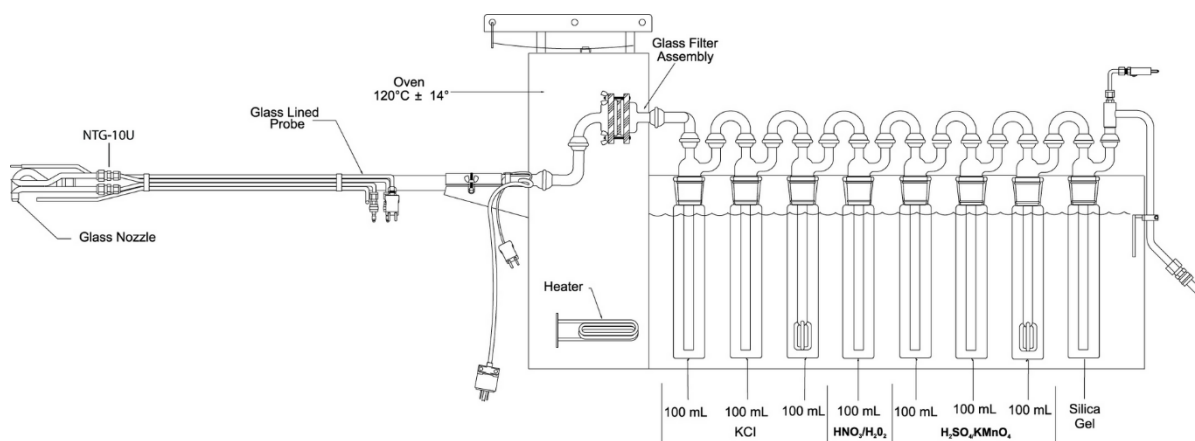
2.5.3 MĚŘENÍ PLYNNÉ FÁZE

V odpadních plynech se rtuť vyskytuje ve 3 formách, tj. oxidovaná, elementární a partikulární, která představuje rtuť vázanou na popílek. Stanovení podílů (speciáci) těchto 3 forem rtuti v odpadním plynu je problematické.

Celkovou hmotnostní koncentraci rtuti v odpadních plynech ze spaloven odpadů lze stanovit normovanou manuální metodou ČSN EN 13211 [10]. Touto normou lze stanovit celkovou hmotnostní koncentraci rtuti v rozsahu 0,001 až 0,5 mg/m^3 . Požadavkem této metody je izokinetický odběr z důvodu nestability podílu mezi jednotlivými formami [7].

Odběr vzorku je nutné provést jedním zařízením, jehož základními částmi jsou dva sériově zapojené absorbéry a filtr. Absorbéry lze plnit roztokem manganistanu draselného a kyseliny sírové (2% KMnO_4 a 10% H_2SO_4) nebo roztokem dichromanu draselného a kyseliny dusičné (4% $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a 20% HNO_3). Partikulární rtuť se zachycuje na filtru. Oxidovaná a elementární rtuť se zachycuje v absorbérech. Mineralizace podílu na filtru se provádí nejdříve rozpuštěním pomocí směsi HNO_3 a HF. Poté se přidá kyselina boritá pro vytvoření komplexních sloučenin a následně je roztok zahříván buďto v sušárně, mikrovlnné troubě, nebo na horké desce. Analýza celkové hmotnostní koncentrace rtuti v získaných roztocích se provádí metodou CVAAS podle ČSN EN 12846 [7].

Pro stanovení jednotlivých podílů rtuti v odpadním plynu se využívá standardizovaná metoda Ontario-Hydro (ASTM D6784-16) [11]. Schéma této metody lze vidět na Obr. 1. Jako u metody ČSN EN 13211, tak i při této metodě musí být zajištěn izokinetický odběr vzorku. Dalším požadavkem je filtrování TZL (tuhé znečišťující látky) při teplotě nejméně $120\text{ }^\circ\text{C}$, jenž zajišťuje vytápěná sonda. Při filtraci musí být zajištěno, aby teplota vytápěné sondy byla podobná s teplotou odebíraného vzorku. Po filtraci následuje promývání vzorku v osmi sériově zapojených promývačkách. První tři promývačky jsou naplněny vodným roztokem chloridu draselného KCl, čtvrtá promývačka je naplněna směsí kyseliny dusičné a peroxidu vodíku $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, pátá až sedmá promývačka je naplněna směsí manganistanu draselného a kyseliny sírové $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ a v poslední promývačce je silikagel. Speciace rtuti touto metodou je provedena následujícím způsobem. Zachycená rtuť na filtru je označena jako partikulární rtuť. V promývačkách s vodným roztokem chloridu draselného KCl se zachytí rtuť označená jako oxidovaná rtuť. V promývačkách s roztoky $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ a $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ se zachycená rtuť označuje jako elementární rtuť. Množství rtuti zachycené v jednotlivých promývacích stupních je pak stanovováno pomocí atomové absorpční spektrometrie.



Obr. 1 - Schéma zařízení pro odběr vzorku metodou Ontario-Hydro [12]

2.5.4 ATOMOVÁ ABSORPČNÍ SPEKTROMETRIE

Pro stanovení celkové koncentrace rtuti ve zkoumaném vzorku se využívá absorpce záření volnými atomy stanovovaného prvku. Tento jev lze popsat veličinou absorbance, která je přímo úměrná koncentraci volných atomů prvku, které záření absorboval. Ke stanovení celkové koncentrace rtuti se využívá měření absorpce záření na rezonanční čáře 253,7 nm. Základními částmi zařízení atomové absorpční spektrometrie jsou zdroj záření, atomizátor stanovovaného prvku, monochromátor a detektor.

2.5.4.1 ATOMIZÁTOR

Absorbující prostředí je vytvořeno pomocí atomizátoru, kterým se převádí zkoumaný vzorek do plynného atomárního stavu. Generování plynného atomárního stavu lze dosáhnout několika způsoby, např. plamenem, píčkou nebo v případě rtuti chemickou redukcí.

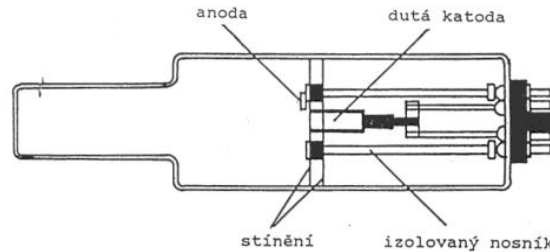
Pro chemickou redukcí rtuti je do vzorku přidán buď chlorid cínatý SnCl_4 nebo tetrahydridoboritan sodný NaBH_4 . Uvolněné páry jsou odváděny pomocí inertního plynu do prostoru, ve kterém dochází k prozáření těchto par zdrojem záření.

2.5.4.2 ZDROJ ZÁŘENÍ

V atomové absorpční spektrometrii je nutné využívat záření s úzkým intervalem vlnových délek, a proto se výhradně používají čárové zdroje záření:

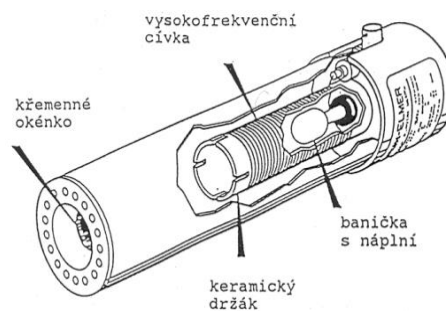
- a) výbojka s dutou katodou,
- b) bezelektrodová výbojka,
- c) superlampa.

Konstrukční provedení výbojky s dutou katodou lze vidět na Obr. 2. Výbojka je plně utěsněna a naplněna inertním plynem. Katoda je převážně tvořena jedním prvkem, který je shodný s prvkem, jehož koncentrace se stanovuje. Záření je produkováno doutnavým výbojem, který vzniká při přívodu elektrického napětí na elektrody. Nevýhodou duté katody je její krátká životnost [14].



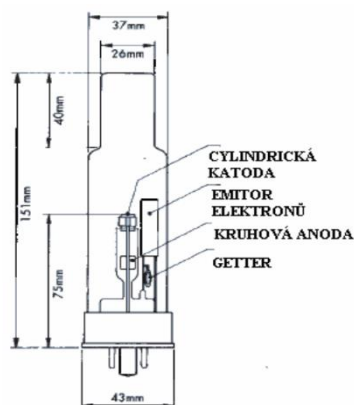
Obr. 2 - Výbojka s dutou katodou [13]

Konstrukční provedení bezelektrodové výbojky lze vidět na Obr. 3. Výbojka se skládá z vysokofrekvenční cívky, keramického držáku, křemenného okénka a křemenné baničky s náplní, jehož koncentrace se stanovuje. Záření je produkováno prstencovým výbojem, jenž je vytvořen mezi baňkou a vysokofrekvenční cívkou. Tento typ výbojky vyžaduje přesně stabilizovaný zdroj vysokofrekvenčního elektromagnetického pole [15].



Obr. 3 - Bezelektrodová výbojka [13]

Superlampa, jejíž schéma lze vidět na Obr. 4, pracuje na podobném principu jako výbojka s dutou katodou. Pro vznik záření využívá doutnavý výboj, ke kterému dochází mezi cylindrickou katodou a kruhovou anodou, jež je umístěna pod katodou. Pro dosažení vyšší intenzity záření slouží emitor elektronů, který bombarduje cylindrickou katodu elektrony.



Obr. 4 - Superlampa [16]

Výhodou superlampy je nižší pořizovací cena než bezelektrodové výbojky a disponuje vyšší životností než výbojka s dutou katodou [14].

2.5.4.3 MONOCHROMÁTOR

Monochromátor je zařízení, které separuje požadovaný interval vlnových délek ze spektrálního pásma. Pro správnou analýzu je nutná správná volba šířky intervalu. Monochromátor se skládá ze soustavy zrcadel, mřížky a štěrbin.

2.5.4.4 DETEKTOR

Detektor slouží pro zpracování dopadajícího záření a stanovení absorbance. V detektoru dochází ke změně fyzikálních vlastností detektoru vlivem absorpce dopadajícího záření. Druh fyzikální vlastnosti, jenž se mění vlivem absorpce, závisí na druhu použitého detektoru [14]. Pro detekci dopadajícího záření se využívají tyto druhy detektorů:

- a) tepelné detektory,
- b) fotoelektrické detektory,
- c) fotochemické detektory.

Termistory, termočlánky a pyrometry patří do kategorie tepelných detektorů a pro měření absorbance využívají přeměnu energie dopadajícího záření na tepelnou energii. Fotodiody, fototranzistory a fotoodpory patří do kategorie fotoelektrických detektorů, které využívají pro měření absorbance přeměnu energie dopadajícího záření na elektrickou energii. Fotografické emulze patří do skupiny fotochemických detektorů, které využívají chemické reakce pro spotřebování dopadajícího záření.

3 LEGISLATIVA

V této kapitole je zmíněna legislativa ČR a EU zaměřující se na problematiku emisí rtuti ze spaloven odpadu.

3.1 LEGISLATIVA ČESKÉ REPUBLIKY

Do platné legislativy České republiky zaměřující se na problematiku emisí rtuti ze spaloven odpadů patří tyto zákony a vyhláška:

- 1) Zákon č. 17/1992 Sb. O životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů [17],
- 2) Zákon č. 76/2002 Sb. O integrované prevenci, ve znění pozdějších předpisů [18],
- 3) Zákon č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů [19],
- 4) Vyhláška č. 415/2012 Sb. O přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů [20].

Zákon č. 17/1992 Sb., ve znění pozdějších předpisů, definuje základní pojmy, základy ochrany životního prostředí, povinnosti osob pro ochranu životního prostředí a odpovědnost osob při poruše těchto povinností. Mezi základní pojmy patří:

- 1) Životní prostředí
 - (a) „Životním prostředím je vše, co vytváří přirozené podmínky existence organismů včetně člověka a je předpokladem jejich dalšího vývoje. Jeho složkami jsou zejména ovzduší, voda, horniny, půda, organismy, ekosystémy a energie.“ [17]
- 2) Znečišťování a poškozování životního prostředí
 - (a) „Znečišťování životního prostředí je vnášení takových fyzikálních, chemických nebo biologických činitelů do životního prostředí v důsledku lidské činnosti, které jsou svou podstatou nebo množstvím cizorodé pro dané prostředí.“ [17]
 - (b) „Poškození životního prostředí je zhoršování jeho stavu znečišťováním nebo jinou lidskou činností nad míru stanovenou zvláštními předpisy.“ [17]

Zákon č. 201/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů, definuje základní pojmy pro účely tohoto zákona a vyhlášky č. 415/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Dále stanovuje např.

přípustnou úroveň znečištění a znečišťování, posuzování a vyhodnocení úrovně znečišťování a nástroje ke snižování úrovně znečištění a znečišťování. Mezi definované pojmy patří:

1) Stacionární zdroj

(a) „*Ucelená technicky dále nedělitelná stacionární jednotka nebo činnost, které znečišťují nebo by mohly znečišťovat, nejde-li o stacionární technickou jednotku používanou pouze k výzkumu, vývoji nebo zkoušení nových výrobků a procesů.*“ [19]

2) Emisní limit

(a) „*Nejvýše přípustné množství znečišťující látky nebo skupiny znečišťujících látek vnášené do ovzduší ze stacionárního zdroje.*“ [19]

3) Emisní strop

(a) „*Nejvýše přípustné množství znečišťující látky vnesené do ovzduší za kalendářní rok.*“ [19]

Vyhláška č. 415/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů, je pro spalovnu nebezpečného odpadu důležitá, neboť pomocí této vyhlášky jsou definovány např. specifické emisní limity, způsob stanovení emisních limitů a intervaly pro zjišťování úrovně znečišťování k zákonu č. 201/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Povinnost spalovny nebezpečného odpadu řídit se touto vyhláškou je ustanoveno v § 19 této vyhlášky. Specifické emisní limity pro spalovnu nebezpečného odpadu jsou uvedeny v bodě 1. části I přílohy č. 4 k této vyhlášce. Emisní limity jsou stanoveny pro tyto znečišťující látky: TZL, NO_x, SO₂, TOC, HCl, HF, CO, Cd+Tl a jejich sloučeniny, Hg a její sloučeniny, Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V a jejich sloučeniny, PCDD/F.

Emisní limit pro Hg a její sloučeniny je stanoven na hodnotu koncentrace 0,05 mg/m³, jenž je vztažen k normálním stavovým podmínkám, suchým spalinám a referenčnímu obsahu kyslíku ve spalinách 11 % [20]. Emisní limit pro Hg a její sloučeniny se stanovuje primárně jednorázovým měřením [20].

Cílem zákona č. 76/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů, je zajistit nejvyšší možnou úroveň ochrany životního prostředí. Pomocí tohoto zákona jsou stanoveny např. povinnosti provozovatelů zařízení.

Vykonavatelem státní správy tohoto zákona je Ministerstvo životního prostředí, Ministerstvo průmyslu a obchodu, Ministerstvo zemědělství, Ministerstvo zdravotnictví,

krajské úřady, inspekce a krajské hygienické stanice. Důležitým paragrafem tohoto zákona je § 18 odst. 3, který uděluje povolujícímu úřadu lhůtu 4 let, během kterých musí provést přezkum všech závazných podmínek integrovaného povolení podle přílohy č. 1 tohoto zákona a dále musí během této doby zajistit na základě provedeného přezkumu, aby podmínky integrovaného povolení byly v souladu se závěry o nejlepších dostupných technikách a provozovatel byl povinen tyto podmínky dodržovat.

3.2 LEGISLATIVA EVROPSKÉ UNIE

Evropská unie vytváří legislativu týkající se ochrany životního prostředí a poté jednotlivé členské státy zapracovávají evropskou legislativu do své národní legislativy. Důvod zapracování evropské legislativy do národní legislativy je takový, aby všechny členské státy postupovaly v ochraně životního prostředí jednotně a nastavil se minimální standard pro ochranu životního prostředí.

Do legislativy Evropské unie, která se zabývá snižováním znečišťování životního prostředí stacionárními zdroji, patří směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrování prevence a omezování znečištění) [21]. Tato směrnice je zapracována do české legislativy např. v zákonech č. 76/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů, č. 201/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů a ve vyhlášce č. 415/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Pomocí této směrnice se stanovují pravidla, která vedou ke snížení emisí do ovzduší, vody a půdy vyplývající z průmyslových činností. S touto směrnicí jsou provázány referenční dokumenty o BAT (Best Available Techniques). Referenční dokument BAT je definován ve směrnici Evropského parlamentu a rady 2010/75/EU:

(a) „Dokument, jenž je výsledkem výměny informací uspořádané podle článku 13, je vypracován pro určené činnosti a popisuje zejména použité techniky, současné úrovně emisí a spotřeby, zvažované techniky pro určení nejlepších dostupných technik, jakož i závěry o BAT a jakékoli nově vznikající techniky, se zvláštním přihlédnutím ke kritériím uvedeným v příloze III.“ [21]

Pro každé odvětví průmyslu, které produkuje znečišťující, je vytvořen referenční dokument o BAT. Seznam všech referenčních dokumentů o BAT je uveden vždy na začátku každého tohoto dokumentu. Na základě rozhodnutí Evropské komise jsou referenční dokumenty o BAT aktualizovány nejpozději 8 let po zveřejnění předchozí verze [21].

Závěry o BAT patří do legislativy Evropské unie, která se zabývá snižováním emisí znečišťujících látek. Tyto závěry jsou souhrnem nejdůležitějších informací z referenčních dokumentů o BAT. Pro každý referenční dokument o BAT jsou stanoveny dílčí závěry o BAT, jenž jsou samostatně schvalovány Evropskou komisí.

Pro spalovny odpadu jsou stanoveny závěry o BAT prováděcím rozhodnutím komise (EU) 2019/2010 ze dne 12. listopadu 2019 [22]. V tomto dokumentu jsou stanoveny nové emisní limity pro znečišťující látky vypouštěné do ovzduší. Nové emisní limity pro rtuť jsou uvedeny v Tab. 2. Tyto emisní limity je nutné dodržovat do 4 let od zveřejnění tohoto dokumentu.

Tab. 2 - Emisní limit Hg a její sloučenin stanovené prováděcím rozhodnutím komise (EU) 2019/2010 [22]

znečišťující látka	emisní limit [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$]		způsob stanovení emisního limitu
	nové zařízení	stávající zařízení	
Hg a její sloučeniny	< 5-20	< 5-20	denní průměr průměr za interval odběru vzorků
	1-10	1-10	dlouhodobý interval odběru vzorků

V odstavci BAT 31 prováděcího rozhodnutí komise (EU) 2019/2010 jsou uvedeny nejlepší dostupné techniky (BAT), které lze použít buď samostatně nebo v kombinaci pro snížení emisí rtuti do ovzduší ze spalování odpadu. Tyto BAT technologie lze vidět v následující Tab. 3, která je převzata i s popisky z prováděcího rozhodnutí komise (EU) 2019/2010.

Tab. 3 - Nejlepší dostupné techniky (BAT) pro snižování emisí rtuti, dle 2019/2010 [22]

technika	popis	použitelnost
pračka	<p>Pračka provozovaná při hodnotě pH okolo 1. Rychlost odstraňování rtuti u této techniky lze zvýšit přidáním činidel a/nebo adsorbentů do pracího roztoku, např.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Oxidantů, jako je peroxid vodíku, k přeměně elementární rtuti na oxidovanou formu rozpustnou ve vodě. - Sloučenin síry pro vytvoření stabilních komplexů nebo solí se rtutí. - Uhlíkového sorbentu pro adsorpci rtuti, včetně elementární rtuti. <p>Pokud je tato technika navržena s dostatečně vysokou vyrovnávací kapacitou pro zachycování rtuti, účinně zabráňuje výskytu špiček emisí rtuti.</p>	<p>Použitelnost může být omezena z důvodu nedostatku vody, např. v suchých oblastech.</p>
vstřikování suchého sorbentu	<p>Adsorpcí vstřikováním aktivního uhlí nebo jiných činidel, obecně kombinovaná s látkovým filtrem, přičemž se ve filtračním koláči vytvoří reakční vrstva a vzniklé tuhé látky se odstraňují.</p>	<p>Obecně použitelné.</p>
vstřikování speciálního vysoce reaktivního aktivního uhlí	<p>Vstřikování vysoce reaktivního aktivního uhlí obohaceného sírou nebo jinými činidly ke zvýšení reaktivity se rtutí.</p> <p>Vstřikování tohoto speciálního aktivního uhlí se obvykle neprovádí průběžně, ale jen v případě zjištění špičky emisí rtuti.</p> <p>Pro tento účel se technika může používat v kombinaci s průběžným monitorováním rtuti v surových spalinách.</p>	<p>Nemusí být použitelné u zařízení určených ke spalování čistírenských kalů.</p>
přidávání bromu do kotle	<p>Brom přidaný do odpadu nebo vstřikovaný do pece se při vysokých teplotách přeměňuje na elementární brom, který oxiduje elementární rtuť na vysoce adsorbovatelný HgBr_2 rozpustný ve vodě.</p> <p>Technika se používá v kombinaci s návaznou technikou snižování emisí, jako je pračka nebo systém vstřikování aktivního uhlí.</p> <p>Vstřikování bromidu se obvykle neprovádí kontinuálně, ale jen v případě zjištění špičky emisí rtuti. Pro tento účel se technika může používat v kombinaci s průběžným monitorováním rtuti v surových spalinách.</p>	<p>Obecně použitelné.</p>
adsorpcí na pevném nebo pohyblivém loži	<p>Pokud je tato technika navržena s dostatečně vysokou adsorpční kapacitou, účinně zabráňuje výskytu špiček emisí rtuti.</p>	<p>Použitelnost může být omezena celkovým poklesem tlaku spojeným se systémem čištění spalin. U stávajících zařízení může být použitelnost omezena nedostatkem prostoru.</p>

4 TECHNOLOGIE SEPARACE RTUTI

Způsoby snižování množství rtuti vypouštěné do atmosféry jsou částečně popsány v podkapitole 2.3 a Tab. 3. Základním přehledem technologií, které umožňují snižování emisí rtuti ze spalín, se zabývá tato kapitola.

Snižování množství rtuti vypouštěné do atmosféry lze dosáhnout primárními a sekundárními technikami [4]. Primární techniky se vyznačují tím, že snížení emisí rtuti vypouštěné do atmosféry dosahují prevencí. Prevence zahrnuje takové kroky, které zabraňují nebo alespoň snižují výskyt rtuti ve spalovaném odpadu. Mezi tyto kroky lze zařadit např. [4]:

- a) upozornění producenta odpadu, že výrobek, kterého se chce zbavit, obsahuje rtuť a je nutné ho recyklovat,
- b) zajištění dostatečného počtu sběrných míst, ve kterých může producent odpadu odevzdat výrobek obsahující rtuť,
- c) identifikace míst, ve kterých se produkuje odpad s vysokým obsahem rtuti,
- d) omezení příjmu potenciálního odpadu kontaminovaného rtutí.

Sekundární techniky se vyznačují tím, že už předpokládají výskyt rtuti ve spalovaném odpadu. Snižování emisí rtuti se proto dosahuje pomocí takových metod, které umožňují separaci rtuti ze spalín. Sekundární metody lze rozdělit následujícím způsobem:

- a) suchá separace rtuti ze spalín,
- b) mokrá separace rtuti ze spalín,
- c) techniky podporující suchou nebo mokrou separaci rtuti.

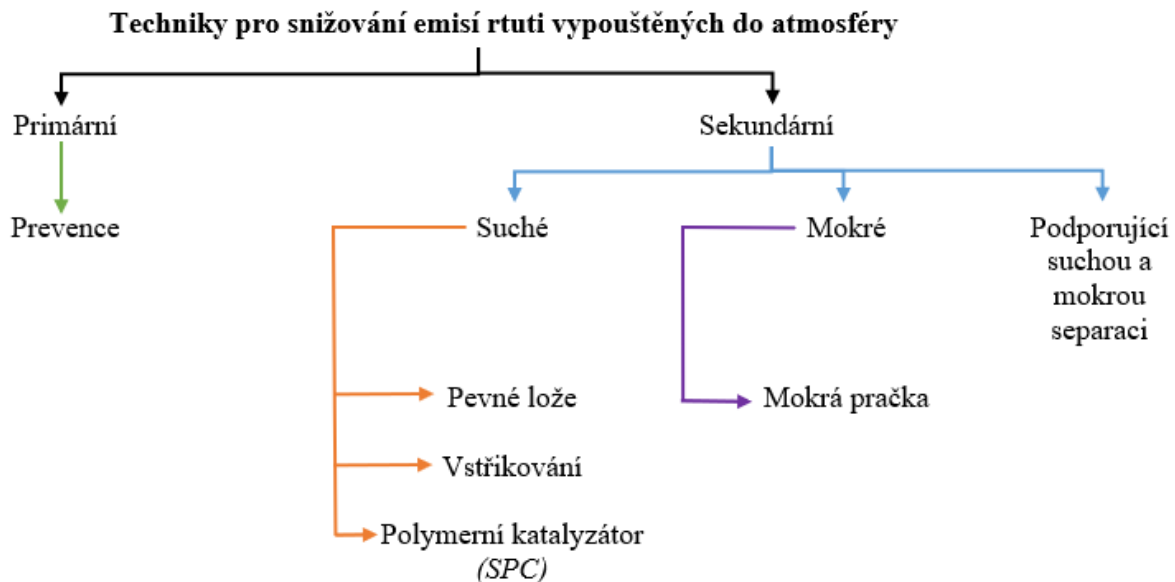
Principem suché separace rtuti ze spalín je adsorpce rtuti na povrchu sorbentu, který může být ve formě prášku nebo v tuhém stavu. Do suché separace rtuti ze spalín patří tyto technologie [4]:

- a) adsorpce rtuti na pevném loži,
- b) adsorpce rtuti na rozprášeném suchém sorbentu (vstříkování),
- c) adsorpce na tuhém polymerním katalyzátoru (SPC).

Mokrá separace rtuti je popsána v podkapitole 4.4. Techniky podporující suchou nebo mokrou separaci rtuti jsou takové techniky, které primárně podporují oxidaci elementární (kovové) rtuti na oxidovanou rtuť. Tyto techniky se používají v kombinaci s technologiemi suché nebo mokré separace rtuti. Mohou to být např. aditiva, která se přidávají do mokré

pračky (peroxid vodíku), dále obohacování aktivního uhlí sírou nebo přidávání boru do spalínového prostoru.

Pro lepší přehlednost je na Obr. 5 uvedeno souhrnné rozdělení technik používaných pro snižování emisí rtuti vypouštěných do atmosféry.



Obr. 5 - Rozdělení technik pro snižování emisí rtuti

Z důvodu toho, že primární techniky se zabývají snižováním emisí rtuti mimo spalovnu odpadu, tak se následující podkapitoly zabývají sekundárními technikami.

4.1 ADSORPCE RTUTI NA PEVNÉM LOŽÍ

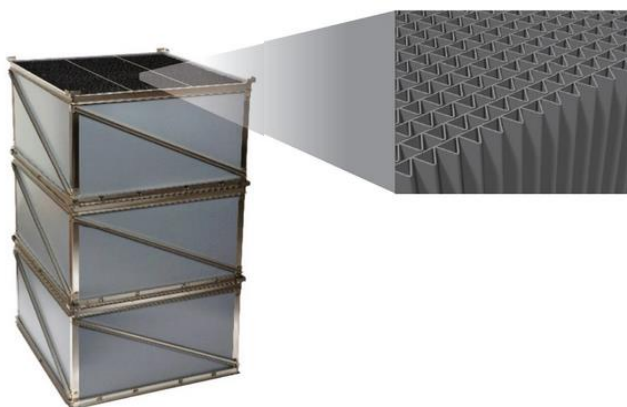
Adsorpce rtuti probíhá na povrchu sorbentu, který leží na pevném loži. Proces může probíhat buď v mokřém nebo suchém procesu. V případě mokřého procesu je lože protiproudě promýváno vodou. Pracovní teplota mokřého procesu se pohybuje v rozsahu 60-70 °C [4]. Pracovní teplota suchého procesu se pohybuje v rozsahu 80-150 °C [4]. Jako sorbent se používá lignitový koks nebo aktivní uhlí [4]. Výhodou této technologie je vysoká účinnost a vysoká spolehlivost. Nevýhodou této technologie je citlivost na tuhé znečišťující látky, dispoziční nároky, vyšší tlaková ztráta a nutnost odstávky technologie pro výměnu sorbentu.

4.2 ADSORPCE RTUTI NA ROZPRÁŠENÉM SORBENTU (VSTŘIKOVÁNÍ)

Adsorpce rtuti probíhá na povrchu suchého sorbentu, který se vstříkuje do vnitřního prostoru spalínovodu před zařízením separace tuhých znečišťujících látek (TZL). Pro záchyt TZL se nejčastěji používá látkový filtr nebo elektrostatický odlučovač. Pro adsorpci se využívá aktivní uhlí, popílek a minerální nebo vápenné sorbenty. Zvýšení účinnosti separace rtuti ze spalin lze dosáhnout např. impregnací sorbentů. V referenčním dokumentu BAT [4] je uvedeno, že se jedná o jednoduchou technologii s vysokou účinností. Výhodou této technologie je možnost dosáhnout emisí rtuti z komína nižší než $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. V případě impregnovaného aktivního uhlí je udáváno, že lze dosáhnout od 3 do $5 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ [4]. Mezi výhody patří malé dispoziční nároky, malý zásah do stávající technologie a pracovní flexibilita. Mezi nevýhody patří závislost spotřeby sorbentu na vlastnostech spalin a použitým odlučovacím zařízením pro tuhé znečišťující látky.

4.3 TUHÝ POLYMERNÍ KATALYZÁTOR (SPC)

Jedná se o technologii separace rtuti, která využívá tuhý polymerní katalyzátor (SPC). Na tento materiál se také současně adsorbují i SO_2 . SPC se umísťuje do tzv. modulů, které lze vidět na Obr. 6. Tyto moduly lze umísťovat za poslední stupeň absorbéru, nebo provozovat jako samostatný aparát. Maximální provozní teplota se udává $82 \text{ }^\circ\text{C}$ [23]. Výhodou této technologie je, že při adsorpci rtuti do SPC je vytvářena stabilní látka, která se nevyluhuje ani nedesorbuje [4]. Další výhodou patří dlouhá doba provozu, kdy lze moduly vyměnit až po několika letech. Mezi nevýhody lze uvést dispoziční nároky a malou provozní flexibilitu [4].



Obr. 6 - SPC modul od společnosti GORE [23]

4.4 MOKRÁ PRAČKA

Principem mokré separace rtuti ze spalin je absorpce rtuti do absorpčního roztoku. Pro mokrou separaci rtuti se využívají mokré pračky. Separace rtuti současně probíhá při absorpci kyselých složek spalin. Pro účinnou separaci rtuti ze spalin je nutné snižovat pH absorpčního roztoku pod hodnotu 1, avšak při separaci SO_2 ze spalin je nutné udržovat pH v rozsahu 6-8 [4]. Z tohoto důvodu se používají vícestupňové systémy mokrého praní, např. první stupeň separuje pouze HCl, HF a část SO_2 a druhý stupeň primárně separuje SO_2 . Proto je vhodné separovat rtuť v prvním stupni, kde je možné snížit pH pod hodnotu 1 [4]. Nevýhodou této technologie je možnost separovat pouze oxidovanou formu rtuti. Účinnost separace elementární (kovové) rtuti dosahuje 10 % [4]. Celková účinnost separace rtuti (elementární i oxidované) se udává okolo 85 % v závislosti na podílu elementární rtuti ve spalinách [4].

4.5 VÝBĚR TECHNOLOGIE

Na základě předchozích podkapitol bylo rozhodnuto, že tato práce se bude zabývat adsorpcí rtuti na rozprášeném sorbentu (vstříkování). Důvodem tohoto rozhodnutí je, že se podle [4] jedná o jednoduchou technologii, pomocí které lze zajistit výstupní emise rtuti pod $20 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. V případě potřeby lze výměnou za jiný typ aktivního uhlí dosáhnout výstupní emise rtuti pod hodnotu $5 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ [4]. Výhodou oproti adsorbéru s pevným ložem nebo SPC modulům jsou dispoziční nároky. Avšak mezi nevýhody technologie adsorpce rtuti na rozprášeném sorbentu patří např. kontaminace zachyceného popílku rtutí, požadavek dlouhé doby zdržení a závislost účinnosti separace rtuti na kvalitě rozprášení sorbentu ve spalinovodu. Při srovnání technologií vstříkování aktivního uhlí a mokré pračky je nevýhodou mokré pračky nízká účinnost separace rtuti a dále separace pouze oxidované formy rtuti.

5 ADSORPCE RTUTI NA ROZPRÁŠENÉM SORBENTU (VSTŘIKOVÁNÍ)

Při separaci rtuti ze spalin prostřednictvím aktivního uhlí se vyskytují dva procesy adsorpce. Prvním procesem je fyzikální adsorpce. Jedná se o proces, který se uplatňuje za nižších teplot. Fyzikální adsorpce využívá pro vázání rtuti na povrch aktivního uhlí van der Waalsovy síly. Druhým procesem je chemická adsorpce, která se uplatňuje v širokém rozsahu teplot. Principem chemické adsorpce je vázání rtuti na povrch aktivního uhlí pomocí chemické vazby. Při separaci rtuti ze spalin prostřednictvím aktivního uhlí se uplatňuje kombinace těchto procesů. Chemická adsorpce převládá za vyšších teplot, oproti tomu fyzikální adsorpce převládá za nižších teplot u neimpregnovaných aktivních uhlí.

Pro separaci TZL se nejčastěji používá látkový filtr nebo elektrostatický odlučovač. Pro efektivnější separaci rtuti je využíván přednostně látkový filtr, který na filtračním koláči umožňuje oproti elektrostatickému odlučovači delší dobu zdržení aktivního uhlí ve spalinách, respektive aktivní uhlí má delší čas pro reakci s přítomnou rtutí. Tímto se dosáhne vyšší účinnosti snížení emisí rtuti ze spalin než například v kombinaci s elektrostatickým odlučovačem [4].

Jak již bylo v odstavci výše zmíněno, na suchou separaci rtuti ze spalin má vliv doba zdržení aktivního uhlí ve spalinách, avšak nejedná se o jediný faktor, který ovlivňuje samotnou separaci. Vliv na separaci rtuti má mnoho dalších faktorů, ať už se jedná o probíhající reakce v samotném spalovacím prostoru nebo o reakce ve spalinovodech.

5.1 AKTIVNÍ UHLÍ

Jedná se o adsorbent, který dokáže účinně adsorbovat kontaminanty ze spalin. Aktivní uhlí se nejen využívá pro čištění spalin, ale také obecně pro všechny druhy tekutin. Aktivní uhlí disponuje grafitovou strukturou, která je složena z grafitových destiček. Na základě této struktury má aktivní uhlí velký vnitřní povrch, který se pohybuje v rozsahu od 400 do 1 500 m²/g [24]. Vnitřní struktura aktivního uhlí se rozděluje podle velikosti na mikropóry (menší než 1 nm), mezopóry (1-25 nm) a makropóry (větší než 25 nm).

Aktivní uhlí se podle typu aplikace rozděluje na několik kategorií. Může se rozdělit podle podílu pórů, kdy pro čištění plynů je zapotřebí aktivní uhlí disponující vysoce mikroporézní strukturou [25]. Pro čištění kapalin je nezbytná spíše sktruktura aktivního uhlí s rozvinutými

mezopóry a makropóry [25]. Aktivní uhlí se dále rozděluje podle velikosti a tvaru na práškové, granulované a tvarované.

Vlastnosti aktivního uhlí jsou do značné míry ovlivněny surovinou, ze které je aktivní uhlí vyráběno. Aktivní uhlí lze vyrábět z mnoha surovin, avšak mezi nejběžnější suroviny patří uhlí nebo kokosové skořápky. Výroba aktivního uhlí se charakterizuje dvoustupňovým procesem. Prvním stupněm při výrobě je karbonizace. Karbonizace suroviny vyžaduje anaerobní prostředí a zvýšenou teplotu. Při tomto procesu dochází k uvolňování těkavých organických látek, které odchází z procesu v plynném skupenství. Dále dochází ke vzniku dehtu, jehož část zůstává v tuhém zbytku. Pro odstranění dehtu z tuhého zbytku se využívá rozpouštědlo nebo inertní plyn. Výsledkem karbonizace je vznik krystalů uhlíku v tuhém zbytku, které tvoří uspořádanou strukturu. Následujícím stupněm výroby aktivního uhlí je aktivace. Proces aktivace probíhá za zvýšené teploty, vyšší než při karbonizaci, a přítomnosti oxidačního činidla. Jako oxidační činidlo se používá pára nebo CO_2 . Výsledkem procesu aktivace je vytvoření spojitě struktury pórů, odstranění uzavřených a ucpaných pórů a zvýšení velikosti vnitřního povrchu.

Výrobě aktivního uhlí pro separaci rtuti ze spalin se věnuje několik celosvětových společností. Mezi hlavní výrobce a dodavatele aktivního uhlí patří Chemviron a Cabot Corporation.

Společnost Chemviron dodává aktivní uhlí řady FLUEPAC. Jedná se o různá aktivní uhlí, která jsou neimpregnovaná nebo impregnovaná. Neimpregnované aktivní uhlí od společnosti Chemviron má název FLUEPAC D. Mezi impregnovaná aktivní uhlí patří např. FLUEPAC ST, FLUEPAC STH, FLUEPAC SPR MAXX. Společnost Chemviron používá pro impregnaci aktivního uhlí nejčastěji bróm, avšak neudává, jaké množství je obsaženo v aktivním uhlí. V Tab. 4 jsou uvedeny dostupné parametry jednotlivých druhů aktivního uhlí od společnosti Chemviron. Pro základní porovnání aktivity jednotlivých druhů aktivního uhlí se např. využívá parametr celkový povrch nebo jódové číslo. Jódové číslo je parametr, které popisuje adsorbované množství jódu na aktivním uhlí. Jako etalon je použit jód z důvodu, že se skládá z malých molekul, které se dostanou až do mikropórů.

Tab. 4 - Dostupné parametry aktivního uhlí řady FLUEPAC [26]

parametr		D	ST	STH	SPR MAXX
vlhkost	[% hm.]	<12	<12	<12	<8
jódové číslo	[mg/g]	>600	400-600	-	400-600
distribuce <325 US mesh	[%]	>95	>95	>95	>95

Společnost Cabot Corporation dodává aktivní uhlí řady GL, FGL a Hg. Aktivní uhlí řady GL jsou neimpregnovaná, oproti tomu řady FGL a Hg jsou impregnovaná. V Tab. 5 jsou uvedeny dostupné parametry jednotlivých aktivních uhlí od společnosti Cabot Corporation.

Tab. 5 - Dostupné parametry aktivního uhlí od společnosti Cabot Corporation [27]

parametr		GL 35	GL 50	GL 90	Hg-H	Hg-LH	FGL
vlhkost	[μm]	<10	<5	<5	<8	<12	<8
jódové číslo	[mg/g]	>450	>650	>800	400	500	500
velikost částic D_{50}	[μm]	15-25	<25	15-25	-	-	-
distribuce <325 US mesh	[%]	-	-	-	>95	>95	>95
vnitřní povrch	[m^2/g]	-	-	-	500	550	550
obsah síry	[%]	-	-	-	1,2	1,2	1,2

5.1.1 BEZPEČNOSTNÍ RIZIKA

Při adsorpci kontaminantů na aktivním uhlí se musí brát i ohled na rizika vzniku požáru nebo výbuchu. Z důvodu toho, že všechny druhy aktivního uhlí jsou hořlavé a za určitých podmínek samovznětlivé a výbušné, je nutné zajistit takové podmínky provozu technologie, které předcházejí a zabraňují vzniku požáru. Podmínky vzniku požáru jsou závislé nejen na vlastnostech daného adsorbentu, ale také na vlastnostech samotné technologie čištění spalin [28]. Rizikem požáru a výbušností prášných materiálů a potřebných bezpečnostních opatření se zabývá např. norma VDI 2263 [29].

Udávají se tři hlavní podmínky, za kterých je možné, aby došlo k výbuchu aktivního uhlí. V případě vyřazení alespoň jedné z níže zmíněných podmínek, nehrozí nebezpečí výbuchu [28].

- 1) Aktivní uhlí musí být rozprášeno do plynu v takové koncentraci, která je v mezích výbušnosti.
- 2) Koncentrace kyslíku v plynu překračuje limitní hranici kyslíku, při které dochází k výbuchu.
- 3) V okolí aktivního uhlí je přítomen tepelný zdroj disponující dostatečnou energií pro vznícení.

Pro bod 1) se stanovuje minimální explozivní limit *Lower Ex-limit*. Při překročení tohoto limitu dochází ke vzniku výbušné atmosféry, jejímž následkem může být výbuch. Pro bod 2) se stanovuje limitní koncentrace kyslíku v plynu. Při překročení tohoto limitu dochází ke vzniku výbušné atmosféry. Pokud dojde k výbuchu partikulární látky, rozlišujeme 4 kategorie závažnosti výbuchu. Rozdělení do jednotlivých kategorií se provádí pomocí parametru K_{St} . Jednotlivé kategorie lze vidět v Tab. 6.

Tab. 6 - Rozdělení výbuchu dle závažnosti [30]

kategorie	poznámka	hodnota K_{St} [(bar·m)/s]
<i>St 0</i>	žádná exploze	0
<i>St 1</i>	slabá exploze	0-200
<i>St 2</i>	silná exploze	200-300
<i>St 3</i>	velmi silná exploze	>300

Dalším parametrem, kterým se charakterizuje výbuch partikulární látky, je maximální přetlak výbuchu p_{max} . Jedná se o parametr, který udává maximální přetlak, který se vytvoří při výbuchu partikulární látky o optimální koncentraci v uzavřené nádobě a při specifikovaných zkušebních podmínkách.

Eliminaci výbuchu aktivního uhlí lze dosáhnout při splnění podmínky, která není ve výše uvedeném seznamu. Jedná se o vytvoření směsi aktivního uhlí s inertním partikulárním materiálem, např. hydroxidem vápenatým $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Vytvořená směs těchto dvou materiálů již nedisponuje rizikem výbuchu.

Nebezpečí požáru se nevyskytuje pouze při samotné aplikaci aktivního uhlí, ale také při jeho skladování a dopravě aktivního uhlí. V tomto případě je nutné zohlednit dvě rizika požáru, tj.:

- 1) samovznícení,

2) vznik požáru od iniciátoru vznícení.

Při samovznícení dochází k hoření aktivního uhlí v důsledku spontánního zahřátí v důsledku exotermní reakce se vzduchem. Pro zabránění samovznícení je nutné zajistit, aby do skladovaného aktivního uhlí nedocházelo ke kontinuálnímu úniku stlačeného vzduchu.

Vznik požáru partikulární látky od iniciátoru vznícení můžeme popsat několika parametry, např. hořením nebo teplotou doutnání. Hoření se rozděluje do 6 kategorií. Rozdělení do těchto kategorií se provádí na základě experimentálního měření, kdy ke vzorku partikulárního materiálu se přiloží platinový drátek zahřátý na teplotu 1 000 °C a sleduje se chování vzorku. V Tab. 7 jsou uvedeny definice jednotlivých kategorií hoření. Teplota doutnání se stanovuje na základě experimentálního měření, kdy vrstva vzorku partikulárního materiálu leží na horkém povrchu a zkoumá se chování tohoto vzorku.

Tab. 7 - Kategorie hoření [30]

kategorie	poznámka
BZ 1	nevznikne požár
BZ 2	vznikne požár na krátkou dobu a ihned se samovolně uhasí
BZ 3	lokální pálení nebo žhnutí bez šíření
BZ 4	šíření žhnoucího ohně
BZ 5	šíření otevřeného ohně
BZ 6	velmi intenzivní hoření

5.2 FAKTORY SPALIN OVLIVŇUJÍCÍ SEPARACI RTUTI

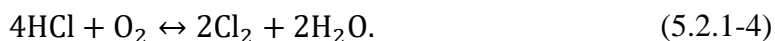
Během spalování v prostoru kotle dochází k různým reakcím, kdy rtuť reaguje s ostatními prvky přítomnými ve spalinách. Pro odstraňování rtuti ze spalin je důležité, aby rtuť byla ve spalinách co nejvíce zastoupena v oxidované formě Hg^{2+} . Toto je výhodné z důvodu dobré rozpustnosti Hg^{2+} v kapalině a také dobré sorpci na tuhých částicích, které lze odstranit v látkových filtrech, nebo v jiných technologiích. Oproti tomu elementární forma Hg^0 se velice obtížně odstraňuje ze spalin. Faktory, které mají vliv na přeměnu elementární rtuti Hg^0 na oxidovanou rtuť Hg^{2+} , jsou množství halogenů, kyslíku, vlhkosti, síry, nedopalů ve spalinách a teplota spalin.

5.2.1 VLIV PŘÍTOMNOSTI CHLÓRU VE SPALINÁCH

Mezi nejdůležitější reakce patří reakce elementární rtuti Hg^0 s chlórem. Touto reakcí vznikají oxidované formy HgCl_2 nebo Hg_2Cl_2 . Adsorpce rtuti na aktivním uhlí nebo jiném sorbentu závisí na reakcích, které probíhají ve spalinách pod teplotou přibližně $350\text{ }^\circ\text{C}$ [31]. Při spalování odpadu je uvolňován atomární chlór, který se při ochlazování transformuje na HCl nebo Cl_2 , což může být popsáno rovnicemi [32]:



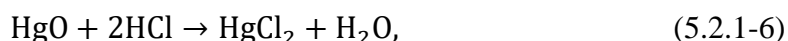
Dále se HCl může přeměnit na Cl_2 Deaconovou reakcí, avšak pro tuto reakci je potřeba teplota vyšší než $300\text{ }^\circ\text{C}$ a přítomnost katalyzátoru [32]:



Rtuť se oxiduje příznivěji pomocí HCl za vyšších teplot přesahujících přibližně $600\text{ }^\circ\text{C}$, avšak Cl_2 příznivěji reaguje se rtutí pod teplotou $500\text{ }^\circ\text{C}$ [32]. Za přítomnosti kyslíku dochází k oxidaci rtuti na HgO , což lze popsat rovnicí [31]:

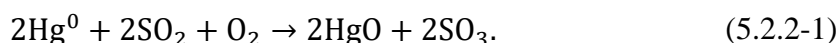


Jednotlivé reakce pro vznik chloridu rtuťnatého lze poté popsat rovnicemi:

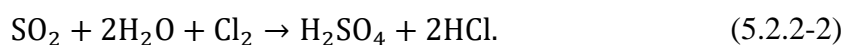


5.2.2 VLIV PŘÍTOMNOSTI SO_2 VE SPALINÁCH

Přítomnost SO_2 ve spalinách může být jednak prospěšná, kdy za přítomnosti O_2 oxiduje Hg^0 na HgO , což lze popsat rovnicí [32]:



V případě negativního vlivu SO_2 ve spalinách, lze zmínit redukci Cl_2 pomocí SO_2 a H_2O [31]:



5.2.3 VLIV TEPLoty

Z hlediska teploty platí, že s klesající teplotou spalin roste podíl oxidované formy rtuti ve spalinách, proto je doporučena maximální teplota pro suchou separaci rtuti ze spalin přibližně 190 °C [31]. Při překročení této doporučené teploty se nejen rapidně zhoršuje sorpce rtuti na aktivním uhlí, ale také se zvyšuje riziko výbuchu rozprášeného aktivního uhlí [31]. Optimální teplotní rozsah pro separaci rtuti je doporučen 120-150 °C [33].

5.3 FAKTORY AKTIVNÍHO UHLÍ OVLIVŇUJÍCÍ SEPARACI RTUTI

V předchozí podkapitole byly zmíněny reakce, které probíhají ve spalinách a mají vliv na separaci rtuti ze spalin. Avšak fyzikální nebo chemické faktory spalin nejsou jediné faktory, kterými lze ovlivnit separaci rtuti ze spalin. Snížení nebo zvýšení účinnosti separace rtuti lze dále docílit např. úpravou vlastností vstříkovaného sorbentu nebo množstvím vstříkovaného sorbentu do proudu spalin.

Mezi základní faktory aktivního uhlí, kterými lze ovlivnit účinnost separace rtuti patří např. velikost částic aktivního uhlí, impregnace aktivního uhlí nebo dávkované množství aktivního uhlí do proudu spalin.

5.3.1 VLIV VELIKOSTI ČÁSTIC AKTIVNÍHO UHLÍ

V práci [34] se uvádí, že čím je menší velikost částic aktivního uhlí (AC), tím se zvyšuje účinnost zachycení rtuti na aktivním uhlí. V případě, že částice aktivního uhlí měly velikost v průměru 4 μm, potřebný hmotnostní poměr AC/Hg pro odstranění 90 % z koncentrace rtuti 10 μg/Nm³, dosahoval hodnoty 3 000:1. V případě, že částice aktivního uhlí měly velikost v průměru 10 μm, potřebný hmotnostní poměr AC/Hg dosahoval hodnoty 10 000:1. Hmotnostní podíl aktivního uhlí a rtuti přítomné ve spalinách se pro elektrárny pohybuje od 2 000-15 000 [32]. Tento hmotnostní podíl má vliv na účinnost snížení emisí rtuti ze spalin, ovšem na druhou stranu má také dopad na provozní náklady této technologie. U spaloven odpadu je koncentrace rtuti ve spalinách mnohonásobně vyšší (přibližně o jeden až dva řády) než tomu je u elektráren, což má za důsledek, že je zapotřebí nižší hmotnostní poměr AC/Hg [3]. Důvodem této skutečnosti je klesající účinnost separace rtuti při klesající koncentraci rtuti ve spalinách [3].

5.3.2 IMPREGNACE AKTIVNÍHO UHLÍ

Další faktor, kterým lze ovlivnit účinnost separace rtuti ze spalin, je tzv. impregnace aktivního uhlí, tj. obohacení aktivního uhlí prvkem, který má pozitivní vliv na adsorpci rtuti. Aktivní uhlí je impregnováno z důvodů zajištění vyšší účinnosti separace rtuti, a to v případech, kdy elementární rtuť je dominantní, nebo kdy se separace rtuti provádí při vyšších teplotách než 180 °C. Impregnace aktivního uhlí se provádí látkami jako např. chlór, jód, bróm nebo také síra. Například při impregnaci sírou dochází ke snížení adsorpčního povrchu, avšak oproti neimpregnovanému aktivnímu uhlí dochází k nárůstu účinnosti separace Hg^0 [32].

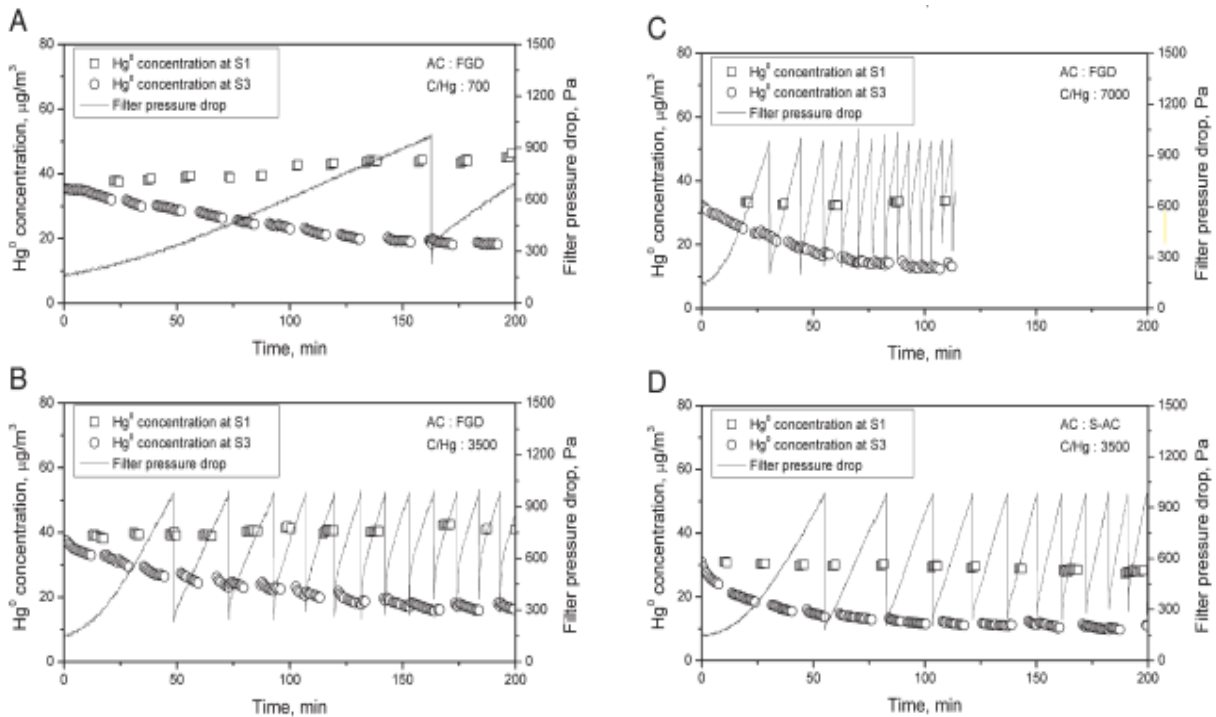
Pomocí impregnace lze dosáhnout vyšší účinnosti separace rtuti, ovšem lze také dosáhnout nižšího hmotnostního podílu AC/Hg, což je popsáno v následujícím pododdíle 5.3.3.

5.3.3 VLIV MNOŽSTVÍ DÁVKOVANÉHO AKTIVNÍHO UHLÍ

Odborné články [35], [36] a [37] se zabývají závislostí účinnosti separace rtuti na množství dávkovaného aktivního uhlí do proudu spalin. V článku [35] bylo pro sledování této závislosti využito laboratorní zařízení, kdežto v člancích [36] a [37] byly využity reálné zdroje emisí rtuti. V článku [35] bylo použito neimpregnované i impregnované aktivní uhlí. V článku [36] bylo použito pouze neimpregnované aktivní uhlí a v článku [37] nebyl specifikován typ aktivního uhlí. V každém článku docházelo k zachycení tuhých znečišťujících látek na látkovém filtru.

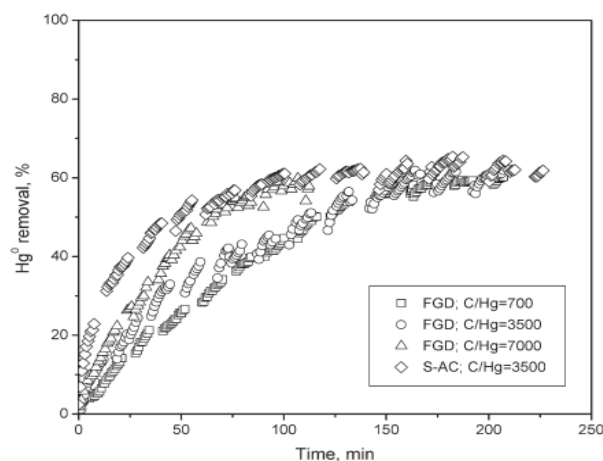
V článku [35] je sledován vliv hmotnostního poměru C/Hg na účinnost separace elementární rtuti ze spalin. Pro snížení emisí rtuti bylo použito laboratorní zařízení, které se skládalo z tzv. kontaktoru a látkového filtru s pulsní regenerací. Kontaktor je aparát, který slouží pro prodloužení doby zdržení spalin před látkovým filtrem.

Pro adsorpci elementární rtuti bylo použito neimpregnované a impregnované aktivní uhlí od stejného komerčního výrobce. Pro impregnaci aktivního uhlí byla zvolena síra. Pro neimpregnované aktivní uhlí byly sledovány tyto poměry C/Hg: 700, 3 500 a 7 000. Pro impregnované aktivní uhlí byl sledován poměr C/Hg 3 500. Koncentrace elementární rtuti na vstupu do technologie separace rtuti byla udržována v rozsahu 30-50 $\mu g/m^3$. Jeden ze závěrů tohoto laboratorního měření lze vidět na Obr. 7, který zobrazuje graf koncentrace elementární rtuti v čase. Grafy A, B a C ukazují použití neimpregnovaného aktivního uhlí, avšak pro různé poměry C/Hg. Graf D ukazuje použití impregnovaného aktivního uhlí při poměru C/Hg 3 500.



Obr. 7 - Výsledky měření výstupní koncentrace elementární rtuti v čase [35]

Z jednotlivých grafů lze zjistit, že poměr C/Hg má výrazný vliv na počáteční snížení koncentrace rtuti ve spalinách, tzn. že při vyšším poměru C/Hg bylo dosaženo rychlejšího snížení koncentrace elementární rtuti [35]. Avšak po určité době se koncentrace elementární rtuti na výstupu z technologie ustálila na přibližně stejné koncentraci elementární rtuti při různých poměrech C/Hg. Toto lze také vidět na Obr. 8, který zobrazuje závislost účinnosti separace elementární rtuti ze spalin na čase při různých poměrech C/Hg. Při počátečním snižování koncentrace elementární rtuti v čase 25 minut se dosahuje vyšší účinnosti při vyšším poměru C/Hg a nejvyšší účinnosti se dosahuje při použití impregnovaného aktivního uhlí (poměr C/Hg 3 500).



Obr. 8 - Účinnost separace elementární rtuti v čase [35]

Dále bylo zjištěno, že střední doba zdržení AC ve spalínách má podstatný vliv na zachyt rtuti, neboť odebrané vzorky spalin před kontaktozem nevykazovaly výraznější snížení emisí rtuti, oproti tomu vzorky odebrané za kontaktozem a také za látkovým filtrem, vykazovaly výrazné snížení emisí rtuti [35].

Autoři článku [36] provedli měření účinnosti separace rtuti ze spalin na uhelném energetickém zdroji, přičemž sledovali teplotu spalin, vstupní a výstupní koncentraci rtuti, poměr C/Hg a střední dobu zdržení částic aktivního uhlí před zachycením na látkovém filtru. Vstřikování aktivního uhlí bylo provedeno před látkovým filtrem, není tedy použit kontaktoz. Před vstřikováním aktivního uhlí byly spaliny ochlazeny pomocí chladiče spalin, jenž pracoval na principu rozstřikovací sušárny, kdy ochlazení bylo dosaženo přímým vstřikováním vody do proudu spalin. Pro zachycení rtuti bylo použito neimpregnované aktivní uhlí od komerčního výrobce. V Tab. 8 lze vidět naměřená data z článku [36], která byla seřazena od nejvyšší po nejnižší účinnost separace rtuti. Každý data set znamená průměrnou hodnotu v periodě měření 1 až 2 hodin.

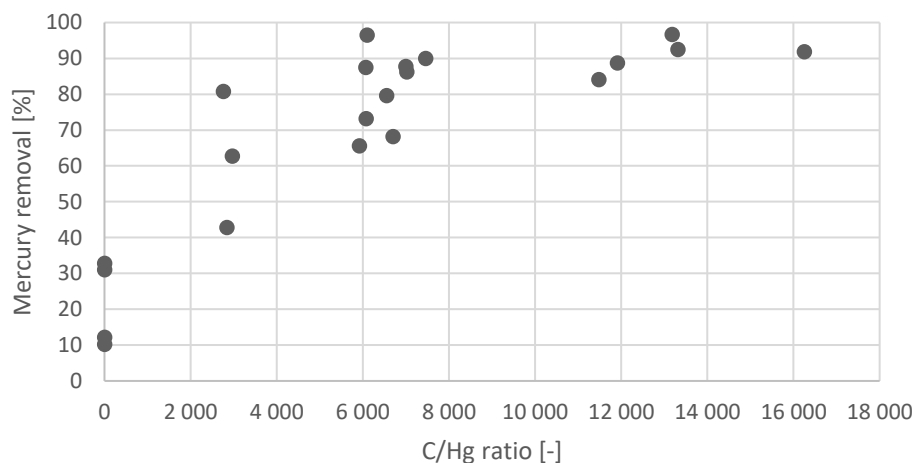
Tab. 8 - Naměřená data z článku [36]

Data set	Teplota [°C]	Vstupní koncentrace Hg [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	C/Hg [-]	Účinnost separace rtuti ze spalin [%]
18	132,8	4,24	13 177	96,7
14	93,3	2,26	6 099	96,5
19	132,8	4,14	13 310	92,5
20	133,3	3,77	16 248	91,8
11	117,8	3,31	7 454	90
3	129,4	3,01	11 909	88,7
21	133,3	4,24	6 997	87,7
12	121,1	2,32	6 065	87,5
22	132,8	4,43	7 014	86,2
2	145,6	2,76	11 476	84,1
15	127,8	5,31	2 756	80,8
13	121,1	2,06	6 553	79,6
16	149,4	4,25	6 075	73,2
4	131,1	3,05	6 701	68,2
7	146,7	2,94	5 916	65,6
8	132,2	3,3	2 964	62,7
6	146,7	3,11	2 840	42,8
17	128,9	5,36	0	32,8
5	146,7	2,94	0	31,0
1	145,6	2,86	0	12,2
23	132,2	4,41	0	10,2

Teplota spalin byla během měření separace rtuti v rozsahu od 93,3 do 149,4 °C. Během měření byla provedena také separace rtuti bez přítomnosti aktivního uhlí ve spalinách, což bylo zaznamenáno v data setech č. 1, 5, 17 a 23. Účinnost separace rtuti pro tato měření byla v rozsahu 10,2 až 32,8 %, což ukazuje, že dochází k separaci rtuti i na samotných tuhých znečišťujících látkách. Toto může být částečně vysvětleno přítomností nespálených částic uhlíku přítomných ve spalinách [36].

Jelikož se jednalo o uhelný energetický zdroj, koncentrace rtuti a jejích sloučenin byly velmi nízké, v rozsahu od 2,06 do 5,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Z uvedené práce lze konstatovat, že dosažení 90% a vyšší účinnosti separace rtuti a jejích sloučenin ze spalin pro takto nízké počáteční koncentrace je finančně nákladné, neboť je vyžadován vysoký poměr C/Hg.

Z Tab. 8 lze dále pozorovat vliv teploty. Pro data set č. 14 byla teplota spalin 93,3 °C, poměr C/Hg 6 099 a účinnost separace 96,5 %. Pro dosažení přibližně stejné hodnoty účinnosti 96,7 % při vyšší teplotě spalin 132,8 °C dosahoval poměr C/Hg 13 177 (data set č. 18). Pro dosažení účinnosti separace 90 % a vyšší při teplotě v rozsahu 132,8 – 133,2 °C bylo zapotřebí poměr C/Hg vyšší než 13 177. Pro dosažení stejné účinnosti při nižším poměru C/Hg bylo zapotřebí snížit teplotu spalin na 117,8 °C, což lze vidět na data setu č. 11. Závislost účinnosti separace rtuti na hmotnostním poměru C/Hg z článku [36] lze vidět na Obr. 9.



Obr. 9 - Závislost účinnosti separace rtuti na poměru C/Hg [36]

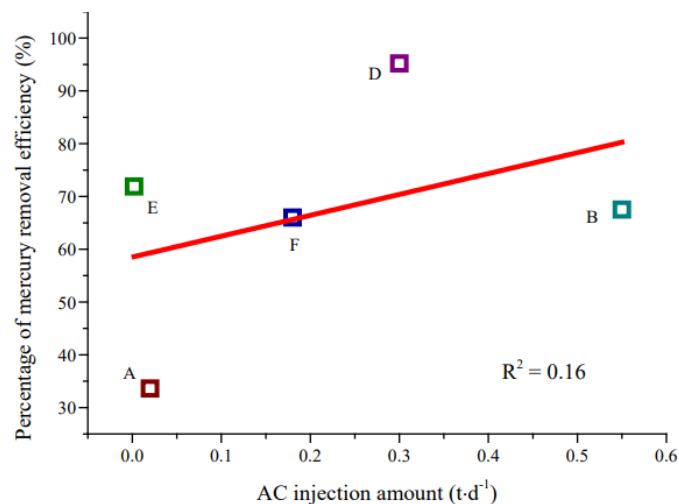
V článku [37] autoři provedli měření emisí rtuti na 6 různých spalovnách odpadů, které pro snížení plynných emisí využívaly kombinaci těchto technologií: suché nebo polosuché odstraňování kyselých kontaminantů, vstřikování aktivního uhlí a látkový filtr pro odstraňování tuhých znečišťujících látek. Pro odběr vzorků rtuti byla použita metoda Ontario-Hydro. Vzorky byly odebírány třikrát denně, před a za technologií snižování emisí. Výsledky

měření ukázaly, že přes 99 % rtuti obsažené ve spalovaných odpadech přešlo během spalování do spalin, tudíž v ložovém popelu zůstalo necelé 1 %.

Dále bylo provedeno srovnání několika závislostí účinnosti odstranění rtuti ze spalin na různých proměnných. Důvodem tohoto srovnání byl takový, aby se našla taková proměnná, která je stejná pro všechny zkoumané spalovny odpadu a pomocí které lze do jisté míry určit potřebné množství dávkovaného aktivního uhlí pro zvolenou účinnost odstranění rtuti ze spalin. Pro srovnání byly zvoleny následující proměnné:

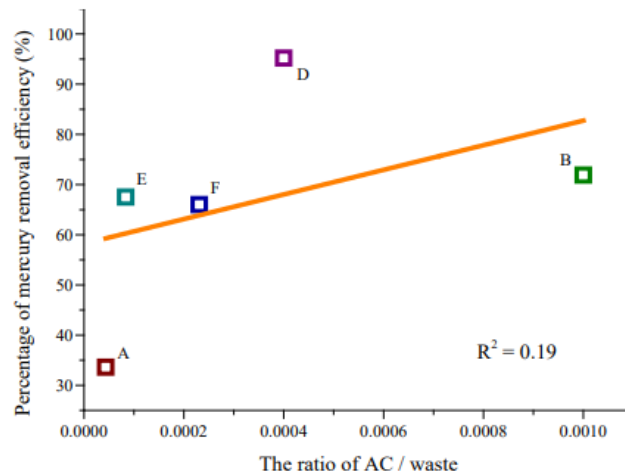
- 1) množství dávkovaného aktivního uhlí m_{AC} ,
- 2) poměr množství dávkovaného aktivního uhlí ku množství spalovaného odpadu $AC/waste$,
- 3) poměr množství dávkovaného aktivního uhlí ku objemovému průtoku spalin AC/gas ,
- 4) poměr množství dávkovaného aktivního uhlí ku množství tuhých znečišťujících látek ve spalinách $AC/fly\ ash$.

Lineární regresi závislosti účinnosti separace rtuti na množství dávkovaného m_{AC} lze vidět na Obr. 10. Koeficient determinance R^2 pro tuto lineární regresi dosahuje hodnoty 0,16 a je tedy indikující, že tato proměnná nenaznačuje přímou závislost mezi účinností separace rtuti množství dávkovaného aktivního uhlí.



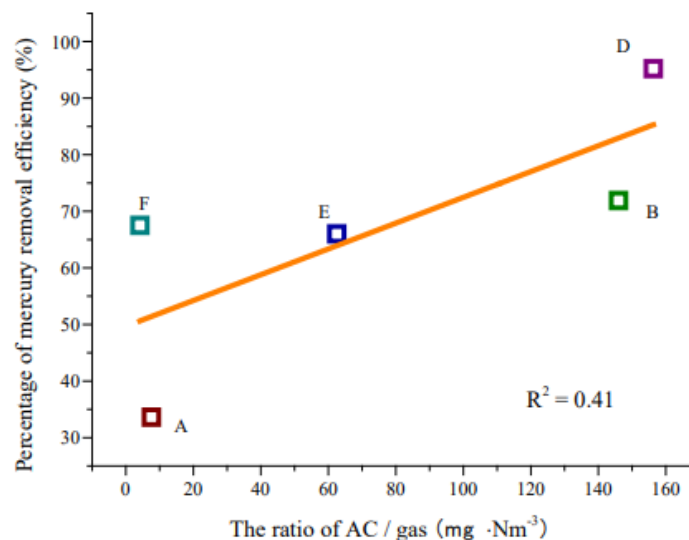
Obr. 10 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na množství dávkovaného m_{AC} [37]

Lineární regresi závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/waste lze vidět na Obr. 11. Koeficient determinance R^2 pro tuto lineární regresi dosahuje hodnoty 0,19 a je tedy indikující, že tato proměnná nenaznačuje přímou závislost mezi účinností separace rtuti a poměrem AC/waste.



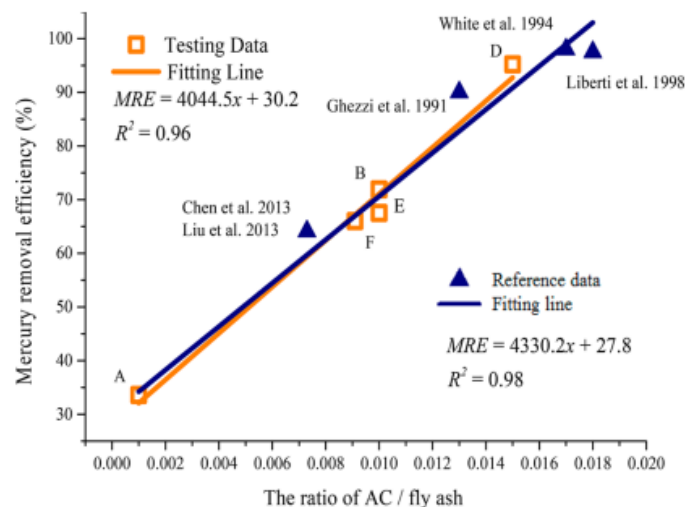
Obr. 11 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/waste [37]

Lineární regresi závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/gas lze vidět na Obr. 12. Koeficient determinance R^2 pro tuto lineární regresi dosahuje hodnoty 0,41 a je tedy indikující, že tato proměnná nenaznačuje přímou závislost mezi účinností separace rtuti a poměrem AC/gas.



Obr. 12 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/gas [37]

Lineární regresi závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/fly ash lze vidět na Obr. 13. Koeficient determinance R^2 pro tuto lineární regresi dosahuje hodnoty 0,96 a je tedy indikující, že tato proměnná naznačuje přímou závislost mezi účinností separací rtuti a poměrem AC/fly ash. Z důvodu, že koeficient determinance R^2 dosahoval vysoké hodnoty, byla lineární regrese doplněna o další data z odborné literatury, která potvrzovala přímou závislost mezi účinností separace rtuti a poměrem AC/fly ash. Naměřená data ze 6 spaloven jsou vyznačena oranžovou barvou a data, která byla doplněna z odborné literatury, jsou vyznačena modrou barvou.



Obr. 13 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/fly ash [37]

Pomocí rovnice lineární regrese z Obr. 13 lze stanovit účinnost separace rtuti na základě poměru AC/fly ash podle vztahu:

$$MRE = 4330,2x + 27,8; \quad (5.3.3-1)$$

kde MRE [%] značí účinnost separace rtuti ze spalin, x značí poměr AC/fly ash.

5.4 ZPŮSOBY ZACHYCENÍ RTUTI ADSORBOVANÉ NA AKTIVNÍM UHLÍ

V předchozích dvou podkapitolách 5.2 a 5.3 byly popsány základní faktory spalin a aktivního uhlí ovlivňující separaci rtuti ze spalin. Při použití technologie vstřikování aktivního uhlí do proudu spalin je nutné separovat rtuť adsorbovanou na aktivním uhlí ze spalin. Tato separace se provádí pomocí stejných odlučovacích metod, které se využívají pro separaci tuhých znečišťujících látek. Pro velmi účinnou separaci TZL se výhradně využívá elektrostatický odlučovač nebo látkový filtr. Výběr z těchto dvou zařízení při separaci rtuti pomocí vstřikovaného aktivního uhlí do spalin má výrazný vliv na účinnost separace rtuti.

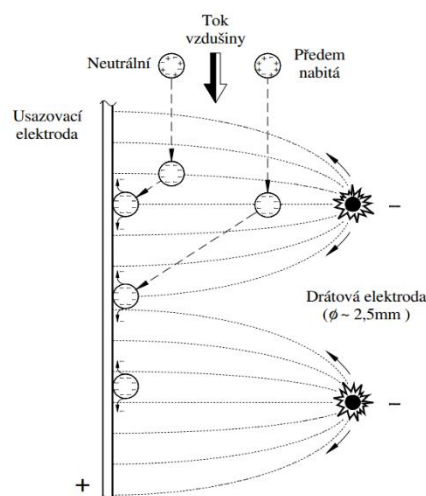
Dříve než budou popsány rozdíly v účinnosti separace rtuti při použití elektrostatického odlučovače nebo látkového filtru, je nutné popsat základní princip separace TZL v těchto zařízeních.

5.4.1 ELEKTROSTATICKÝ ODLUČOVAČ

Jedná se o zařízení, které efektivně slouží pro odlučování TZL ze spalin. Vnitřní prostor elektrostatického odlučovače (EO) se skládá ze dvou základních systémů, které jsou vzájemně elektricky izolovány a mezi kterými proudí spaliny (vzdušina):

- a) systém vysokonapěťových elektrod (VNE),
- b) systém usazovacích elektrod (USE).

Systém usazovacích elektrod je tvořen deskami, naproti tomu systém vysokonapěťových elektrod je tvořen dráty, toto lze vidět na Obr. 14. Systém usazovacích elektrod je společně se skříní EO připojen na nulový potenciál elektrického napětí. Na systém vysokonapěťových elektrod je přivedeno velmi vysoké stejnosměrné záporné napětí, které dosahuje hodnot od 30 do 100 kV [38]. Důsledkem, že na USE je nulový potenciál a na VNE je přiváděno velmi vysoké napětí, je vznik silného elektrického pole, a tudíž i vznik tzv. koronového výboje [38]. Tento koronový výboj je v podstatě shluk záporně nabitých iontů, které cestují prostorem z VNE na USE. Záporně nabité ionty během cesty putují přes proudící spaliny a střetávají se s tuhými znečišťujícími látkami. TZL během těchto srážek získávají záporný náboj a díky tomuto náboji jsou přitahovány k systému usazovacích elektrod a usazují se na těchto elektrodách. Takto zachycené TZL se musejí z USE po určité době mechanicky oklepat. Po



Obr. 14 - Princip EO [38]

mechanickém oklepání TZL spadá do výsypky, kde se shromažďuje a dopravuje k dalšímu zpracování.

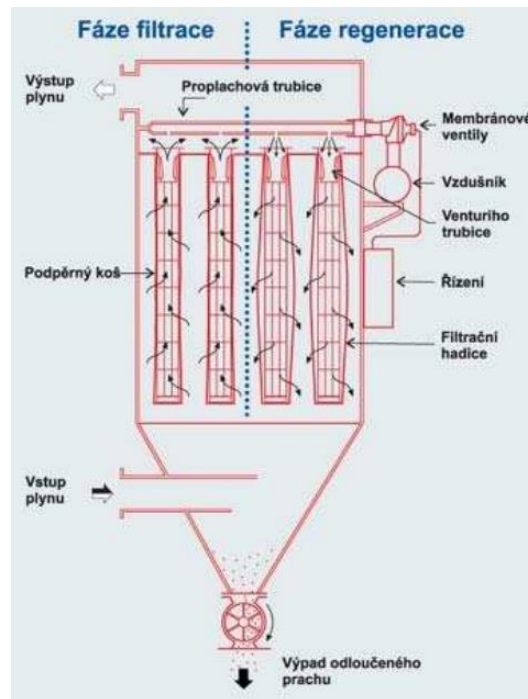
Vnitřní prostor EO se skládá z kovových materiálů, proto je možné EO používat pro vysoké teploty spalin až do 350 °C [38]. Dále je odolný proti nedopalům obsaženým ve spalinách. Mezi výhody patří také široké oblasti použití, od malých kotlů až po velké elektrárny. V neposlední řadě je jejich výhodou dlouhá životnost. Nevýhodou EO je závislost na chemickém složení spalin.

5.4.2 LÁTKOVÝ FILTR

Princip filtrace TZL v látkovém filtru lze vidět na Obr. 15. Vnitřní prostor látkového filtru je rozdělen na 2 základní části, horní a dolní. Tyto dvě části jsou od sebe odděleny přepážkou, ve které mohou být umístěny např. filtrační hadice nebo filtrační desky. Do dolního prostoru vstupují spaliny buď spodní nebo boční stranou látkového filtru. Látkový filtr musí být navržen takovým způsobem, aby došlo na vstupu do látkového filtru ke zpomalení rychlosti spalin. Tímto zpomalením dochází k první fázi separace TZL ze spalin, neboť spaliny ztrácí část své energie potřebné pro unášení těžších tuhých znečišťujících látek. Tato část TZL spadne rovnou do výsypky. V druhé fázi čištění proudí spaliny vzhůru látkovým filtrem, kde dochází ke styku filtračního materiálu se spalinami. Spaliny procházejí skrz filtrační materiál a dochází k zachycení TZL. Vyčištěné spaliny vstupují do horního prostoru látkového filtru, kde je také umístěn systém regenerace filtračního materiálu. Tento systém regenerace produkuje krátké impulzy tlakového vzduchu, který putuje do vnitřního prostoru filtračního materiálu. Pomocí tohoto impulzu se odtrhne vrstva zachycených TZL na vnější straně filtračního materiálu a takto odtržený popílek spadne do výsypky. Frekvence impulzů se volí na základě optimální tlakové ztráty filtru, neboť s narůstající vrstvou zachyceného popílku na filtrační hadici roste tato tlaková ztráta. Poté vyčištěné spaliny vystupují z látkového filtru z výsypky zachyceného TZL.

Látkový filtr disponuje oproti EO vyšší účinností zachycení TZL. Účinnost zachycení TZL nezávisí na chemickém složení spalin. Ovšem nevýhodou látkového filtru je omezený rozsah provozních teplot. Z tohoto důvodu je doporučená maximální teplota vstupních spalin do 200 °C [39]. Pokud bude teplota spalin vyšší, musí se volit dražší materiály filtračních hadic a dochází k nárůstu investičních a poté i provozních nákladů, neboť filtrační hadice mají běžnou

životnost okolo 2 let. Další nevýhodou látkových filtrů je náchylnost k propálení materiálu hadic nedopálenými částicemi ve spalinách.



Obr. 15 - Látkový filtr [39]

Látkový filtr může být v provedení, kdy se skládá ze soustavy jednotlivých samostatných filtračních jednotek, které jsou vzájemně propojené vstupním a výstupním kanálem. Takto konstrukčně řešený látkový filtr garantuje dlouhodobý a nepřerušovaný provoz. Například při naplánované revizi, se nemusí zastavit celý provoz filtru, ale dojde pouze k uzavření jedné jednotky látkového filtru [39]. Dále může být látkový filtr opatřen bezpečnostní ochranou filtru, kdy v případě havárie proud spalin proudí integrovaným obtokovým potrubím, tzv. by-passsem [39].

5.4.3 SROVNÁNÍ LÁTKOVÉHO FILTRU A ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE

Srovnáním účinností separace rtuti při využití látkového filtru a elektrostatického odlučovače se zabývá práce [40]. Srovnání bylo provedeno na 5 uhelných elektrárnách, které jsou uvedeny v Tab. 9. V elektrárnách byl využíván buď látkový filtr nebo elektrostatický odlučovač pro separaci TZL. V rámci technologie čištění spalin nebyla ani v jedné elektrárně nainstalována technologie separace rtuti. Tudíž účinnost separace rtuti závisela pouze na vlastnostech spalin a technologii separace TZL.

Tab. 9 - Parametry elektráren [40]

Elektrárna	Výkon [MW]	Systém	Provoz [%]	Účinnost separace rtuti [%]
1	50	Látkový filtr	100	80
2	200	Látkový filtr	100	20
3	220	EO	100	6
4	600	EO	90	20
5	600	EO	90	4

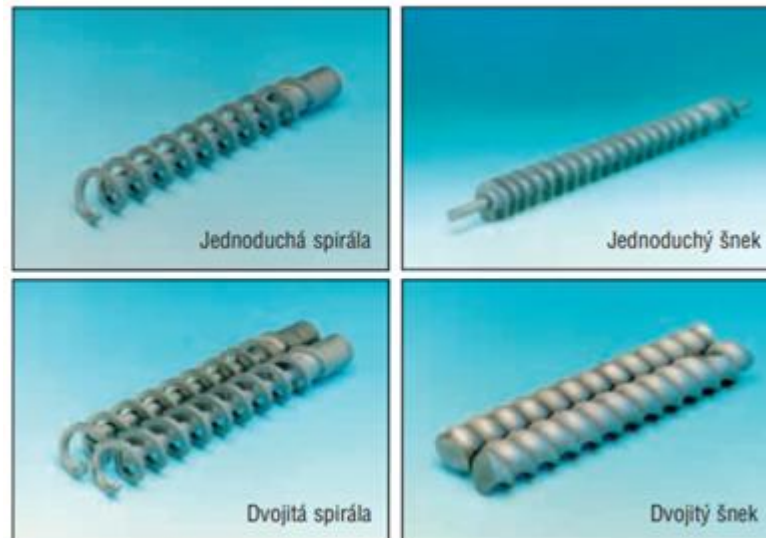
I když v elektrárnách byly použity podobné technologie čištění spalin, výsledky byly odlišné, neboť separace rtuti je velmi komplexní problém, na který má vliv mnoho faktorů, např. obsah nedopálených částic uhlíku, koncentrace chlóru, vody a dalších látek. Důvodem nízkých hodnot účinností u elektráren, které disponovaly EO může být takový, že EO odlučuje tuhé znečišťující látky pomocí elektrického pole, respektive EO odlučuje TZL částici po částici. Oproti tomu látkový filtr odlučuje TZL tím způsobem, že se částice zachytí na povrchu filtru a časem vytvoří souvislou filtrační vrstvu. V této vrstvě jsou obsaženy také nedopálené částice uhlíku a další látky, které mají pozitivní vliv na zachycení rtuti. Proto v této filtrační vrstvě může docházet k dalším chemickým a fyzikálním dějům, které vedou k oxidaci a adsorpci elementární rtuti. Tato souvislá vrstva proto může mít nezanedbatelný pozitivní vliv na zachycení rtuti. Proto pokud bude použita technologie vstřikování aktivního uhlí v kombinaci s látkovým filtrem, bude mít i vyšší účinnost separace rtuti ze spalin než při použití v kombinaci s elektrostatickým odlučovačem.

5.5 DÁVKOVÁNÍ PARTIKULÁRNÍHO MATERIÁLU

V předchozích podkapitolách byly popsány základní faktory ovlivňující separaci rtuti. Dále jakými technologiemi se rozprášené aktivní uhlí separuje ze spalin a také v jakém rozsahu se pohybuje potřebné vstřikované množství aktivního uhlí pro separaci rtuti. Ovšem aby se mohla rtuť ve spalinách adsorbovat na povrchu rozprášeného aktivního uhlí je nutné toto uhlí vhodným způsobem a v požadovaném množství do spalin nadávkovat. To, jakými způsoby lze aktivní uhlí přesně dávkovat je popsáno níže v této podkapitole.

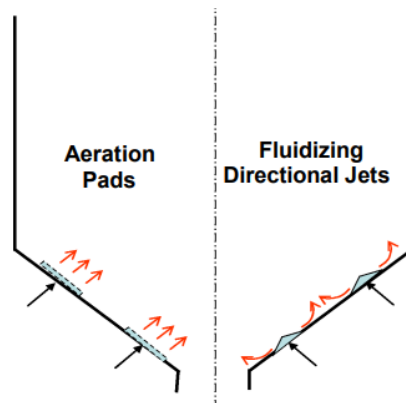
Při dávkování partikulárních materiálů lze postupovat dvěma způsoby, buď na principu měřeného objemu (volumetrická metoda) nebo na principu měřené hmotnosti (gravimetrická metoda). Volumetrická metoda sleduje dávkovaný objem partikulárního materiálu a cílem je

dosažení konstantního objemového toku materiálu. Pro dávkování touto metodou se nejčastěji využívá šnek, spirála nebo turniket. Konstrukční provedení šneku a spirály lze vidět na Obr. 16.



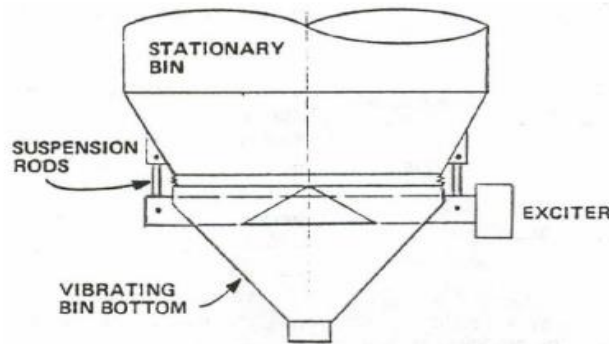
Obr. 16 - Konstrukční provedení šneku a spirály [41]

Nevýhodou těchto zařízení je jejich závislost na vlastnostech dávkovaného materiálu a tvaru výstupní části zásobníku, kde je partikulární materiál skladován [41]. Z tohoto důvodu se využívají metody, které odstraňují klenby v zásobníku a zlepšují přísun materiálu do šneku, spirály nebo turniket. Tyto metody lze rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní prvky bývají namontovány v dolní části zásobníku. Lze je rozdělit na pneumatické, vibrační a mechanické. Do pneumatické kategorie patří provzdušňovací nebo fluidizační podložky, vzduchové polštáře, vzduchová děla a pulzní trysky. Znázornění principu provzdušňovacích podložek a pulzních trysek lze vidět na Obr. 17.



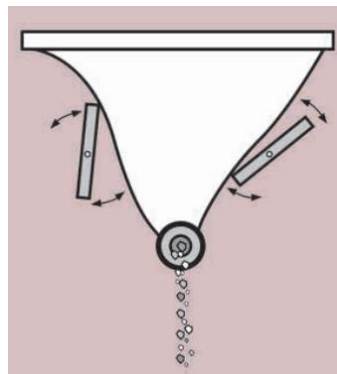
Obr. 17 - Provzdušňovací podložky (vlevo) a pulzní trysky (vpravo) [42]

Vibrační systém pro zlepšení toku materiálu ze zásobníku lze vidět na Obr. 18. Vibrační systém se skládá z kužele, který je umístěný ve středu výstupní části zásobníku a po rozvibrování kužele dochází k odstraňování klenby.



Obr. 18 - Vibrační systém odstraňování klenby [42]

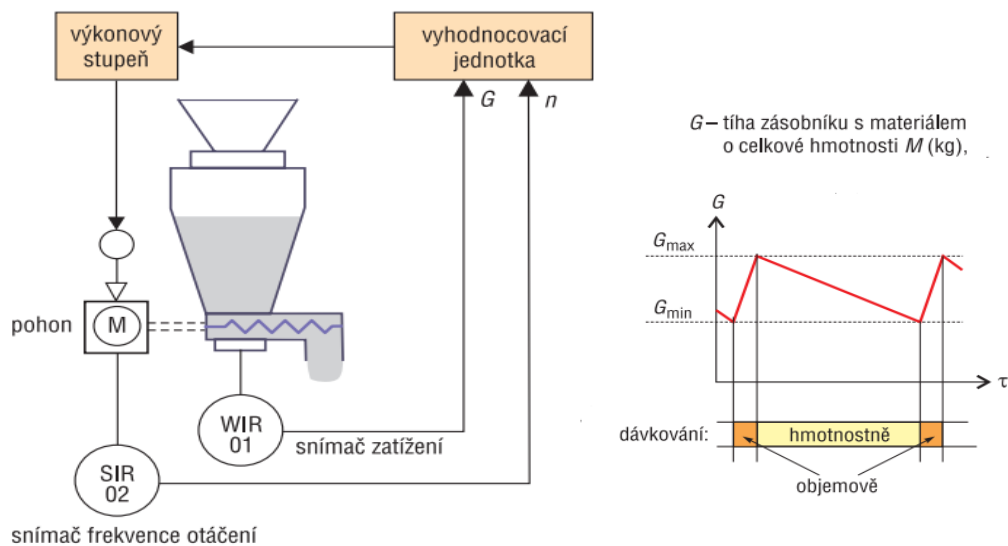
Mechanický systém pro zlepšení toku materiálu ze zásobníku lze vidět na Obr. 19. Jedná se o zásobník (např. big-bag), jehož stěny jsou vyrobeny z pružného materiálu a pomocí rotačního pohybu lopatek akčního členu dochází k narušení klenby v zásobníku.



Obr. 19 - Pružná stěna [41]

Do kategorie pasivního odstraňování klenby lze zařadit např. vhodnou konstrukci sila, což lze zařadit pomocí vhodného sklonu dolní části zásobníku. Dále sem patří vestavby, které se umisťují do vnitřního prostoru zásobníku.

Gravimetrická metoda sleduje dávkovací hmotnost partikulárního materiálu a cílem je dosažení konstantního úbytku hmotnosti [41]. Tato metoda se využívá pro přesné dávkování nebo pro materiály s proměnnou sypnou hustotou. Nevýhodou jsou problémy při doplňování zásobníku váhy, neboť dochází k nepřesnému vážení partikulárního materiálu [41]. Z tohoto důvodu se využívá kombinace gravimetrické a volumetrické metody a zařízení, které využívá tuto kombinaci, se nazývá diferenční dávkovací váha. Schéma diferenční dávkovací váhy lze vidět na Obr. 20.



Obr. 20 - Schéma diferenciální dávkovací váhy [34]

Diferenciální dávkovací váha využívá dva režimy dávkování. Primárním režimem je gravimetrická metoda, kdy za pomoci vhodného snímače zatížení se sleduje úbytek hmotnosti v čase a tento úbytek odpovídá skutečnému odebíranému množství. Šnek nebo turniket je regulován takovým způsobem, aby byla změna hmotnosti konstantní. V okamžiku, kdy je nutné doplnit materiál do zásobníku, zapne se sekundární režim, tj. volumetrická metoda. V tomto režimu se dávkuje materiál s konstantním objemem a toto je zajištěno zachováním poslední hodnoty výkonu primárního režimu, než došlo k přepnutí na sekundární režim. Po doplnění zásobníku materiálem se přepne sekundární režim na primární.

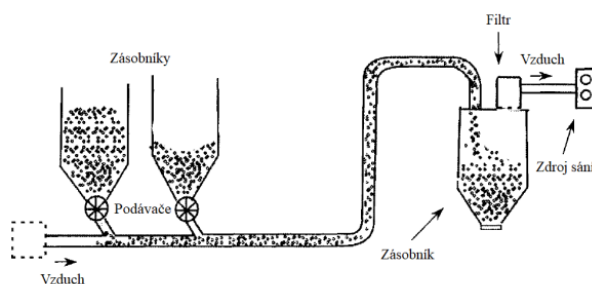
Doplnění zásobníku diferenciální dávkovací váhy bývá realizováno pomocí motýlkové klapky s pneumatickým pohonem [41]. Toto řešení je výhodné, neboť klapka zajišťuje relativně krátké naplnění a okamžité uzavření přísunu materiálu se spolehlivým utěsněním vstupního otvoru [41]. Pomocí diferenciální dávkovací váhy lze zajistit dávkované množství od 0,05 kg/h až do 90 kg/h [41]. Frekvence doplnění u běžných diferenciálních vah se pohybuje od 20 do 40 cyklů za hodinu [41].

5.6 DOPRAVA PARTIKULÁRNÍHO MATERIÁLU

Nadávkové aktivní uhlí je třeba dopravit ze zásobníku do spalínovodu, ve kterém se rozpráší. Pro partikulární materiály existuje několik způsobů dopravy partikulárních materiálů, avšak v této podkapitole je popsána pouze pneumatická doprava.

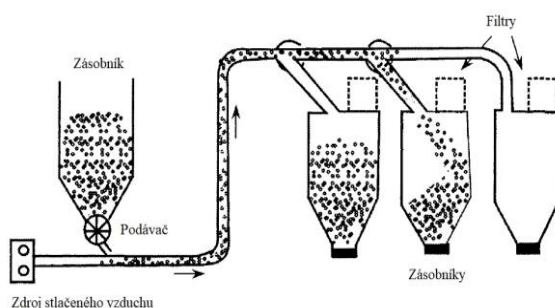
Pneumatická doprava partikulárních materiálů se dělí podle tlaku a tlakové ztráty v potrubní trase. Podle tlaku je rozdělena na podtlakovou, přetlakovou a smíšenou. Podle tlakové ztráty je doprava rozdělena na nízkotlakou, středotlakou a vysokotlakou.

Schéma podtlakové pneumatické dopravy lze vidět na Obr. 21. Zdroj podtlaku je umístěn na konci potrubní trasy. Důsledkem tohoto umístění je vznik podtlaku v potrubní cestě. Pro správnou funkci zdroje podtlaku je nutné umístit před ním odlučovač prachu. Výhodou tohoto druhu dopravy je možnost dopravy z více míst na jedno místo.



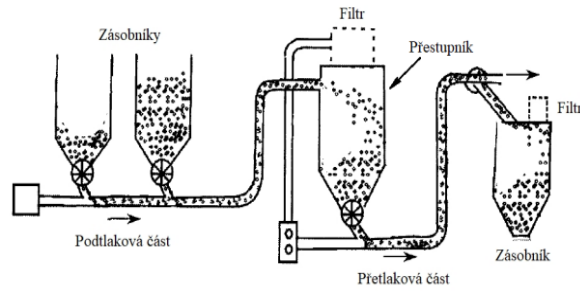
Obr. 21 - Podtlaková pneumatická doprava [43]

Schéma přetlakové pneumatické dopravy lze vidět na Obr. 22. Zdroj přetlaku je umístěn na začátku potrubní trasy. U tohoto druhu dopravy se může využívat komorový podavač. Výhodou této dopravy je možnost dopravy materiálu z jednoho místa na více míst [44].



Obr. 22 - Přetlaková pneumatická doprava [43]

Schéma smíšené pneumatické dopravy lze vidět na Obr. 23. Jedná se kombinaci podtlakové a přetlakové pneumatické dopravy. Toto uspořádání kombinuje výhody obou způsobů dopravy, tj. dopravovat materiál z více míst na více míst [44]. Zdroj podtlaku a přetlaku je umístěn uprostřed dopravní trasy.



Obr. 23 - Smíšená pneumatická doprava [43]

Nízkotlaká pneumatická doprava se vyznačuje tlakovou ztrátou od 10 do 15 kPa. Pro překonání tlakové ztráty se v tomto případě používá ventilátor. Potrubní trasa může být podtlaková nebo přetlaková [44]. Při projektování nízkotlaké pneumatické dopravy je zanedbána změna hustoty stlačeného vzduchu [44].

Středotlaká pneumatická doprava se vyznačuje tlakovou ztrátou v rozsahu od 15 do 50 kPa. Pro dopravu se v tomto případě používá dmychadlo. Podobně jako u nízkotlaké pneumatické dopravy může být dopravní trasa podtlaková nebo přetlaková [44]. U této dopravy už nelze zanedbat změnu hustoty stlačeného vzduchu.

Vysokotlaká pneumatická doprava se vyznačuje tlakovou ztrátou vyšší než 50 kPa, avšak může dosahovat až hodnoty 600 kPa. Pro tlaky stlačeného vzduchu do 80 až 100 kPa je zdrojem tlaku dmychadlo a pro vyšší tlaky se využívá kompresor [44]. Tento druh dopravy je pouze přetlakový.

6 PRAKTICKÁ ČÁST

V následujících podkapitolách budou aplikovány informace z předchozích kapitol pro návrh technologie separace rtuti ze spalin ve spalovně průmyslového odpadu v Trmicích.

6.1 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Spalovna průmyslových odpadů Recovera Využití zdrojů a.s. v Trmicích provozuje dvě na sobě nezávislé linky (linka A a linka B). Jednotlivé linky se obecně skládají z několika částí, tj. přípravy odpadu, spalovacího zařízení, technologie pro čištění spalin a technologie čištění odpadních vod. V části přípravy odpadu dochází ke zpracování odpadu přijatého od zákazníků a následnému dávkování do spalovacího zařízení, sestávajícího se z rotační pece, dohořivací komory a parního kotle. Vzniklé spaliny vstupují do technologie čištění spalin, kterou lze vidět na technologickém schématu v Příloze č. 1. Technologie čištění spalin se skládá ze čtyř sériově zapojených aparátů, tj. Venturiho absorbéru A1, náplňového absorbéru K1, absorbéru se speciální vestavbou K2 a látkového filtru F1. Mezi posledním absorbérem K2 a látkovým filtrem F1 je zařazen spalinový výměník tepla E1. Technologie pro čištění odpadních vod zpracovává odpadní vodu z technologie čištění spalin.

Ve Venturiho absorbéru A1 dochází nejen k ochlazení spalin na požadovanou teplotu absorpce, ale také k částečné absorpci kyselých kontaminantů a tuhých znečišťujících látek. K absorpci je využíván vodný roztok hydroxidu sodného NaOH, který je kaskádovitě přepouštěn z absorbéru K2 do K1, a z K1 do A1. Pro koncentrační špičky kontaminantů je dávkován i čerstvý NaOH samostatně do absorbéru A1 a K1. Venturiho absorbér A1 se skládá z Venturiho trubice a nádrže absorpčního roztoku. Absorbéry K1 a K2 jsou typu vertikální náplňové kolony. Na výstupu z každého absorbéru je umístěn demister pro separaci kapalného úletu. Každý absorbér využívá pro absorpci vodný roztok hydroxidu sodného NaOH. Pro separaci tuhých znečišťujících látek se využívá látkový filtr F1, před který se dávkuje suchý vápenný sorbent, který slouží pro dočištění spalin.

V současném stavu dochází v technologii čištění spalin primárně k separaci kyselých kontaminantů. Investorem bylo rozhodnuto, že se provede rekonstrukce obou linek pro spalování průmyslových odpadů, a to tím způsobem, že nejdříve bude provedena rekonstrukce linky B a během rekonstrukce bude v provozu linka A, která do určité míry zajistí provoz a konkurenceschopnost spalovny. Po rekonstrukci a ověření provozní schopnosti linky B bude

provedena rekonstrukce linky A. V rámci rekonstrukce linky B bude technologie čištění spalin doplněna o suchou separaci rtuti ze spalin, čímž se zajistí plnění zpřísněných emisních limitů.

6.2 ZADANÉ PARAMETRY SPALIN

V Tab. 10 jsou uvedeny parametry spalin, které byly poskytnuty spalovnou a na které je projektována technologie suché separace rtuti. V Tab. 10 je zadána celková koncentrace rtuti, nikoliv procentuální zastoupení jednotlivých forem rtuti.

Tab. 10 - Zadané parametry spalin

nadmořská výška	[m. n. m]	218	
		provozní	maximální
průtok spalin (vlhký normální stav)	[Nm ³ /h]	8 728	9 549
hmotnostní tok spalin	[kg/h]	10 970	11 991
teplota spalin	[°C]	180	200
tlak spalin (g)	[Pa]	-350	-550
vlhkost spalin	[% obj.]	18,50	23,50
skutečný O ₂ ve spalinách (vlhké)	[% obj.]	6,60	6,57
koncentrace kontaminantů ve spalinách před čištěním (referenční stav)			
		denní průměr	denní maximum
SO ₂	[mg/Nm ³]	3 000	5 000
Cl ⁻	[mg/Nm ³]	60	800
F ⁻	[mg/Nm ³]	5	30
tuhé znečišťující látky	[mg/Nm ³]	2 000	6 000
Cd+Tl	[mg/Nm ³]	0,20	0,45
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	[mg/Nm ³]	100	600
Hg	[mg/Nm³]	0,10	0,25
CO	[mg/Nm ³]	50	nezadáno

V rámci výpočtu je nutné uvažovat s různými výpočetními stavy spalin. Jednotlivé uvažované stavy jsou uvedeny a popsány v Tab. 11.

Tab. 11 - Výpočetní stavy spalin a koncentrací

provozní stav	vlhké spaliny, provozní podmínky (skutečná teplota a tlak spalin), skutečné objemové procento O ₂
vlhký normální stav	vlhké spaliny, normální podmínky (273,15 K; 101,325 kPa), skutečné objemové procento O ₂
suchý normální stav	suché spaliny, normální podmínky (273,15 K; 101,325 kPa), skutečné objemové procento O ₂
referenční stav	suché spaliny, normální podmínky (273,15 K; 101,325 kPa), referenční objemové procento O ₂ 11 %

6.3 POŽADOVANÉ PARAMETRY SPALIN NA VÝSTUPU Z TECHNOLOGIE ČIŠTĚNÍ SPALIN

V Tab. 12 je uvedena celková koncentrace rtuti ve spalinách na výstupu z komína, na kterou je projektována technologie separace rtuti. Jedná se o hodnotu, která je převzata ze závěrů o BAT prováděcím rozhodnutím komise (EU) 2019/2010 ze dne 12. listopadu 2019.

Tab. 12 - Požadovaná celková koncentrace rtuti na výstupu z komína

znečišťující látka	požadovaná koncentrace [μg/Nm ³]	způsob stanovení emisního limitu
Hg a její sloučeniny	20	denní průměr, průměr za interval odběru vzorků

6.4 NÁVRH ŘEŠENÍ SEPARACE RTUTI ZE SPALIN

Návrh změny řešení čištění spalin lze vidět na technologickém schématu v Příloze č. 2. Na základě článku [35], jehož výsledky byly popsány v oddíle 5.3.3, je pro dosažení vyšší účinnosti separace rtuti doporučeno implementovat kontaktor A1, který zajistí vyšší střední dobu zdržení spalin. Umístění kontaktoru A1 v Příloze č. 2 je provedeno stejným způsobem jako v článku [35], tj. před látkovým filtrem F1.

Aktivní uhlí je nutné vstříkovat do proudu spalin v takovém místě, které zajistí optimální rozprášení v celém průřezu spalinovodu. Z tohoto důvodu je aktivní uhlí vstříkováno do spalinovodu v přímočarém úseku 4 m před vstupní přírubou kontaktoru A1. Dále je ve své spodní části kontaktor A1 opatřen tzv. rotačním košem, který je naplněn otěruvzdornými koulemi. Funkcí tohoto rotačního koše je minimalizace usazování sorbentů na dně kontaktoru A1. Pro zvýšení účinnosti separace rtuti je provedena recirkulace popílku z látkového filtru F1 pomocí šnekového podavače RA8.

Aktivní uhlí je dopravováno do spalinovodu pomocí pneumatické dopravy. Aktivní uhlí je dávkováno do pneumatické dopravy pomocí dávkovacího zařízení RA1. Podrobnější popis skladování a dávkování aktivního uhlí je uveden v podkapitole 6.7.

Suchá separace kontaminantů, která se skládá ze vstříkování suchých sorbentů (aktivní uhlí, vápenný hydrát), kontaktoru A1 a látkového filtru F1, je umístěna před mokrou separaci kontaminantů. Důvodem tohoto přemístění oproti technologickému schématu v Příloze č. 1 je zajištění optimální teploty adsorpce rtuti a využití postupného snižování teploty spalin podle potřeby jednotlivých technologií čištění spalin. Teplota spalin na vstupu do technologie čištění spalin je 180 až 200 °C. Podle oddílu 5.2.3 je doporučená optimální teplota pro suchou separaci rtuti v rozsahu 120-150 °C. V článku [36], jehož výsledky byly popsány v oddílu 5.3.3, bylo zjištěno, že při nižší teplotě spalin je zapotřebí nižší poměr C/Hg, který má přímý vliv na provozní náklady technologie separace rtuti. Proto je zvolena teplota spalin 140 °C. Ochlazení spalin na teplotu 140 °C je dosaženo pomocí chladiče spalin E1, který pracuje na principu rozprašovací sušárny. Chladícím médiem v chladiči spalin je voda, která je přímo vstříkována do proudu spalin.

6.5 VÝPOČET SPOTŘEBY AKTIVNÍHO UHLÍ

V předchozí podkapitole 6.4 je popsáno rozmístění aparátů a zařízení tak, aby bylo dosaženo nejvyšší možné účinnosti separace rtuti ze spalin. V této podkapitole je popsán výpočet spotřeby aktivního uhlí, která je optimální pro zajištění požadované účinnosti separace rtuti ze spalin.

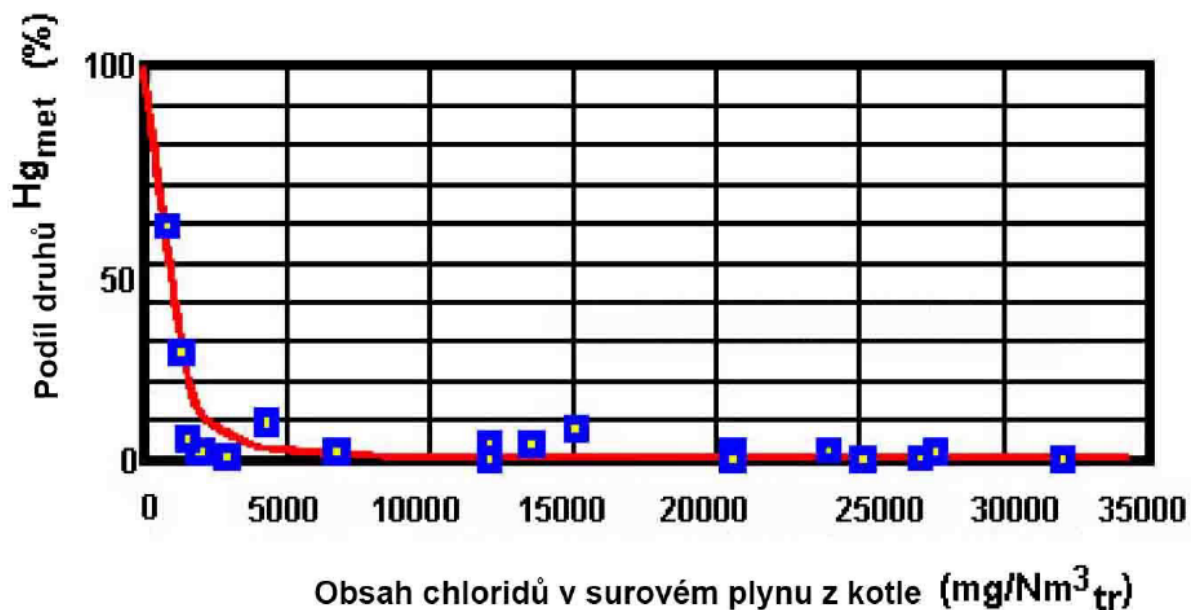
Stanovit množství vstříkovaného aktivního uhlí pro snížení emisí rtuti ze spalin představuje velice komplexní problém. V praxi se spotřeba aktivního uhlí většinou zjišťuje z experimentálních dat zjištěných na již existujících zdrojích emisí rtuti a tato experimentální data spadají do duševního vlastnictví společností, které se touto problematikou zabývají.

Z tohoto důvodu výpočet spotřeby aktivního uhlí pro snížení emisí rtuti ve spalínách v této podkapitole vychází z dostupné odborné literatury a nemusí být tedy tak přesný, jako kdyby se vycházelo z experimentálních dat.

Ke stanovení spotřeby aktivního uhlí lze přistoupit několika přístupy. V této práci se při výpočtu spotřeby aktivního uhlí vychází ze dvou přístupů, tj. přístupu na základě poměru AC/fly ash a přístupu na základě poměru C/Hg.

Nejdříve, než se stanoví spotřeba aktivního uhlí, je zapotřebí stanovit zastoupení jednotlivých forem rtuti ve spalínách. Z důvodu, že spalovnou nebyly poskytnuty informace o zastoupení jednotlivých forem rtuti ve spalínách, jsou při návrhu technologie separace rtuti ze spalin v této práci využity informace dostupné z odborné literatury.

Hodnota elementární rtuti je stanovena z Obr. 24. Jedná se o graf závislosti podílu elementární rtuti na koncentraci chloridů ve spalínách ze spalovny nebezpečného odpadu. Tento graf byl převzat z referenčního dokumentu o BAT pro spalovny odpadu [4].



Obr. 24 - Závislost podílu elementární rtuti na koncentraci chloridů ve spalínách [4]

Koncentrace chloridů jsou uvedeny v [mg/Nm³ tr], avšak v referenčním dokumentu o BAT není uvedena definice této jednotky. Jelikož je tento graf v českém překladu převzat z německého zdroje, předpokládá se, že definice jednotky koncentrace chloridů je ve stavu suchých spalin, za normálních podmínek a při referenčním obsahu O₂ 11 %. Na základě tohoto je určen z grafu podíl elementární rtuti 65 % pro koncentraci chloridů 800 mg/Nm³. Jelikož se jedná o graf, který byl zpracován na základě dat ze spalovny nebezpečného odpadu,

je nutné vzít v úvahu proměnlivost složení spalovaného materiálu. Proto stanovená hodnota podílu elementární rtuti je uvažována jako maximální podíl elementární rtuti ve spalinách.

6.5.1 VÝPOČET SPOTŘEBY AKTIVNÍHO UHLÍ PODLE POMĚRU AC/FLY ASH

Výpočet spotřeby aktivního uhlí na základě poměru AC/fly ash je proveden podle článku [37]. Po úpravě vztahu (5.3.3-1) lze vypočítat spotřebu aktivního uhlí při zvolené účinnosti separace rtuti ze spalin:

$$\dot{m}_{AC} = \frac{MRE - 27,8}{4330,2} \cdot \dot{m}_{FA}, \quad (6.5.1-1)$$

kde \dot{m}_{FA} je hmotnostní tok tuhých znečišťujících látek, \dot{m}_{AC} je spotřeba aktivního uhlí.

Pro výpočet spotřeby aktivního uhlí je nejdříve nutné vypočítat hmotnostní tok tuhých znečišťujících látek ve spalinách a požadovanou účinnost separace rtuti ze spalin. Hmotnostní tok tuhých znečišťujících látek ve spalinách se vypočte podle vztahu:

$$\dot{m}_{FA} = c_{FA}^{mV} \cdot \dot{V}_R, \quad (6.5.1-2)$$

kde c_{FA}^{mV} je koncentrace tuhých znečišťujících látek ve spalinách před technologií čištění spalin a v referenčním stavu. \dot{V}_R je objemový tok spalin v referenčním stavu. Hodnota \dot{V}_R se vypočte podle vztahu:

$$\dot{V}_R = \dot{V}_N \cdot \frac{100 - c_{H_2O}^V}{100} \cdot \frac{21 - c_{O_2,S}^V}{21 - c_{O_2,R}^V}, \quad (6.5.1-3)$$

kde \dot{V}_N je objemový tok spalin ve vlhkém normálním stavu. $c_{H_2O}^V$ je objemové procento vlhkosti, $c_{O_2,S}^V$ je objemové procento kyslíku v suchém plynu a $c_{O_2,R}^V$ je referenční objemové procento kyslíku v plynu, který je dán legislativou pro daný zdroj emisí. Pro výpočet \dot{V}_R podle vztahu (6.5.1-3) je nutné vypočítat $c_{O_2,S}^V$, což se provede podle vztahu:

$$c_{O_2,S}^V = c_{O_2,V}^V \cdot \frac{100}{100 - c_{H_2O}^V}, \quad (6.5.1-4)$$

kde $c_{O_2,V}^V$ je objemové procento kyslíku ve vlhkém plynu.

Pro výpočet spotřeby aktivního uhlí podle vztahu (6.5.1-1) zbývá vypočítat požadovanou účinnost separace rtuti MRE , což se provede podle vztahu:

$$MRE = \frac{c_{\text{Hg},r,\text{IN}}^{mV} - c_{\text{Hg},r,\text{OUT}}^{mV}}{c_{\text{Hg},r,\text{IN}}^{mV}} \cdot 100, \quad (6.5.1-5)$$

kde $c_{\text{Hg},r,\text{IN}}^{mV}$ je koncentrace rtuti ve spalinách před technologií čištění a v referenčním stavu.
 $c_{\text{Hg},r,\text{OUT}}^{mV}$ je koncentrace rtuti ve spalinách za technologií čištění a v referenčním stavu.

Vypočtené hodnoty na základě výše uvedeného postupu jsou uvedeny v Tab. 13.

6.5.2 VÝPOČET SPOTŘEBY AKTIVNÍHO UHLÍ PODLE POMĚRU C/Hg

Druhou možnou metodou pro stanovení spotřeby aktivního uhlí je výpočet na základě poměru C/Hg:

$$\dot{m}_{\text{AC}} = \dot{m}_{\text{Hg},\text{IN}} \cdot \frac{C}{\text{Hg}}, \quad (6.5.2-1)$$

kde $\dot{m}_{\text{Hg},\text{IN}}$ je hmotnostní tok rtuti ve spalinách vstupující do technologie čištění spalin.
Hmotnostní tok rtuti $\dot{m}_{\text{Hg},\text{IN}}$ se vypočte podle vztahu:

$$\dot{m}_{\text{Hg},\text{IN}} = c_{\text{Hg},r,\text{IN}}^{mV} \cdot \dot{V}_R, \quad (6.5.2-2)$$

kde $c_{\text{Hg},r,\text{IN}}^{mV}$ je koncentrace rtuti ve spalinách vstupující do technologie čištění a v referenčním stavu.

Pro výpočet spotřeby aktivního uhlí podle vztahu (6.5.2-1) zbývá určit poměr C/Hg, který je stanoven v následujícím oddíle.

6.5.3 STANOVENÍ SPOTŘEBY AKTIVNÍHO UHLÍ

Výpočet spotřeby aktivního uhlí podle oddílů 6.5.1 a 6.5.2 je proveden v Příloze č. 3. Výsledky výpočtu z Přílohy č. 3 jsou uvedeny v Tab. 13. Požadovaná účinnost separace rtuti ze spalin pro denní maximum a denní průměr z Tab. 10 je 92 %, respektive 80 %.

Spotřeba aktivního uhlí podle poměru AC/fly ash je 0,22 kg/h pro denní průměr a 0,81-0,82 kg/h pro denní maximum.

Pro výpočet spotřeby aktivního uhlí podle poměru C/Hg bylo nutné nejdříve zvolit samotný poměr C/Hg. Podle autorů článku [36] byl pro zachycení 92,5 % rtuti a jejích sloučenin zapotřebí poměr C/Hg 13 310 při teplotě 132,8 °C, viz data set č. 19 v Tab. 8. V tomto data setu byla vstupní celková koncentrace rtuti 4,14 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ snížena na výstupní celkovou

koncentraci rtuti $0,31 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Toto je nutné zohlednit pro stanovení optimálního poměru C/Hg, neboť vstupní koncentrace elementární rtuti ve spalovně je až o dva řády vyšší. Dále podle autorů článku [37] bylo zjištěno, že dávkované množství aktivního uhlí v čase nemělo výrazný vliv na účinnost separace rtuti. Proto bude uvažováno, že pro snížení rtuti ve spalinách bude zapotřebí nižší poměr C/Hg. Autoři v článku [34] uvádí, že pro snižování emisí rtuti ve spalinách pro spalovny odpadu je dostačující poměr C/Hg 3 000. Na základě výše uvedených předpokladů je poměr C/Hg stanoven na hodnotu 3 000.

Spotřeba aktivního uhlí podle poměru C/Hg je 2,18-2,20 kg/h pro denní průměr a 6,26-6,33 kg/h pro denní maximum.

Tab. 13 - Výsledky výpočtu spotřeby aktivního uhlí

režim			provozní		maximální	
			denní průměr	denní max	denní průměr	denní max
koncentrace kontaminantů						
objemový tok spalin	\dot{V}_N	[Nm ³ /h]	8 728		9 549	
hmotnostní tok TZL na vstupu	\dot{m}_{FA}	[kg/h]	18,35	55,06	18,13	54,40
hmotnostní tok rtuti na vstupu	$\dot{m}_{Hg,IN}$	[kg/h]	0,92	2,29	0,91	2,27
hmotnostní tok rtuti na výstupu	$\dot{m}_{Hg,OUT}$	[kg/h]	0,18	0,18	0,18	0,18
požadovaná účinnost separace rtuti	MRE	[%]	80	92	80	92
spotřeba AC podle poměru AC/fly ash	\dot{m}_{AC}	[kg/h]	0,22	0,82	0,22	0,81
spotřeba AC podle poměru C/Hg	\dot{m}_{AC}	[kg/h]	2,20	6,33	2,18	6,26
zvolená spotřeba AC	$\dot{m}_{AC,Z}$	[kg/h]	0,80			
zvolená rezerva	R	[%]	20			
spotřeba AC s rezervou	$\dot{m}_{AC,R}$	[kg/h]	0,96			

Pro snižování elementární rtuti ve spalinách je doporučována technologie vstřikování aktivního uhlí do proudu spalin v kombinaci s látkovým filtrem [4]. Vstřikování aktivního uhlí do proudu spalin bude probíhat před kontaktozem. Nevýhodou této technologie je, že na povrchu aktivního uhlí se neadsorbuje pouze rtuť, ale také ostatní kontaminanty přítomné ve

spalinách, např. SO₂, PCDD/F a další těžké kovy, což je nutné zohlednit při volbě spotřeby aktivního uhlí. Dále podle Obr. 24 byl stanoven maximální podíl elementární rtuti ve spalinách 65 %. Z tohoto důvodu je ke zvolené spotřebě aktivního uhlí připočtena 20% rezerva. Výsledná spotřeba aktivního uhlí je 0,96 kg/h.

Zvolení nejnižší vypočtené spotřeby z Tab. 13, respektive zvolení spotřeby stanovené podle poměru AC/fly ash, je provedeno na základě toho, že je uvažována recirkulace zachyceného popílku a aktivního uhlí zpět do kontaktoru. V případě, že při najíždění technologie do provozu nebude splněn požadovaný emisní limit pro rtuť, dojde ke zvýšení spotřeby aktivního uhlí na takovou úroveň, kterou bude požadovaný emisní limit splněn.

6.6 STANOVENÍ TYPU AKTIVNÍHO UHLÍ

Na základě kapitoly 5 jsou vybrány typy aktivního uhlí, které jsou vhodné pro separaci rtuti ze spalin ve spalovně Trmice. Technologie separace rtuti ze spalin je dimenzována pro neimpregnované aktivní uhlí. Toto rozhodnutí je provedeno na základě následujících podmínek:

- 1) Stanovená teplota spalin je v rozsahu 120-150 °C.
- 2) Aktivní uhlí bude disponovat malou velikostí částic.
- 3) V technologii čištění spalin je uvažován kontaktor, který zajistí delší střední dobu zdržení aktivního uhlí ve spalinách.
- 4) Pro separaci TZL je uvažován látkový filtr.
- 5) V technologii čištění spalin je uvažována recirkulace popílku a aktivního uhlí z látkového filtru do kontaktoru.
- 6) Za technologií suchého čištění spalin je zařazeno mokré čištění spalin.
- 7) Technologie čištění spalin disponuje analyzátozem emisí rtuti, který udává zpětnou odezvu pro dávkované množství aktivního uhlí.

Vhodná aktivní uhlí jsou následující: FLUEPAC D (Chemviron), GL 35 (Cabot), GL 50 (Cabot), GL 90 (Cabot). Avšak preferovaná aktivní uhlí jsou od společnosti Cabot Corporation z důvodu dostupných informací, ve kterých se udává velikost částic D₅₀ menší než 25 μm.

Z hlediska bezpečnostních rizik aktivního uhlí jsou v Tab. 14 uvedeny parametry aktivního uhlí, které jsou dostupné z internetové databáze GESTIS-DUST-EX [45]. V databázi není pro

uvedené aktivní uhlí uvedena kategorie hoření BZ. Konstanta K_{St} je rovna 85 (bar·m)/s, tudíž aktivní uhlí patří do kategorie výbušnosti St 1.

Tab. 14 - Parametry aktivního uhlí z databáze GESTIS-DUST-EX [45]

velikost částic	[μm]	<25
vlhkost	[% hm.]	18
minimální explozivní limit	[g/m^3]	125
maximální tlak výbuchu	[bar]	7,9
K_{St}	[(bar·m)/s]	85

6.7 ZPŮSOB SKLADOVÁNÍ A DÁVKOVÁNÍ AKTIVNÍHO UHLÍ

V předchozí podkapitole byla stanovena spotřeba aktivního uhlí pro separaci rtuti. V této podkapitole je uveden způsob skladování a dávkování aktivního uhlí.

6.7.1 ZPŮSOB SKLADOVÁNÍ AKTIVNÍHO UHLÍ

Pro stanovení způsobu skladování aktivního uhlí se zjednodušeně předpokládá, že linka B spalovny bude v provozu každý den 24 hod. Doplnění aktivního uhlí do zásobníku bude probíhat každých 7 dní. Dále se uvažuje, že spotřeba aktivního uhlí bude po většinu provozní doby linky nastavena na hodnotu 0,96 kg/h. Potřebné množství aktivního uhlí pro 7denní provoz linky B se stanoví dle vztahu:

$$m_{AC} = t \cdot \dot{m}_{AC}, \quad (6.7.1-1)$$

kde t je doba provozu linky do dalšího doplnění aktivního uhlí do zásobníku. Po dosazení hodnot do vztahu (6.7.1-1) je potřebné množství aktivního uhlí pro 7denní provoz linky rovno:

$$m_{AC} = (7 \cdot 24) \cdot 0,96 = \underline{\underline{161,3 \text{ kg}}}.$$

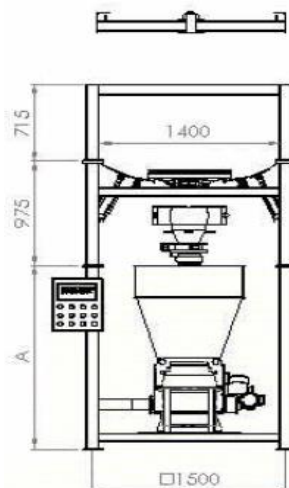
Na základě zjištěného množství aktivního uhlí pro 7denní provoz linky je stanoven způsob skladování v tzv. big-bagu. Aktivní uhlí bude dodáváno v big-bagu o hmotnosti 500 kg, proto je nutné nově stanovit dobu do zpětného doplnění aktivního uhlí pro provoz linky. Doba provozu linky do dalšího doplnění aktivního uhlí při uvažování provozu linky každý den 24 hod je rovna:

$$t = \frac{m_{AC}}{\dot{m}_{AC, \text{střední}}} = \frac{500}{0,96} = 520,83 \text{ hod} = \underline{\underline{21,7 \text{ dnů}}} \quad (6.7.1-2)$$

Způsob skladování aktivního uhlí lze vidět na technologickém schématu v Příloze č. 4. Aktivní uhlí je skladováno v big-bag stanici H1. Doplnění aktivního uhlí je provedeno pomocí jeřábu C1, kterým spalovna již disponuje. Doplnění se provede tak, že se prázdný big-bag nahradí plným big-bagem. Z podkapitoly 5.5 je doporučeno opatřit big-bag protiklenbovacím prvkem, který zajistí lepší přísun materiálu do dávkovacího zařízení. Dále je doporučeno pro uzavírání a otevírání toku materiálu do dávkovacího zařízení použít klapku motýlkového typu. Na základě těchto dvou doporučení je big-bag opatřen mechanickým aktivním prvkem pro zlepšení přísunu aktivního uhlí do dávkovacího zařízení a dále je implementována motýlková klapka FCV 01.

6.7.2 ZPŮSOB DÁVKOVÁNÍ AKTIVNÍHO UHLÍ

Způsob dávkování aktivního uhlí lze vidět na technologickém schématu v Příloze č. 4. Pod big-bag stanicí je umístěn dávkovací systém RA 1. Big-bag stanice třídy SacMaster CHL, kterou lze vidět na Obr. 25, bude dodána od společnosti Schenck Process s.r.o. Rozměr A na obrázku je roven 1 105 mm. Pro dávkování aktivního uhlí je použit diferenciální dávkovací systém ProFlex C od společnosti Schenck Process s.r.o., který lze vidět na Obr. 26. Přesnost dávkování je v rozsahu $\pm 0,5 \%$. Rozsah dávkovaného množství materiálu je od 1 do 50 dm³/h. Při rozsahu sytné hmotnosti aktivního uhlí 450-600 kg/m³ je to tedy 0,45-30 kg/h. Dávkovací systém je opatřen násypkou, jejíž objem je 50 dm³. Hmotnost tohoto dávkovacího systému se udává přibližně 70 kg.



Obr. 25 - SacMaster Schenck process s.r.o. [46]

S ohledem na zvolenou strukturu dávkování aktivního uhlí je třeba navrhnout vhodné regulační obvody, které zajistí, aby bylo uhlí správně dávkováno z big-bagu do násypky dávkovacího systému RA 1 a z něho pak do spalínovodu.



Obr. 26 - Dávkovací systém ProFlex C [46]

6.7.2.1 NÁVRH REGULACE DÁVKOVÁNÍ AKTIVNÍHO UHLÍ

Návrh regulace linky dávkování aktivního uhlí je zpracován na technologickém schématu v Příloze č. 4. V systému řízení dávkování aktivního uhlí jsou následující regulační obvody:

1) Okruh měření tlaku stlačeného vzduchu

V potrubní větvi za dmychadlem je instalován tlakový snímač PIRA 01 se signalizací maximálního tlaku a se zapisováním. V případě překročení maximálního tlaku řídicí systém automaticky sníží otáčky dmyhadla. Dále signalizace upozorní obsluhu, že došlo k překročení maximálního tlaku v potrubní větvi. Na základě této signalizace bude obsluha sledovat chování systému. Pokud bude docházet k opětovnému překračování maximálního tlaku, obsluha manuálně nastaví otáčky dmyhadla na nominální hodnotu a kontaktuje servis. V případě, že i po manuálním nastavení otáček dmyhadla na nominální hodnotu bude docházet k překročení maximálního tlaku, obsluha odstaví celou linku dávkování aktivního uhlí.

2) Okruh měření otáček a teploty motoru dmyhadla se signalizací nízkých otáček

Motor dmyhadla V1 je opatřen snímačem otáček SIA 02 se signalizací nízkých otáček. Pokud dojde během chodu dmyhadla k dosažení meze nízkých otáček, spustí se signalizace, která upozorní obsluhu, že došlo k dosažení meze nízkých otáček. Obsluha na základě signalizace bude sledovat chování systému a vizuálně zkontroluje dmyhadlo. Řídicí systém

automaticky zvýší otáčky dmyhadla V1 do pracovního rozsahu. V případě, že signalizace SIA 02 bude stále zapnuta, obsluha vizuálně zkontroluje dmyhadlo. Pokud dmyhadlo nebude po vizuální kontrole v chodu, okamžitě se vypne linka dávkování aktivního uhlí.

Motor dmyhadla V1 je dále opatřen snímači teploty TA 03 a TZA 04 v rotoru. Při překročení teploty TA 03 se spustí signalizace, která upozorní obsluhu. Při překročení teploty TZA 04 se vypne dmyhadlo V1 a odstaví se celá linka dávkování aktivního uhlí. Při poklesu teploty motoru pod hodnotu TA 03 se opět spustí linka dávkování aktivního uhlí. Pokud po určité době dojde k opětovnému překročení teploty TZA 04, obsluha kontaktuje servis. Pravděpodobná závada bude na frekvenčním měniči dmyhadla. Do příjezdu servisu bude obsluha nastavovat výkon dmyhadla manuálně, tj. nastaví na nominální hodnotu výkonu dmyhadla.

3) Okruh dávkování aktivního uhlí do násypky dávkovacího zařízení

Dávkovací zařízení je opatřeno snímačem otáček motoru dávkovacího zařízení SIR 05, který má pouze informativní charakter. Dále je dávkovací zařízení opatřeno snímačem hmotnosti WIRS 06. V případě, že se dosáhne minimální hmotnosti aktivního uhlí v dávkovacím zařízení, zapne se protiklenbovací zařízení a otevře se motýlkový ventil FCV 01 a zůstane otevřený do té doby, než se dosáhne maximální hmotnosti aktivního uhlí v dávkovacím zařízení. Poté se vypne protiklenbovací zařízení a motýlkový ventil se uzavře.

4) Okruh měření teploty motoru rotačního podavače

Pro ochranu dávkovacího systému RA 1 před přetlakem od dmyhadla V1 je za dávkovacím systémem umístěn rotační podavač RA 2. Pro nenarušení funkce dávkovacího systému je rotační podavač opatřen frekvenčním snímačem. Z tohoto důvodu je motor rotačního podavače opatřen snímači teploty TA 07 a TZA 08. Při překročení teploty TA 07 se spustí signalizace, která upozorní obsluhu. Při překročení teploty TZA 08 se vypne rotační podavač RA 2 a odstaví se celá linka dávkování aktivního uhlí. Při poklesu teploty motoru pod hodnotu TA 07 se opět spustí linka dávkování aktivního uhlí. Pokud po určité době dojde k opětovnému překročení teploty TZA 08, obsluha kontaktuje servis. Pravděpodobná závada bude na frekvenčním měniči rotačního podavače. Do příjezdu servisu bude obsluha nastavovat výkon rotačního podavače manuálně, tj. nastaví na nominální hodnotu výkonu.

5) Okruh dávkování aktivního uhlí do spalínovodu

Výchozí dávkovací množství aktivního uhlí do spalínovodu je dle oddílu 6.5.3 nastaveno na hodnotu cca 1 kg/h. Měření emisí rtuti na výstupu z technologie čištění spalin je provedeno pomocí analyzátoru rtuti. V případě, že analyzátozem nebude naměřena koncentrace rtuti nižší, než je požadovaná koncentrace rtuti dle Tab. 12., bude dávkovací množství aktivního uhlí postupně zvyšováno tak, aby skutečná koncentrace rtuti byla nižší než požadovaná.

6) Okruh měření výšky hladiny aktivního uhlí v big-bagu

Big-bag aktivního uhlí je opatřen hladinovým spínačem LA 09, který sleduje minimální hladinu. V případě, že dojde k překročení této hladiny, upozorní obsluhu, aby vyměnila big-bag.

6.8 VSTŘIKOVÁNÍ AKTIVNÍHO UHLÍ

Aktivní uhlí bude vstřikováno do spalínovodu před kontaktozem pomocí trysky, která je znázorněna na Obr. 27. Tryska 2 je opatřena na své vstupní části přírubou 6 (DN 32). Tryska 2 je umístěna do spalínovodu 1 pomocí přírubového spoje. Tento přírubový spoj se skládá z ploché příruby 4 (DN 150), slepé příruby 5 (DN 150), do které je přivařena tryska, a šroubového spoje 7 (velikost závitu M8). Přírubový spoj je umístěn na trubku 3 a to z důvodu jednoduché demontáže v případě kontroly stavu trysky. Vstřikování AC do proudu spalin je provedeno protiproudě.

Při použití tohoto řešení dochází ke vzniku rizika, že vstřikované částice aktivního uhlí nebudou spalinami unášeny, ale bude docházet k jejich usazování ve spalínovodu. Pro ověření, že částice budou unášeny proudem spalin se nejprve vypočte směšovací poměr aktivního uhlí a spalin:

$$x = \frac{\dot{m}_{AC,Z}}{\dot{m}_{spaliny}}, \quad (6.8-1)$$

kde $\dot{m}_{spaliny}$ je hmotnostní tok spalin, jehož hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10. Směšovací poměr pro provozní hmotnostní tok spalin je roven $9,12 \cdot 10^{-5}$ kg/kg a pro maximální hmotnostní tok je roven $8,34 \cdot 10^{-5}$. Výpočet je proveden v Příloze č. 5.

Směšovací poměr pro provozní a maximální hmotnostní tok spalin je velmi nízký, tudíž lze konstatovat, že jednotlivé částice rozprašené ve spalinách se nebudou vzájemně ovlivňovat a lze možné usazování uvažovat jako usazování jedné částice.

Pro určení usazovací rychlosti je nutné nejdříve určit kritérium $C_D Re^2$ [47]:

$$C_D Re^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot \rho \cdot g}{\mu^2}, \quad (6.8-2)$$

kde d je průměrná velikost částic aktivního uhlí (uvažuje se tvar koule a monodisperzní částice), ρ_s je hustota aktivního uhlí, ρ je hustota spalin, μ je dynamická viskozita spalin.

Hustota spalin ρ se vypočte podle vztahu:

$$\rho = \frac{\dot{m}_{spaliny}}{\dot{V}_{ef}}, \quad (6.8-3)$$

kde \dot{V}_{ef} je objemový tok v provozním stavu a vypočítá se pomocí vztahu:

$$\dot{V}_{ef} = \dot{V}_N \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p}, \quad (6.8-4)$$

kde \dot{V}_N je objemový tok spalin ve vlhkém normálním stavu, T_N je teplota plynu za normálních podmínek, T je teplota plynu za provozních podmínek, p_N je absolutní tlak plynu za normálních podmínek a p je absolutní tlak plynu za provozních podmínek.

Dynamická viskozita spalin se vypočte dle vztahu:

$$\mu = \nu \cdot \rho, \quad (6.8-5)$$

kde ν je kinematická viskozita spalin středního složení pro teplotu 140 °C, která je rovna hodnotě $2,78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Na základě výsledku $C_D Re^2$ lze stanovit v jaké oblasti dochází k usazování [47]:

- 1) Stokesova oblast $C_D Re^2 < 48$, poté platí vztah pro usazovací rychlost

$$u = \frac{D^2 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}{18 \cdot \mu}, \quad (6.8-6)$$

- 2) přechodová oblast $48 < C_D Re^2 < 1,1 \cdot 10^5$, poté platí vztah pro usazovací rychlost

$$u = 0,153 \cdot \frac{D^{1,14} \cdot (\rho_s - \rho)^{0,71} \cdot g^{0,71}}{\rho^{0,29} \cdot \mu^{0,43}}, \quad (6.8-7)$$

- 3) Newtonova oblast $1,1 \cdot 10^5 < C_D Re^2 < 4 \cdot 10^{10}$, poté platí vztah pro usazovací rychlost

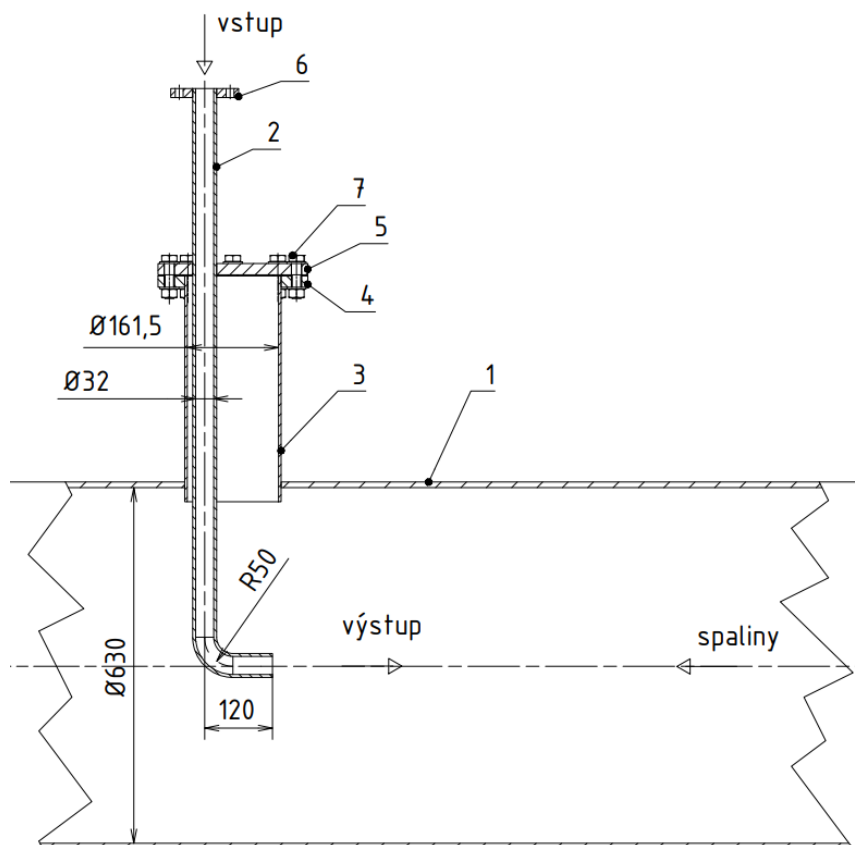
$$u = 1,74 \cdot \sqrt{\frac{D \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}{\rho}}. \quad (6.8-8)$$

Výsledky výše zmíněného postupu výpočtu jsou uvedeny v Tab. 15. Z důvodu toho, že hustota spalin je přibližně stejná jak pro provozní hmotnostní tok spalin, tak i pro maximální provozní tok spalin, proto je uvažována pouze jedna hodnota hustoty spalin. Bezrozměrné kritérium $C_D Re^2$ je rovno 0,65, tudíž se jedná o Stokesovu oblast. Usazovací rychlost lze tedy určit ze vztahu (6.8-6) a po výpočtu získáme hodnotu 0,030 m/s. Z důvodu toho, že usazovací rychlost částic aktivního uhlí je velmi nízká, lze s ohledem na rozměry spalinovodu předpokládat, že nebude docházet k usazování částic aktivního uhlí ve spalinovodu.

Tab. 15 - Vstupní parametry a výsledky výpočtu usazování částic aktivního uhlí

vstupní parametry		
hustota částic aktivního uhlí	[kg/m ³]	2 000
Průměrná velikost částic aktivního uhlí	[m]	2,5·10 ⁻⁵
teplota spalin	[°C]	140
tlak spalin (g) – provozní režim	[Pa]	-350
tlak spalin (g) – maximální režim	[Pa]	-550
barometrický tlak	[Pa]	98 598,15
objemový tok spalin – provozní režim	[Nm ³ /h]	8 728 ⁽¹⁾
140 °C; 98 248,15 Pa (a)	[m ³ /h]	13 615 ⁽²⁾
hmotnostní tok spalin – provozní režim	[kg/h]	10 970
objemový tok spalin – maximální režim	[Nm ³ /h]	9 549 ⁽¹⁾
140 °C; 98 048,15 Pa (a)	[m ³ /h]	14 926 ⁽²⁾
hmotnostní tok spalin – maximální režim	[kg/h]	11 991
výsledky		
hustota spalin – provozní	[kg/m ³]	0,81
hustota spalin – maximální	[kg/m ³]	0,80
dynamická viskozita spalin	[Pa·s]	2,24·10 ⁻⁵
bezrozměrné kritérium $C_D Re^2$	[1]	0,65
usazovací rychlost	[m/s]	0,030
⁽¹⁾ vlhký normální stav		

(2) provozní stav

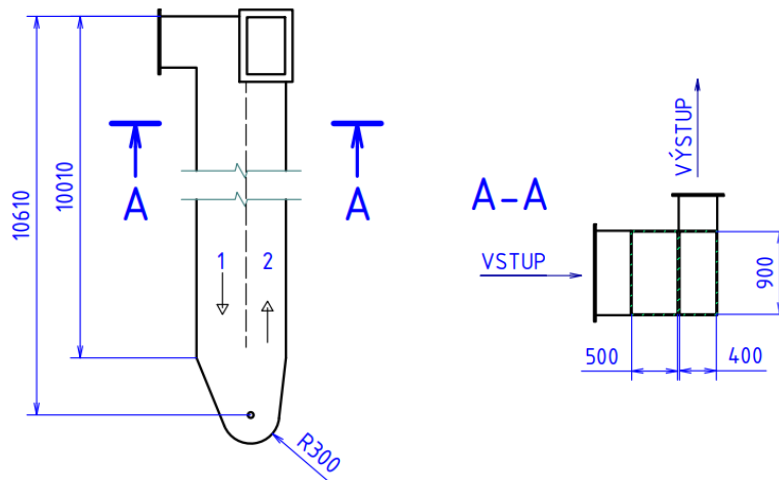


Obr. 27 - Skica vstřikování AC do spalinovodu

6.9 KONTAKTOR

Pro zajištění optimální doby zdržení aktivního uhlí ve spalinách, a tudíž i prodloužení doby kontaktu aktivního uhlí s kontaminanty, je navrženo zařízení, tzv. kontaktor. Princip funkce kontaktoru lze vidět na Obr. 28. Spaliny vstupují do kontaktoru v horní části a proudí směrem k dolní části kontaktoru. V dolní části dochází k otočení směru proudění spalin směrem nahoru. Z důvodu, aby nedocházelo k usazování sorbentů ve spodní části, tak je kontaktor v této části opatřen tzv. rotačním košem. Spaliny vystupují z kontaktoru v horní části. Výrobce kontaktoru bude společnost Eveco, s. r. o, Praha.

Výsledkem návrhu kontaktoru musí být optimální střední doba zdržení spalin v kontaktoru. Tento požadavek může být omezován dispozičními nároky ostatních zařízení nebo přímo spalovny. Pro výpočet kontaktoru se vychází z parametrů uvedených v Tab. 15.



Obr. 28 - Návrh rozměrů kontaktoru

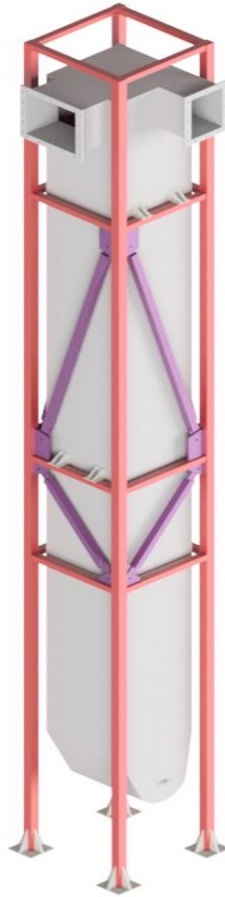
Na základě zadaných a přepočtených objemových průtoků uvedených v Tab. 15 byly vypočteny rozměry kontaktoru, které jsou uvedeny na Obr. 28. Výsledné parametry, které byly vypočteny dle Přílohy č. 8, jsou uvedeny v Tab. 16. Střední doba zdržení byla vypočtena na základě vztahu:

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad (6.9-2)$$

kde V [m³] značí objem kontaktoru a \dot{V} [m³/s] značí objemový průtok spalin kontaktem. Pro stanovení objemu kontaktoru byl použit program Autodesk Inventor, ve kterém byl vytvořen základní model kontaktoru, viz Obr. 29. Jedná se o zjednodušený model, ve kterém není zobrazeno např. připojení pro vstřikování vápenného sorbentu, recirkulace popílku a pohon rotačního koše.

Tab. 16 - Vypočtené parametry kontaktoru

provoz		provozní	maximální
střední rychlost spalin v polovině č. 1	[m/s]	8,40	9,22
střední rychlost spalin v polovině č. 2	[m/s]	10,50	11,53
objem kontaktoru	[m ³]	8,92	
střední doba zdržení	[s]	2,36	2,15



Obr. 29 - Zjednodušený model kontaktoru

6.10 LÁTKOVÝ FILTR

Spaliny vystupující z kontaktoru budou vstupovat přímo do látkového filtru. Výrobce látkového filtru bude společnost ENVIRMINE-ENERGO, a. s. Pro separaci TZL budou použity filtrační hadice, které budou vyrobeny z PTFE v kombinaci s polyimidem. Regenerace látkového filtru bude probíhat za stálého provozu impulsy tlakového vzduchu do filtračních hadic. Maximální dovolená teplota látkového filtru je stanovena společností ENVIRMINE-ENERGO, a. s. na 220 °C. Látkový filtr je opatřen tzv. by-passem. Jedná se o obtokový kanál látkového filtru, kterým v případě překročení max. dovolené teploty budou proudit spaliny.

V programu Autodesk Inventor byl vytvořen zjednodušený model látkového filtru, který lze vidět na Obr. 30.



Obr. 30 - Zjednodušený model látkového filtru

6.11 MĚŘENÍ EMISÍ RTUTI

Měření emisí rtuti na výstupu z technologie čištění spalin lze podle závěrů o BAT prováděcího rozhodnutí komise (EU) 2019/2010 ze dne 12. listopadu 2019 stanovit třemi způsoby, viz Tab. 2:

- 1) denní průměr,
- 2) průměr za interval odběru vzorků,
- 3) dlouhodobý interval odběru vzorků.

První způsob měření patří do skupiny kontinuálního měření. Druhý a třetí způsob patří do skupiny periodického měření rtuti. Emise rtuti je nutné měřit kontinuálně podle závěrů o BAT 2019/2010, avšak pokud spalující odpady budou mít prokázaný nízký a stabilní obsah rtuti, lze kontinuální měření nahradit periodickým měřením. Z důvodu, že toto může prokázat pouze provozovatel spalovny, avšak pouze příslušný úřad může toto prokázání potvrdit, je v této práci uvažována povinnost kontinuálního měření.

Měření emisí rtuti na výstupu z technologie čištění spalin bude probíhat pomocí systému DURAG HM-1400 TRX 2 pro kontinuální měření Hg, který lze vidět na Obr. 31. Tento měřicí systém může vyhodnocovat buď celkovou koncentraci rtuti nebo koncentraci elementární rtuti. Pro stanovení koncentrace rtuti využívá atomovou absorpční spektrometrii. Maximální dovolená teplota spalin se uvádí 300 °C. Rozsah měření pro tento systém je zvolen 0-45 µg/m³. Rozměry tohoto systému jsou (výška x šířka x tloušťka) 1 700 x 800 x 500 mm. Hmotnost systému je cca 220 kg. [48]



Obr. 31 - DURAG HM-1400 TRX 2 [47]

6.12 ODHAD INVESTIČNÍCH NÁKLADŮ

Pro odhad investičních nákladů jednotlivých zařízení byly poptány společnosti, které se zabývají výrobou nebo distribucí potřebných zařízení. V Tab. 17 je uveden seznam poptaných dodavatelů, kterými budou dodána zařízení.

Tab. 17 - Souhrn poptaných dodavatelů

technologie	dodavatel
skladování a dávkování AC	Schenck Process s. r. o.
vstřikování AC	Eveco s. r. o., Praha
kontaktor	Eveco s. r. o., Praha
látkový filtr	ENVIRMINE-ENERGO, a. s.
analyzátor emisí rtuti	EMPLA AG spol. s r.o.

Celkové investiční náklady pro separaci rtuti CINPSR se stanoví následujícím způsobem:

$$CINPSR = INSD + INV + INK + INLF + INAER, \quad (6.12-1)$$

kde *INSD* jsou investiční náklady na skladování a dávkování AC, *INV* jsou investiční náklady na vstřikování AC, *INK* jsou investiční náklady na kontaktor, *INLF* jsou investiční náklady na látkový filtr a *INAER* jsou investiční náklady na analyzátor měření emisí rtuti. Pro potřeby této práce byly dodavateli poskytnuty všechny výše zmíněné položky investičních nákladů, avšak pod podmínkou, že pravá strana rovnice nebude čtenářům diplomové práce dostupná, a to ani v jakékoliv jiné podobě (např. příloha).

CINPSR jsou na základě dodavatelů poptávek stanoveny na 10 950 000 Kč bez DPH. Pro neočekávatelné události je k *CINPSR* připočtena 10% rezerva. Konečné *CINPSR* s 10% rezervou se rovná částce 12 045 000 Kč bez DPH.

V odhadu *CINPSR* jsou zahrnuty pouze náklady na jednotlivá zařízení a jejich prvky měření a regulace. V odhadu *CINPSR* nejsou zahrnuty náklady na montáž jednotlivých zařízení, doprava na místo stavby, demontáž a likvidace stávajících zařízení, úprava stávající budovy spalovny odpadu pro novou technologii, řídicí systém zařízení a napojení nových zařízení na nadřazený řídicí systém.

6.13 ODHAD PROVOZNÍCH NÁKLADŮ

Pro odhad provozních nákladů pro separaci rtuti ze spalin se uvažují pouze náklady spojené se spotřebou aktivního uhlí. V této práci se zanedbávají např. náklady na likvidaci kontaminovaného popílku, náklady na spotřebu elektrické energie jednotlivých zařízení, náklady na personál pro údržbu jednotlivých zařízení, náklady na náhradní díly při naplánovaných odstávkách a náklady na výměnu filtračních hadic LF.

Při odhadu nákupní ceny aktivního uhlí se vychází z databáze BACI od CEPII [49]. Databáze BACI poskytuje roční údaje o dvoustranných obchodních tocích na úrovni produktů. CEPII je přední francouzské centrum pro výzkum a expertizu v oblasti světové ekonomiky.

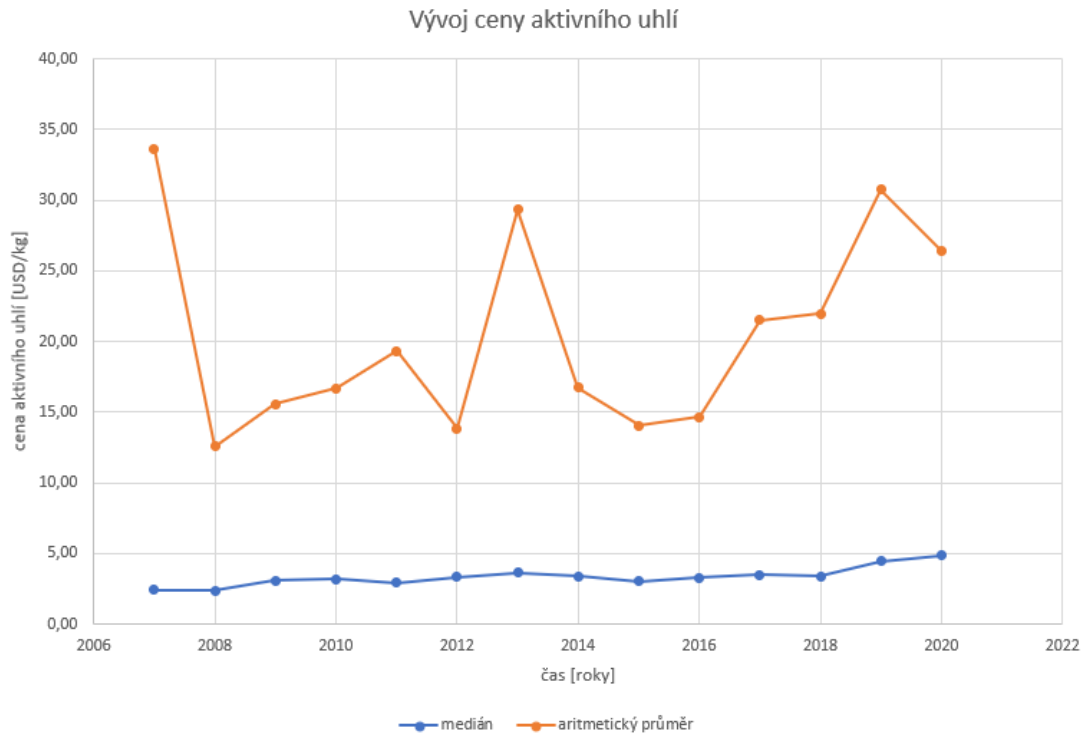
Odhad nákupní ceny aktivního uhlí je proveden v Příloze č. 9. Pro odhad nákupní ceny aktivního uhlí bylo zvoleno časové období od roku 2007 do roku 2020. Pro roky 2021 a 2022 nebyla dostupná data. V databázi byly uvedeny pro každý uzavřený obchod údaje o množství obchodovaného produktu a jeho cena. Následně byl proveden přepočít na poměr cena/množství [USD/kg] pro každý uzavřený obchod. Na základě tohoto přepočtu se pro každý rok provedl výpočet mediánu, aritmetického průměru a jeho směrodatné odchylky. Tyto vypočtené hodnoty lze vidět v Tab. 18. Aritmetický průměr se pohybuje v rozsahu od 12,55 do 33,62 USD/kg. Směrodatná odchylka je v rozsahu od 27,70 do 244,20. Medián,

jehož vývoj lze vidět na Obr. 32, se pohybuje v rozsahu od 2,36 do 4,85 USD/kg. Směrodatná odchylka nabývá vysokých hodnot, proto bylo rozhodnuto, že odhad nákupní ceny se stanoví z hodnot mediánu.

Z mediánu každého roku byl vypočten koeficient růstu. Pomocí jednotlivých koeficientů růstu bylo vypočteno průměrné tempo růstu 5,50 % pro období 2007-2020. Následně pomocí průměrného tempa růstu byla vypočtena průměrná cena aktivního uhlí 5,39 USD/kg pro rok 2022. Tato průměrná cena je zvolena jako nákupní cena práškového aktivního uhlí od dodavatele pro zákazníka. Je na místě zmínit, že uvažovaná cena aktivního uhlí 5,39 USD/kg je pouze orientační, jejíž odhad vychází z veřejné databáze, tudíž skutečná cena od dodavatele pro konkrétní aktivní uhlí bude rozdílná. Dále je nutné předpokládat, že nákupní cena aktivního uhlí se může měnit v závislosti na stavu světové ekonomiky, domácí politice daných zemí exportující aktivní uhlí, cen energií, cen výchozího materiálu potřebného pro výrobu aktivního uhlí a množství odebíraného aktivního uhlí zákazníkem.

Tab. 18 - Vývoj ceny aktivního uhlí

rok	medián	koeficient růstu	aritmetický průměr	směrodatná odchylka
2007	2,42	-	33,62	244,20
2008	2,36	0,9781	12,55	49,57
2009	3,10	1,3105	15,54	85,60
2010	3,16	1,0200	16,70	50,00
2011	2,95	0,9330	19,32	76,18
2012	3,31	1,1221	13,84	27,70
2013	3,66	1,1065	29,32	164,24
2014	3,37	0,9200	16,73	45,31
2015	3,05	0,9058	14,02	41,23
2016	3,29	1,0791	14,66	35,76
2017	3,50	1,0647	21,51	70,39
2018	3,39	0,9672	21,96	101,17
2019	4,47	1,3196	30,74	115,36
2020	4,85	1,0834	26,42	58,21



Obr. 32 - Průběh mediánu a aritmetického průměru v čase

V případě uvažované spotřeby aktivního uhlí cca 1 kg/h a provozní doby 720 h, tj. 24 h po dobu 30 dnů, se provozní náklady na aktivní uhlí předpokládají 3 881 USD, respektive 93 959 Kč bez DPH. Předpokládaná cena za 500kg big-bag je 65 246 Kč bez DPH. Pro stanovení provozních nákladů za aktivní uhlí v české měně byl použit kurz devizového trhu ze dne 27. 07. 2022, tj. 1 USD = 24,21 Kč.

6.14 DISKUZE

Na základě návrhu technologie pro separaci rtuti ze spalin pro spalovnu odpadu v Trmicích budou v této podkapitole zmíněny prvky technologie pro zlepšení do budoucna a diskuze nad investičními náklady pro tuto technologii.

- 1) Prvním prvkem v navrhované technologii pro zlepšení je tvar rozprašovacích trysek, který by zajistil kvalitnější rozprašení sorbentu v celém průřezu spalinovodu. Pro účely této diplomové práce byl navržen jednoduchý tvar trysky, tj. kolmo seříznutá trubka.
- 2) V případě aplikace této technologie v jiné spalovně, je možným prvkem pro optimalizaci kontaktoru. Spočívajícím problémem optimalizace kontaktoru jsou zástavbové nároky nebo provozní rozsah objemového toku spalin, což jsou parametry, které jsou každé spalovny individuální. Zvolený typ kontaktoru pro spalovnu v Trmicích vyniká malými zástavbovými nároky v půdorysu. Na druhou stranu bylo nutné tento kontaktor v jeho spodní části opatřit rotačním košem.
- 3) Celkové investiční náklady na separaci rtuti ze spalin činí 12 045 000 Kč bez DPH. Na první dojem se může zdát, že se jedná o vysokou částku, avšak je nutné zmínit, že v těchto investičních nákladech jsou zahrnuta zařízení, která se využívají pro separaci i jiných kontaminantů. Látkový filtr odlučuje primárně TZL, ale současně se využívá pro separaci kyselých složek spalin pomocí rozprašování vápenného sorbentu, a jen zčásti se tak využívá pro separaci rtuti pomocí rozprašování aktivního uhlí. Takto to platí také v případě kontaktoru, který se využívá pro zajištění optimální doby zdržení spalin pro technologii separace rtuti, ale i kyselých složek ve spalinách.
- 4) V případě potřeby snížení investičních nákladů lze odebrat kontinuální analyzátor emisí rtuti, který je značně nákladný. Toto odebrání však musí být schváleno od povolujícího úřadu. Pokud by došlo k tomuto odebrání, je nutné při prvotním najíždění technologie separace rtuti do provozu zajistit dostatečný počet vzorků spalin pro stanovení skutečných koncentrací rtuti ve spalinách a dle toho nastavit odpovídající spotřebu aktivního uhlí.
- 5) Po uvedení technologie separace rtuti do provozu je doporučeno pravidelně v určitém intervalu provádět analýzu naměřených koncentrací rtuti a spotřebu aktivního uhlí. Na základě výsledků této analýzy lze provést optimalizaci technologie separace rtuti.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla vypracována na téma separace rtuti ze spalin ve spalovně odpadu. Na základě literární rešerše byla v práci navržena technologie adsorpce rtuti na aktivním uhlí. Při návrhu technologie bylo nutné dbát v úvahu vlastnosti spalin a adsorbentu.

V případě vlastností spalin je důležité dbát pozornost na teplotu a složení spalin. Z hlediska teploty platí, že čím je nižší teplota spalin, tím je vyšší zastoupení oxidované formy rtuti ve spalinách, která je dobře rozpustná ve vodě a na TZL. Optimální teplotní rozsah adsorpce rtuti na rozprášeném sorbentu je 120-150 °C. Mezi nejdůležitější prvky spalin pro separaci rtuti patří chloridy, které mají pozitivní vliv na oxidaci rtuti ve spalinách. V případě vlastností sorbentu je zapotřebí zajistit co nejnižší možnou průměrnou velikost částic. Dále pokud teplota spalin je v rozsahu 160-190 °C je zapotřebí zohlednit možnou impregnaci sorbentu.

V rámci diplomové práce bylo zpracováno kompletní technologické schéma linky pro čištění spalin ze spalovny odpadu včetně technologie pro odstranění rtuti ze spalin a také hmotová bilance pro část technologie separace rtuti. Na základě schématu byla popsána a specifikována klíčová zařízení technologie a byly stanoveny základní ekonomické parametry v podobě investičních a provozních parametrů této části linky.

Celkové investiční náklady navržené technologie jsou předpokládány ve výši 12 045 000 Kč bez DPH. V této částce jsou zahrnuty náklady na dodání kontaktoru, látkového filtru, skladování a dávkování aktivního uhlí, vstřikování aktivního uhlí a kontinuálního analyzátoru emisí rtuti. V celkových investičních nákladech nejsou zahrnuty náklady na napojení jednotlivých zařízení na nadřazený řídicí systém, tudíž ani samotný řídicí systém. Dále nejsou zahrnuty náklady na demontáž a likvidaci stávajících zařízení, montáž nových zařízení a úprava stávající budovy spalovny odpadu.

Provozní náklady jsou předpokládány ve výši 93 959 Kč bez DPH pro 720 h provozu technologie. V provozních nákladech jsou zahrnuty pouze náklady pro nákup aktivního uhlí, nejsou zahrnuty např. náklady na likvidaci popílku, náklady na spotřebu elektrické energie jednotlivých zařízení, náklady na personál pro údržbu jednotlivých zařízení, náklady na náhradní díly při naplánovaných odstávkách a náklady na výměnu filtračních hadic látkového filtru.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HOUSEROVÁ, Pavlína, Karel JANÁK a Jana PAVLÍ. *Chemické formy rtuti ve vodních ekosystémech - vlastnosti, úrovně, koloběh a stanovení*. Chemické listy, 2006.
- [2] FARA MILAN. *Problematika emisí rtuti* [online]. 2004. Dostupné z: <http://www.teso.cz/adm/data/files/others/kapitola-1-problematika-emisi-rtuti.pdf>
- [3] STACH, Martin, Zdeněk KLIKA a Lucie BARTOŇOVÁ. *Distribuce a zachytávání rtuti při spalování pevných paliv*. 2005. ISSN 0474-8476.
- [4] EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE. *Best Available Techniques (BAT) reference document for waste incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. [online]. LU: Publications Office, 2019 [vid. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/761437>
- [5] CHALKIDIS, Anastasios, Deshetti JAMPALAH, Amir ARYANA, Colin D. WOOD, Patrick G. HARTLEY, Ylias M. SABRI a Suresh K. BHARGAVA. *Mercury-bearing wastes: Sources, policies and treatment technologies for mercury recovery and safe disposal*. Journal of Environmental Management [online]. 2020, 270, 110945. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110945>
- [6] RICHAUD, Raphaëlle, Hervé LACHAS, Anne-Gaëlle COLLOT, Anthony G. MANNERINGS, Alan A. HEROD, Denis R. DUGWELL a Rafael KANDIYOTI. *Trace mercury concentrations in coals and coal-derived material determined by atomic absorption spectrophotometry*. Fuel [online]. 1998, 77(5), 359–368. ISSN 00162361. Dostupné z: [doi:10.1016/S0016-2361\(98\)80025-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)80025-2)
- [7] JIŘÍ PÍŠA. *Metody pro stanovení Hg v emisích a imisích*. nedatováno, 16.
- [8] ČSN EN ISO 12 846. *Kvalita vod - Stanovení rtuti - Metoda atomové absorpční spektrometrie (AAS) po zkoncentrování a bez něj*. B.m.: Sweco Hydroprojekt a.s. 2012. Třídící znak 75 7439
- [9] ISO 16772:2004. *Soil quality. Determination of mercury in aqua regia soil extracts with cold vapour atomic spectrometry or cold-vapour atomic fluorescence spectrometry*. 2004.
- [10] ČSN EN 13211 (834760). *Kvalita ovzduší - Stacionární zdroje emisí - Manuální metoda stanovení celkové hmotnostní koncentrace rtuti*. 2002.
- [11] D22 COMMITTEE. *Test Method for Elemental, Oxidized, Particle-Bound and Total Mercury in Flue Gas Generated from Coal-Fired Stationary Sources (Ontario Hydro Method)* [online]. B.m.: ASTM International. [vid. 2022-05-31]. Dostupné z: [doi:10.1520/D6784-16](https://doi.org/10.1520/D6784-16)
- [12] *ASTM D6784-02 (Ontario Hydro) Diagram – Apex Instruments* [online]. [vid. 2022-05-28]. Dostupné z: https://www.apexinst.com/?attachment_id=1817
- [13] DAVID MILDE. *Atomová absorpční spektrometrie*. 2017

- [14] ČERNOHORSKÝ T. a JANDERA P. *Atomová spektrometrie*. B.m.: Univerzita Pardubice. 1997
- [15] DĚDINA J., FARA M., KOLIHOVÁ D., KOREČKOVÁ J., MUSIL J., PLŠKO E., a SYCHRA V. *Vybrané metody analytické atomové spektrometrie*. B.m.: Československá spektroskopická společnost. 1987
- [16] ELIŠKA ORAVCOVÁ. *Nové trendy v konstrukci atomových absorpčních spektrometrů*. Pardubice, 2009. Univerzita Pardubice, fakulta chemicko-technologická.
- [17] ČESKO. Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí - znění od 1. 7. 2017. In: *Zákony pro lidi. cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 28. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1992-17>
- [18] ČESKO. Zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a o omezování znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů (zákon o integrované prevenci) - znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 28. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-76>
- [19] ČESKO. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší - znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 28. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [20] ČESKO. Vyhlášky č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší - znění od 1. 1. 2020. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 28. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [21] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění) Text s významem pro EHP. In: *Úřední věstník*, L 334, 17. 12. 2010, s. 17-119. ISSN 1725-2555. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL%3A2010%3A334%3ATOC>
- [22] Prováděcí rozhodnutí Komise (EU) 2019/2010 ze dne 12. listopadu 2019, kterým se stanoví závěry o nejlepších dostupných technikách (BAT) pro spalování odpadu podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU (oznámeno pod číslem C(2019) 7987). In: *Úřední věstník*, L 312, 3. 12. 2019, s. 55. ISSN 1977-0626. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=OJ:L:2019:312:TOC#TN1>
- [23] GORE Mercury Control Systems. *Gore* [online]. [vid. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.gore.com/products/gore-mercury-control-systems>
- [24] DETO BRNO. *Katalogový list - Aktivní uhlí*. 2022
- [25] BANDOSZ, Teresa J., ed. *Activated carbon surfaces in environmental remediation*. 1st ed. Amsterdam London: Elsevier, 2006. Interface science and technology, 7. ISBN 978-0-12-370536-5.

- [26] CORPORATION, Calgon Carbon. FLUEPAC Powdered Activated Carbon for Mercury Removal. *Calgon Carbon Corporation* [online]. [vid. 2022-06-25]. Dostupné z: <https://www.calgoncarbon.com/products/fluepac/>
- [27] Home. *Cabot Corporation* [online]. [vid. 2022-06-25]. Dostupné z: <https://www.cabotcorp.com/>
- [28] JUERGEN WIRLING a JOERG JABLONSKI. *Safety aspects in the use of carbonaceous sorbents during waste gas treatment*. Metallurgical Plant and Technology. 2007(3). 144–152.
- [29] VDI. *VDI 2263 - Dust fires and dust explosions - Hazards - assessment - safety measures*. 2018
- [30] H. BECK, N. GLIENKE, a C. MÖHLMANN. *Combustion and explosion characteristics of dusts*. B.m.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften - HVBG. únor 2001
- [31] SVOBODA, Karel, Miloslav HARTMAN, Michal ŠYC, Michael POHOŘELÝ, Petra KAMENÍKOVÁ, Michal JEREMIÁŠ a Tomáš DURDA. *Possibilities of mercury removal in the dry flue gas cleaning lines of solid waste incineration units*. Journal of Environmental Management [online]. 2016, 166, 499–511. ISSN 03014797. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jenvman.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.001)
- [32] ZHAO, Shilin, Deepak PUDASAINEE, Yufeng DUAN, Rajender GUPTA, Meng LIU a Jianhong LU. *A review on mercury in coal combustion process: Content and occurrence forms in coal, transformation, sampling methods, emission and control technologies*. Progress in Energy and Combustion Science [online]. 2019, 73, 26–64. ISSN 03601285. Dostupné z: [doi:10.1016/j.pecs.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.02.001)
- [33] RUMAYOR, M., K. SVOBODA, J. ŠVEHLA, M. POHOŘELÝ a M. ŠYC. *Mercury removal from MSW incineration flue gas by mineral-based sorbents*. Waste Management [online]. 2018, 73, 265–270. ISSN 0956053X. Dostupné z: [doi:10.1016/j.wasman.2017.12.007](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.007)
- [34] PAVLISH, John H, Everett A SONDRREAL, Michael D MANN, Edwin S OLSON, Kevin C GALBREATH, Dennis L LAUDAL a Steven A BENSON. *Status review of mercury control options for coal-fired power plants*. Fuel Processing Technology [online]. 2003, 82(2–3), 89–165. ISSN 03783820. Dostupné z: [doi:10.1016/S0378-3820\(03\)00059-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(03)00059-6)
- [35] CHOI, H.K., S.H. LEE a S.S. KIM. *The effect of activated carbon injection rate on the removal of elemental mercury in a particulate collector with fabric filters*. Fuel Processing Technology [online]. 2009, 90(1), 107–112. ISSN 03783820. Dostupné z: [doi:10.1016/j.fuproc.2008.08.001](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.08.001)
- [36] FLORA, Joseph R.V., Richard A. HARGIS, William J. O'DOWD, Henry W. PENNLINE a Radisav D. VIDIC. *Modeling Sorbent Injection for Mercury Control in Baghouse Filters: II—Pilot-Scale Studies and Model Evaluation*. Journal of the Air & Waste Management Association [online]. 2003, 53(4), 489–496. ISSN 1096-2247, 2162-2906. Dostupné z: [doi:10.1080/10473289.2003.10466172](https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466172)

- [37] LI, Guoliang, Qingru WU, Shuxiao WANG, Zhenya DUAN, Haitao SU, Lei ZHANG, Zhijian LI, Yi TANG, Minjiang ZHAO, Lei CHEN, Kaiyun LIU a Yong ZHANG. *Improving Flue Gas Mercury Removal in Waste Incinerators by Optimization of Carbon Injection Rate*. Environmental Science & Technology [online]. 2018, 52(4), 1940–1945. ISSN 0013-936X, 1520-5851. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.7b05560
- [38] ZVVZ-ENVEN ENGINEERING, A.S. *Elektrické odlučovače*
- [39] ZVVZ-ENVEN ENGINEERING, A.S. *Látkové filtry*
- [40] WANG, Yun-jun, Yu-feng DUAN, Li-guo YANG, Yi-man JIANG, Cheng-jun WU, Qian WANG a Xiang-hua YANG. *Comparison of mercury removal characteristic between fabric filter and electrostatic precipitators of coal-fired power plants*. Journal of Fuel Chemistry and Technology [online]. 2008, 36(1), 23–29. ISSN 18725813. Dostupné z: doi:10.1016/S1872-5813(08)60009-2
- [41] Mikulec, M.: *Průmyslová vážicí technika*. Praha: Schenck s.r.o., 2000.
- [42] LYN BYTES, SHRIKANT DHODAPKAR, a GEORGE KLINZING. *Discharge Aids*. SHAPA technical paper. nedatováno, 2007(12), 37.
- [43] MILLS, David, Mark G. JONES a Vijay K. AGARWAL. *Handbook of pneumatic conveying engineering*. New York : London: Marcel Dekker ; Taylor & Francis, 2004. Mechanical engineering, 165. ISBN 978-0-8247-4790-9.
- [44] JIŘÍ HEMERKA. *Teoretické základy pneumatické dopravy*. B.m.: Fakulta strojní ČVUT v Praze
- [45] *GESTIS - DUST-EX* [online]. [vid. 2022-06-26]. Dostupné z: <https://staubex.ifa.dguv.de/?lang=e>
- [46] Schenck Process s.r.o. - *Dávkovací a vážicí technika*.
- [47] RIEGER, František, Václav NOVÁK, Tomáš JIROUT, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, STROJNÍ FAKULTA. *Hydromechanické procesy I*. Praha: Vydavatelství CVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03286-2.
- [48] DURAG GROUP. *Technical datasheet HM-1400 TRX 2 / EN*. 2022
- [49] *CEPII - BACI* [online]. [vid. 2022-07-25]. Dostupné z: http://www.cepii.fr/CEPII/en/bdd_modele/bdd_modele_item.asp?id=37

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$C_D Re^2$	[1]	bezrozměrné kritérium
c_{FA}^{mV}	[kg/Nm ³]	hmotnostně-objemová koncentrace TZL ve spalínách v referenčním stavu
$c_{H_2O}^V$	[% obj.]	objemové procento vlhkosti
$c_{Hg,r,IN}^{mV}$	[kg/Nm ³]	hmotnostně-objemová koncentrace rtuti ve spalínách na vstupu do technologie čištění spalin v referenčním stavu
$c_{Hg,r,OUT}^{mV}$	[kg/Nm ³]	hmotnostně-objemová koncentrace rtuti ve spalínách na výstupu z technologie čištění spalin v referenčním stavu
$c_{O_2,r}^V$	[% obj.]	referenční objemové procento kyslíku
$c_{O_2,s}^V$	[% obj.]	objemové procento kyslíku v suchém plynu
$c_{O_2,v}^V$	[% obj.]	objemové procento kyslíku ve vlhkém plynu
$CINPSR$	[Kč bez DPH]	celkové investiční náklady pro separaci rtuti
d	[m]	průměrná velikost částic aktivního uhlí
$INAER$	[Kč bez DPH]	investiční náklady na analyzátor měření emisí rtuti
INK	[Kč bez DPH]	investiční náklady na kontaktor
$INLF$	[Kč bez DPH]	investiční náklady na látkový filtr
$INSD$	[Kč bez DPH]	investiční náklady na skladování a dávkování AC
INV	[Kč bez DPH]	investiční náklady na vstřikování AC
K_{ST}	[(bar·m)/s]	konstanta rychlosti nárůstu tlaku
\dot{m}_{AC}	[kg/h]	spotřeba aktivního uhlí
$\dot{m}_{AC,R}$	[kg/h]	spotřeba aktivního uhlí s rezervou
$\dot{m}_{AC,Z}$	[kg/h]	zvolená spotřeba aktivního uhlí
\dot{m}_{FA}	[kg/h]	hmotnostní tok TZL
$\dot{m}_{Hg,IN}$	[kg/h]	hmotnostní tok rtuti na vstupu do technologie čištění spalin
$\dot{m}_{Hg,OUT}$	[kg/h]	hmotnostní tok rtuti na výstupu do technologie čištění spalin
$\dot{m}_{spaliny}$	[kg/h]	hmotnostní tok spalin

MRE	[%]	účinnost separace rtuti ze spalin
p	[Pa]	absolutní tlak plynu za provozních podmínek
p_{max}	[bar]	maximální přetlak výbuchu
p_N	[Pa]	absolutní tlak plynu za normálních podmínek
R	[%]	rezerva pro spotřebu aktivního uhlí
R^2	[1]	koeficient determinance
T	[K]	teplota plynu za provozních podmínek
T_N	[K]	teplota plynu za normálních podmínek
u	[m/s]	usazovací rychlost částic aktivního uhlí
\dot{V}_N	[Nm ³ /h]	objemový tok spalin za normálních podmínek
\dot{V}_R	[Nm ³ /h]	objemový tok spalin za referenčních podmínek
x	[kg/kg]	směšovací poměr
ρ	[kg/m ³]	hustota spalin
ρ_s	[kg/m ³]	hustota částic aktivního uhlí
μ	[Pa·s]	dynamická viskozita spalin
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita spalin
AC		aktivní uhlí
BAT		Best Available Techniques
BZ		kategorie hoření partikulárního materiálu
EO		elektrostatický odlučovač
LF		látkový filtr
USE		system usazovacích elektrod
VNE		system vysokonapěťových elektrod

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Typické složení čistírenských kalů [4]	7
Tab. 2 - Emisní limit Hg a její sloučenin stanovené prováděcím rozhodnutím komise (EU) 2019/2010 [22]	17
Tab. 3 - Nejlepší dostupné techniky (BAT) pro snižování emisí rtuti, dle 2019/2010 [22] ..	18
Tab. 4 - Dostupné parametry aktivního uhlí řady FLUEPAC [26]	25
Tab. 5 - Dostupné parametry aktivního uhlí od společnosti Cabot Corporation [27]	25

Tab. 6 - Rozdělení výbuchu dle závažnosti [30].....	26
Tab. 7 - Kategorie hoření [30]	27
Tab. 8 - Naměřená data z článku [36].....	32
Tab. 9 - Parametry elektráren [40].....	40
Tab. 10 - Zadané parametry spalín	47
Tab. 11 - Výpočetní stavy spalín a koncentrací.....	48
Tab. 12 - Požadovaná celková koncentrace rtuti na výstupu z komína.....	48
Tab. 13 - Výsledky výpočtu spotřeby aktivního uhlí.....	53
Tab. 14 - Parametry aktivního uhlí z databáze GESTIS-DUST-EX [45].....	55
Tab. 15 - Vstupní parametry a výsledky výpočtu usazování částic aktivního uhlí.....	61
Tab. 16 - Vypočtené parametry kontaktoru	63
Tab. 17 - Souhrn poptaných dodavatelů	66
Tab. 18 - Vývoj ceny aktivního uhlí	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Schéma zařízení pro odběr vzorku metodou Ontario-Hydro [12].....	10
Obr. 2 - Výbojka s dutou katodou [13]	12
Obr. 3 - Bezelektrodová výbojka [13]	12
Obr. 4 - Superlampa [16]	12
Obr. 5 - Rozdělení technik pro snižování emisí rtuti	20
Obr. 6 - SPC modul od společnosti GORE [23]	21
Obr. 7 - Výsledky měření výstupní koncentrace elementární rtuti v čase [35]	31
Obr. 8 - Účinnost separace elementární rtuti v čase [35].....	31
Obr. 9 - Závislost účinnosti separace rtuti na poměru C/Hg [36].....	33
Obr. 10 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na množství dávkovaného m_{AC} [37]	34
Obr. 11 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/waste [37]	35
Obr. 12 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/gas [37].....	35
Obr. 13 - Graf závislosti účinnosti separace rtuti na poměru AC/fly ash [37]	36
Obr. 14 - Princip EO [38]	37
Obr. 15 - Látkový filtr [39].....	39
Obr. 16 - Konstrukční provedení šneku a spirály [41].....	41
Obr. 17 - Pro vzdušňovací podložky (vlevo) a pulzní trysky (vpravo) [42].....	41

Obr. 18 - Vibrační systém odstraňování klenby [42].....	42
Obr. 19 - Pružná stěna [41].....	42
Obr. 20 - Schéma diferenciální dávkovací váhy [34]	43
Obr. 21 - Podtlaková pneumatická doprava [43]	44
Obr. 22 - Přetlaková pneumatická doprava [43].....	44
Obr. 23 - Smíšená pneumatická doprava [43]	45
Obr. 24 - Závislost podílu elementární rtuti na koncentraci chloridů ve spalinách [4]	50
Obr. 25 - SacMaster Schenck process s.r.o. [46]	56
Obr. 26 - Dávkovací systém ProFlex C [46].....	57
Obr. 27 - Skica vstříkování AC do spalínovodu	62
Obr. 28 - Návrh rozměrů kontaktoru	63
Obr. 29 - Zjednodušený model kontaktoru	64
Obr. 30 - Zjednodušený model látkového filtru.....	65
Obr. 31 - DURAG HM-1400 TRX 2 [47]	66
Obr. 32 - Průběh mediánu a aritmetického průměru v čase.....	69

PŘÍLOHY

Přílohy jsou součástí této diplomové práce ve formátu CD.

- Příloha č. 1 ... 02-001 Technologické schéma – současný stav linky B (PDF)
- Příloha č. 2 ... 02-002 Technologické schéma – realizační stav linky B (PDF)
- Příloha č. 3 ... Výpočet spotřeby aktivního uhlí (EXCEL)
- Příloha č. 4 ... 03-001 Technologické schéma – skladování a dávkování (PDF)
- Příloha č. 5 ... Výpočet usazovací rychlosti (EXCEL)
- Příloha č. 6 ... 3D model kontaktoru (STP)
- Příloha č. 7 ... 3D model látkového filtru (STP)
- Příloha č. 8 ... Výpočet kontaktoru (EXCEL)
- Příloha č. 9 ... Výpočet ceny aktivního uhlí (EXCEL)