

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh zkušebního zařízení pro výzkum emisí rtuti ze
spalování uhlí

Design of Treatment Facilities for Research in Mercury
Emissions from Coal Combustion

Autor:

Bc. Zuzana Vávrová

Vedoucí práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zuzana Vávrová**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh zkušebního zařízení pro výzkum emisí rtuti ze spalování uhlí**
Design of Treatment Facilities for Research in Mercury Emissions from Coal Combustion

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh zkušebního zařízení pro výzkum možnosti snižování emisí rtuti ze spalování pevných fosilních paliv.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Popis problematiky emisí rtuti z fosilních paliv a výhled připravované legislativy.
2. Základní návrh a bilanční výpočty pilotního zkušebního zařízení.
3. Konstruktivní návrh zkušebního zařízení s využitím katalyzátorů.

Grafické práce:

1. Schéma zkušebního zařízení.
2. Výrobní výkresová dokumentace zkušebního zařízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Čemý, V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975.
- [2] Kolat, P. Přenos tepla a hmoty, skripta VŠB Ostrava 1987.
- [3] ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.
- [4] Dlouhý, T. Výpočty kotlů a spalinových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005
- [5] Podklady a materiály katedry energetiky pro metody SCR.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



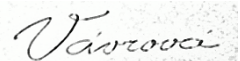

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 18. 5. 2015

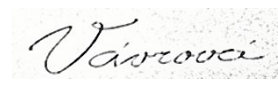


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo na nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užit (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvou s oprávněním užití dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. 5. 2015



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Zuzana Vávrová

Adresa trvalého pobytu autora práce: 17. listopadu 1137/27A 736 01 Havířov-Město

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vávrová, Z. *Návrh zkušebního zařízení pro výzkum emisí rtuti ze spalování uhlí: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 72 s, Vedoucí práce: Čech, B.

Předmětem diplomové práce je návrh zkušebního zařízení pro výzkum emisí rtuti ze spalování uhlí využívající metody selektivní katalytické redukce. V teoretické části je uvedena problematika emisí rtuti, vznik při spalování uhlí, výhled připravované legislativy a metody pro odstranění rtuti ze spalin. V další části je vyhodnoceno měření emisí rtuti z Elektrárny Dětmárovice, kde se bude zkušební zařízení nacházet. Následuje popis zařízení, zapojení zařízení do druhého tahu kotle, výpočet tlakové ztráty a návrh ventilátoru. Na závěr je provedena bilance zkušebního zařízení.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VÁVROVÁ, Z. *Design of Treatment Facilities for Research in Mercury Emissions from Coal Combustion: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2015, 72 p. Thesis head: Čech, B.

The subject of this thesis is the design of treatment facilities for research in mercury emissions from coal combustion using the method of selective catalytic reduction. Issue of mercury emissions, formation during the combustion, outlook upcoming legislation and methods for removing mercury from flue gases are presented in the theoretical part. The next part is evaluated by measuring mercury emissions from the power plant Dětmárovice where the treatment facility will be located. Followed by the description of the facility, connecting facility into the second boiler draft, pressure drop calculation and draft fan. At the end there is a balance of treatment facility.

Obsah

1. Úvod	11
2. Rtuť	12
3. Emise rtuti	12
3.1 Formy rtuti v atmosféře	15
4. Legislativa	16
5. Metody měření rtuti v únicích do ovzduší	18
5.1 Manuální metody stanovení	18
5.2 On-line metody stanovení	19
6. Vznik emisí rtuti při spalování uhlí	19
7. Metody pro odstranění rtuti ze spalin energetických zařízení	20
7.1 Co-benefit odsiřování a denitrifikace	21
7.1.1 Odsiřování	21
7.1.2 Redukce NO _x	22
8. Selektivní katalytická redukce SCR	23
8.1 Průběh oxidace rtuti na povrchu katalyzátoru	23
8.2 Druhy katalyzátorů	25
8.3 Technologické varianty SCR	27
9. Měření rtuti na výrobním bloku v Elektrárně Dětmarovice	29
10. Návrh zařízení	35
10.1 Popis zařízení	36
10.2 Umístění zařízení	37
11. Výpočet tlakové ztráty	39
11.1 Vlastnosti spalin	41
11.1.1 Hustota spalin	47
11.1.2 Kinematická viskozita spalin	49
11.2 Součinitel tření	50
11.3 Součinitel místního odporu	51
11.4 Rychlosti v zařízení	53
11.5 Tlaková ztráta zařízení	54
12. Návrh ventilátoru	59
12.1 Úprava ventilátoru	63
13. Bilance zařízení	64
14. Závěr	70

15. Seznam použité literatury	71
16. Seznam příloh.....	72

Seznam použitých značek a symbolů

Značení	Jednotka	Význam
A	[%]	obsah popela
C	[%]	obsah uhlíku
d	[m]	průměr
H	[%]	obsah vodíku
l	[m]	délka
\dot{m}	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní průtok
M_v	[-]	opravný součinitel kinematické viskozity
n	[-]	počet otvorů katalyzátoru
N	[%]	obsah dusíku
O	[%]	obsah kyslíku
O	[m]	obvod
p	[Pa]	tlak
Q_i	[MJ.kg ⁻¹]	výhřevnost
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[%]	obsah síry
S	[m ²]	plocha
T	[°C]	teplota
V	[Nm.kg ⁻¹]	objem složky ve spalínách
\dot{V}	[m ³ .s ⁻¹]	objemový průtok
w	[m.s ⁻¹]	rychlost
W	[%]	obsah vody, vlhkost
x	[-]	opravný součinitel pro oblouková kolena
α	[-]	součinitel přebytku spalovacího vzduchu
Δ	[Pa], [mg.Nm ⁻³]	ztráta, difference
η	[-]	účinnost
λ	[-]	součinitel tření

ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
ξ	$[-]$	součinitel místního odporu
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota
χ_v	$[-]$	součinitel vlhkého vzduchu
ω	$[\%]$	objemový podíl

Dolní indexy

Index	Význam
0	vstupní
1	výstupní
Ar	argon
c	celkové
CO ₂	oxid uhličitý
ekv	ekvivalentní
H ₂ O	voda; vodní pára
i	složka
m	místní
měř	měřené
min	minimální (teoretický)
n	normální podmínky
N ₂	dusík
O ₂	kyslík
SO ₂	oxid siřičitý
ss	spaliny suché
stř	střední
sv	spaliny vlhké
t	třecí
vs	vzduch suchý
vv	vzduch vlhký

Horní indexy

Index	Význam
0	atomární
2+	oxidovaná
p	vázaná na jemnozrnné částice

1. Úvod

Trendem poslední doby je čím dál větší zájem o životní prostředí a zdraví člověka; s tím je spojena i problematika vypouštění znečišťujících látek do ovzduší, tedy emisí.

Nedávno se začaly řešit emise rtuti. Zjistilo se totiž, že je rtuť pro člověka velice nebezpečná a způsobuje vážné zdravotní potíže. Z těchto důvodů se začalo zkoumat, jak emise rtuti vznikají, jaké mají vlastnosti, jak se šíří a především jakými způsoby by bylo možné tomuto vzniku zabránit.

Mezi jedny z hlavních zdrojů emisí rtuti patří zařízení spalující tuhá fosilní paliva. Nepředpokládá se, že by v blízké době bylo spalování fosilních paliv na ústupu, a proto se stále bude jednat o jeden z hlavních zdrojů energie. Problematika emisí rtuti se tak stává aktuální a kromě toho i globální záležitostí.

Některé země, jako Kanada nebo USA, již zavedly přísná opatření ohledně snižování emisí rtuti. Staly se tak inspirací pro ostatní státy, které se na tyto změny teprve chystají. Je však jasné, že v příštích několika letech se budou emise rtuti řešit v celosvětovém měřítku, jako je tomu dnes např. u oxidů dusíku.

Výzkumy prokázaly, že na snižování emisí rtuti, vzniklých spalováním tuhých fosilních paliv, mají pozitivní vliv různé metody a technologie. Stěžejní a zároveň dostupnou technologií je využití katalyzátoru v kombinaci s odsiřovacím zařízením.

Z těchto důvodů je cílem této práce navrhnout zkušební zařízení, které bude využívat katalyzátor, tak aby bylo možné sledovat jeho aktivitu vzhledem ke rtuti a případně navrhnout její účinné zachycování.

2. Rtuť

Rtuť je kovový, velice toxický, prvek s chemickým označením Hg. Patří mezi jediné dva prvky, které se za normálních podmínek vyskytují v kapalném stavu. Stejně jak v tuhé, tak i v kapalně formě si rtuť zachovává svoji stříbřitou barvu. Rtuť začíná tuhnout při teplotě - 38,8 °C a vypařuje se při teplotě 356,7 °C, přičemž páry rtuti jsou bezbarvé a velice jedovaté. [1]

Rtuť je známá přibližně 4000 let. Již staří Egypťané a Řekové ji používali nejen pro léčebné a kosmetické účely, ale zejména pro schopnost rtuti tvořit amalgámy. Další rozvoj v použití rtuti nastal až s rozkvětem přírodních věd během 17. století. Od té doby se můžeme setkat se rtutí například u baterií, zářivek, barev, elektrických a měřících zařízení, zubních výplní aj. [1][2]

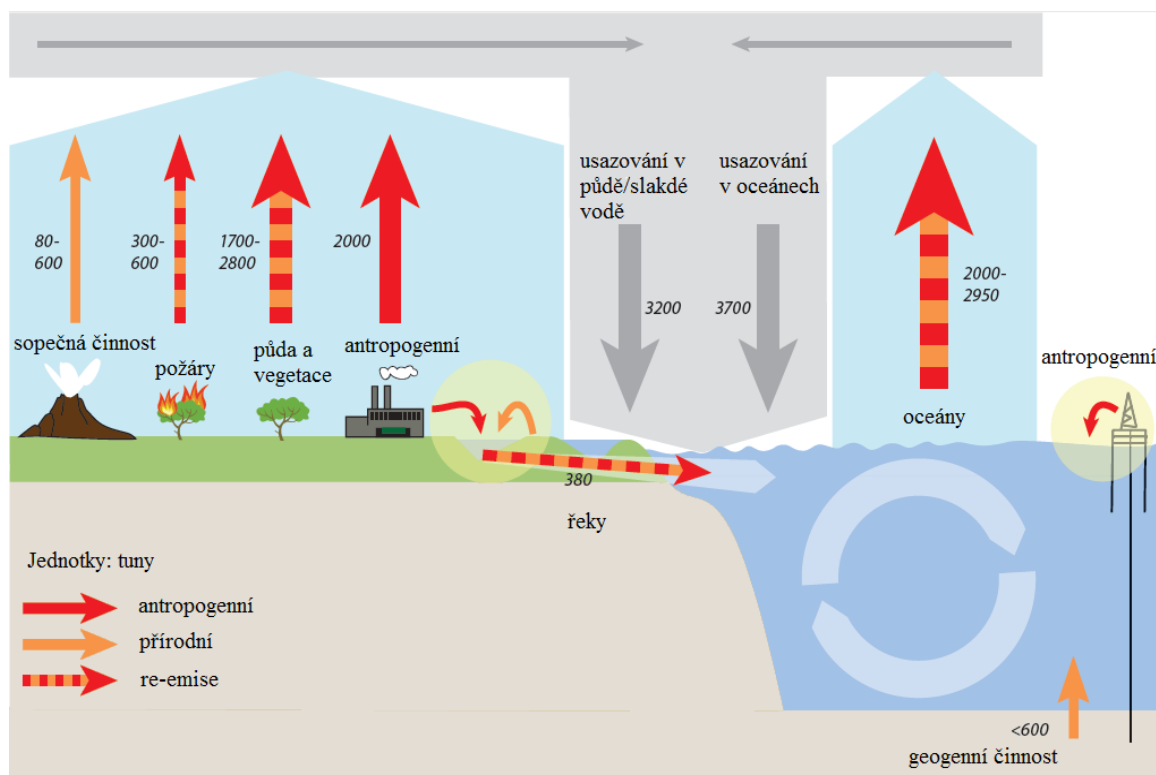
Toxicita rtuti

Rtuť je pro člověka a živé organismy velice nebezpečná. Je to silný neurotoxin, který se v lidském organismu akumuluje a velice pomalu a špatně se z těla vylučuje. Do těla se dostává zejména inhalacemi par rtuti nebo konzumací potravin. Rtuť v těle způsobuje především poškození nervové soustavy, ledvin, dýchacích cest aj. nemluvě o škodlivých účincích na kojence a ještě nenarozené děti. [3] [9] Nejvíce toxickou a akumulativní formou rtuti je tzv. methylртуť, která představuje největší zdravotní riziko pro lidi i zvířata. Tato forma rtuti se tvoří hlavně ve vodním prostředí. [4]

3. Emise rtuti

Tato kapitola je zpracována na základě analýzy programu OSN pro životní prostředí (UNEP) [4]

Rtuť je uvolňována do životního prostředí nejen z přírodních procesů a zdrojů, ale také jako výsledek lidské činnosti. Jakmile rtuť jednou vstoupí do ovzduší, koluje mezi vzduchem, zemí a vodou do té doby než je z tohoto cyklu odstraněna např. usazováním v sedimentech oceánů či sedimentech jezer nebo může být zachycena v minerálních složkách. Tento cyklus rtuti je znázorněn na obrázku 2.1



Obrázek 2.1 cyklus rtuti s ročními hodnotami v tunách [4]

Zdroje emisí rtuti můžeme rozdělit, dle původu, na:

- Přírodní zdroje
- Antropogenní zdroje
- Re-emise rtuti

Přírodní zdroje

Rtuť může být ze zemské kůry uvolňována několika způsoby. Jedná se o zvětrávání hornin, sopečné erupce a také geotermální aktivitu. Přírodní zdroje tvoří přibližně 10% z celkového množství emisí rtuti.

Antropogenní zdroje

Antropogenní zdroje představují asi 30% z celkového množství emisí rtuti vstupující ročně do atmosféry. Přičemž hlavními producenty těchto emisí rtuti jsou:

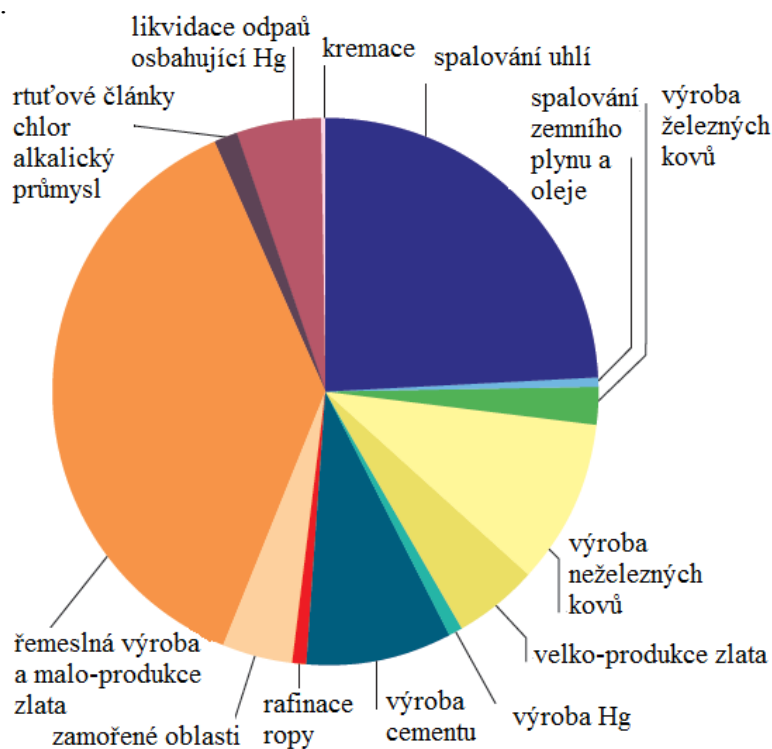
- Řemeslná výroba a malo-produkce zlata
- Spalování uhlí
- Těžba
- Výroba železa a neželezných kovů
- Výroba cementu

Při činnostech jako je např. výroba kovů, elektrické energie atd., je rtuť uvolňována proto, že je obsažena v používaných surovinách (palivech), které jsou pro danou výrobu nezbytné. Takto vzniklé emise rtuti jsou vlastně nechtěným vedlejším produktem výroby.

Existují však odvětví, kde se rtuť používá záměrně a to např. pro oddělování zlata od hornin a usazenin, výrobu zubních amalgámů aj.

Mezi další zdroje emisí rtuti patří odpady, obsahující rtuť, které jsou buď skládkovány, nebo spalovány. Dále pak například amalgámy používající se pro výrobu zubních výplní, kdy může být rtuť uvolňována během jejich přípravy či likvidace nebo při kremaci zesnulých.

To jak se jednotlivé antropogenní zdroje podílejí na emisích rtuti je znázorněno na obrázku 2.2.



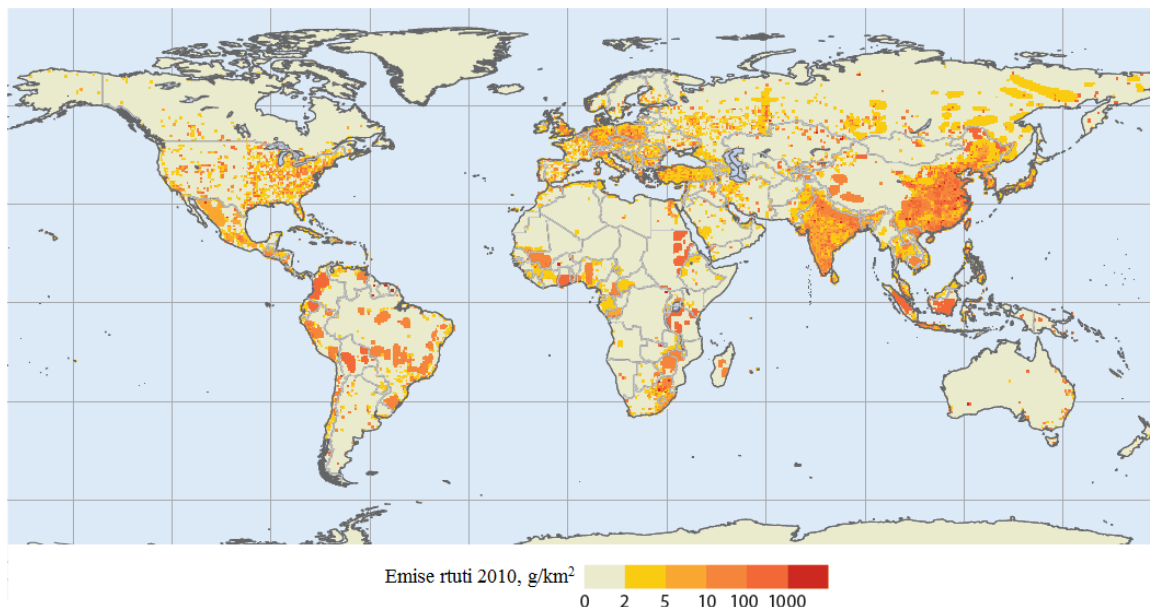
Obrázek 2.2 podíl jednotlivých antropogenních zdrojů na emisích rtuti [4]

Celkové světové emise rtuti pocházející z antropogenních zdrojů, z roku 2010, jsou odhadovány na 1960 tun za rok. Přičemž Asie je zodpovědná přibližně za 50% z tohoto množství. Převážná část emisí z této oblasti pochází z Východní a Jihovýchodní Asie.

Významné hodnoty emisí rtuti byly rovněž zaznamenány v Jižní Americe a Subsaharské Africe, a to zejména kvůli odvětvím, která se týkají těžby nerostů, produkce zlata a řemeslné výroby.

Není to však jen Asie, kde jsou emise rtuti značně vysoké. Jedná se také o Evropu, Severní Ameriku a Oceánii.

Na obrázku 2.3 jsou vidět antropogenní emise rtuti ve světě, které byly zaznamenány v roce 2010.



Obrázek 2.3 distribuce antropogenních emisí rtuti do ovzduší z roku 2010 [4]

Re-emise rtuti

Re-emise rtuti představují poslední ze zdrojů emisí rtuti. V současné době tvoří okolo 60% z celkového množství rtuti vyskytující se v ovzduší. Jde o rtuť, která již byla z dříve vzniklých emisí znovu uložena v půdě, vodě či vegetaci. Takto již jednou uložená rtuť může být znovu uvolněna zpátky do ovzduší.

Re-emise jsou výsledkem přírodních procesů. To znamená, že rtuť uložená v rostlinách může být znovu uvolněna například během lesních požárů nebo spalováním biomasy.

Je nemožné stanovit, zda jsou re-emise rtuti přírodního nebo antropogenního původu.

3.1 Formy rtuti v atmosféře.

Rtuť se v atmosféře vyskytuje ve třech základních formách.

- Plynná elementární (atomární) rtuť Hg^0
- Plynná oxidovaná rtuť Hg^+ nebo Hg^{2+}
- Rtuť vázaná na jemnozrnné částice Hg^p

Rtuť v elementární formě Hg^0 je těžko odstranitelná a setrvává v atmosféře natolik dlouho (průměrně 0,5- 2 roky), že může být transportována po celém světě. Elementární forma rtuti se tak stává nebezpečnou, pro životní prostředí i pro lidské zdraví, v celosvětovém měřítku.

Naproti tomu oxidovaná Hg^{2+} je snadněji odstranitelná a to proto, že je rozpustná ve vodě. Oxidovaná Hg^{2+} je tedy z atmosféry odstraňována pomocí dešťových srážek a ze spalin ji lze odstranit v odsiřovacích jednotkách. Díky tomu, že je rozpustná ve vodě zastupuje v atmosféře pouze 3-5% z celkových emisí rtuti. [3]

4. Legislativa

V roce 2001 Rada guvernérů Programu OSN pro životní prostředí (UNEP) vyzvala výkonného ředitele UNEP, aby provedl vyhodnocení rtuti a to včetně informací o zdravotních rizicích, zdrojích, transportu aj. Roku 2003 Rada guvernérů na základě tohoto vyhodnocení zjistila, že existují dostatečné důkazy o nepříznivých dopadech rtuti a jejich sloučenin na životní prostředí i lidské zdraví a je proto potřeba mezinárodních opatření k řešení tohoto problému. [9]

Hlavním důvodem pro přijetí globálních opatření byla skutečnost, že je rtuť schopna transportu po celém světě. Kvůli řešení těchto problémů byl vypracován program pro rtuť, který byl podpořen rozhodnutím Rady guvernérů v roce 2005 a 2007. V roce 2007 Rada guvernérů došla k závěru, že by měly být přezkoumány stávající dobrovolná opatření a právní nástroje k dosažení pokroku při řešení problematiky rtuti. [9]

V roce 2009, po rozsáhlém posouzení problematiky, se Rada guvernérů shodla, že dobrovolná opatření ke snížení emisí rtuti byla k tomuto datu nedostatečná. Rada tedy rozhodla o nutnosti dalších kroků, včetně přípravy celosvětového právně závazného nástroje týkající se rtuti. Pro tuto přípravu byl zřízen mezivládní vyjednávací výbor, který zahájil svou činnost v roce 2010 a po kterém bylo požadováno, aby uzavřel jednání ještě před 27. zasedáním Rady guvernérů konajícím se roku 2013. [9]

V lednu 2013 mezivládní vyjednávací výbor dospěl k závěru svého zasedání a dohodl se na znění Minamatské úmluvy. Text byl přijat na konferenci zplnomocněných zástupců 10. října 2013 v Japonsku. Cílem úmluvy je ochránit lidské zdraví a životní prostředí od antropogenních emisí rtuti a stanovuje řadu opatření pro splnění těchto cílů. [9]

Vlády všech zemí byly vyzvány k podpisu této úmluvy. Předpokládá se, že koordinované plnění požadavků úmluvy povede v průběhu času k celkovému snížení množství rtuti. [9]

K dnešnímu dni tuto úmluvu podepsalo 128 zemí včetně České republiky, která úmluvu podepsala 10. října 2013. Z těchto 128 zemí smlouvu ratifikovalo 11 zemí. [10]

Kanada a USA

Doposud patří mezi země s nejpřísnější legislativou týkající se emisí rtuti Kanada a USA. Kanada má pro každou provincii své specifické a velice přísné emisní limity. Cíle provincií z hlediska rtuti jsou rozděleny do několika let, kdy od roku 2014 až do roku 2019 má být dosaženo snížení emisí rtuti na 65 kg/rok a do roku 2020 se má tento limit snížit na 35kg/rok. Jakékoliv nově uvedené zařízení v Kanadě spalující uhlí rovněž musí splňovat emisní limity založené na BAT (Best Available Technology) - nejlepší dostupné technologii.

V USA byla roku 2011 Úřadem na ochranu životního prostředí (EPA) schválena norma MATS – mercury and air toxic standard. MATS je náročný právní předpis, který platí pro všechny zdroje o výkonu 25 MW_{el} a větším. MATS stanovuje následující emisní limity pro stávající a nové jednotky spalující uhlí. Pro stávající jednotky spalující uhlí je limit 1,8 g/GWh a pro nová zařízení platí limit 0,08 g/GWh. [2] [11]

Evropská unie

Členské státy Evropské unie (dále jen EU) si mohou stanovit vlastní právní předpisy (i přísnější) pokud je to v souladu s předpisy EU. I když EU přesně nestanovuje limity pro emise rtuti, požaduje od každého svého členského státu, aby si sám stanovil emisní limity pro všechny podstatné znečišťující látky.

Česká republika

Česká republika má v současnosti v platnosti vyhlášky Ministerstva životního prostředí č.117/1997 a č. 97/2000, která zařazují rtuť a její sloučeniny společně s thaliem a jeho sloučeninami do znečišťujících látek 2. skupiny. Stanovují, že při hmotnostním toku emisí vyšším než 1 g/h nesmí být překročena hmotnostní koncentrace 0,2 mg/m³ těchto látek v nosném plynu.

Evropská unie však chystá legislativu, která bude mít z hlediska emisí rtuti vliv i na Českou republiku. Tato připravovaná legislativa je uvedena v tabulce č. 4.1, která udává jak emisní limity pro stávající a nové zdroje spalující uhlí, tak i četnost měření. [12]

Spalovací zařízení o jmenovitém tepelném příkonu (MW _t)	emise Hg (µg/Nm ³)		hodnocené období	monitoring
	nový zdroj	stávající zdroj		
uhlí: antracit a černé bituminové				
< 300	0,5 - 5	1 - 10	průměr vzorků získaných během jednoho roku	4 krát ročně
> 300	0,2 - 2	0,2 - 6	roční průměr	Kontinuální měření
uhlí: sub-bituminové a hnědé				
< 300	1 - 10	2 - 20	průměr vzorků získaných během jednoho roku	4 krát ročně
> 300	0,5 - 5	0,5 - 10	roční průměr	Kontinuální měření

Tabulka 4.1 nově připravovaná legislativa pro emisní limity rtuti

5. Metody měření rtuti v únicích do ovzduší

Rtuť se v odpadních plynech vyskytuje v různých podobách a skupenstvích, což komplikuje její stanovení. Je tedy potřeba izokinetického odběru vzorku, odběru všech fází analytu ve vzorku a poměrně složitá úprava vzorku před analýzou. [14]

5.1 Manuální metody stanovení

Pro stanovení celkové hmotnostní koncentrace rtuti v odpadních plynech byla vypracována manuální referenční metoda (ČSN EN 13211). Tato norma platí pro odpadní plyny ze spaloven odpadů. Lze ji však využít i pro další odpadní plyny z jiných zdrojů.

Podstata metody, dle ČSN EN 13211, spočívá v řízeném odebrání vzorku z proudu odpadního plynu. V určitém časovém intervalu je odebrán vzorek o známém objemu. Pevné částice se přitom zachycují na filtru a plynný vzorek prochází přes absorbéry, které zachytí rtuť a její plynné sloučeniny. Takto odebrané vzorky se analyzují dle normy EN 1483.[15]

Další možná metoda pro stanovení koncentrace rtuti ve spalinách je Ontario-Hydro metody. Principem této metody je odběr vzorku z proudu spalin vyhřívanou sondou. Spaliny pokračují přes sondu do série absorbérů umístěných v ledové lázni. Rtuť vázaná na

částice Hg^{p} je zachycována v přední části vzorkovací trati. Oxidovaná forma rtuti Hg^{2+} je zachytávána ve vodném roztoku chloridu draselného. Atomární rtuť Hg^0 je chytána v následujících absorbérech (jeden obsahuje vodný roztok peroxidu vodíku a další obsahují roztok manganistanu draselného). Vzorky jsou pak odebrány a analyzovány. Postup měření popisuje norma ASTM D6784 -02 (2008) Standard Test Method for Elemental, oxidized, Particle-Bound and total Mercury in Flue gas generated from Coal-Fired Stationary Sources (Ontario Hydro Method).[5]

Zásadní rozdíl mezi ČSN EN 13211 a Ontario-Hydro metodou je, že dle ČSN EN 13211 jsme schopni stanovit pouze celkovou koncentraci rtuti ve spalinách v rozsahu od 0,001 do 0,5 $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$, zatímco Ontario-Hydro metodou, stanovíme všechny formy rtuti (Hg^0 , Hg^{2+} , Hg^{p} a Hg_{c}) v rozsahu od 0,5 do 100 $\mu\text{g}\cdot\text{Nm}^{-3}$.

5. 2. On-line metody stanovení

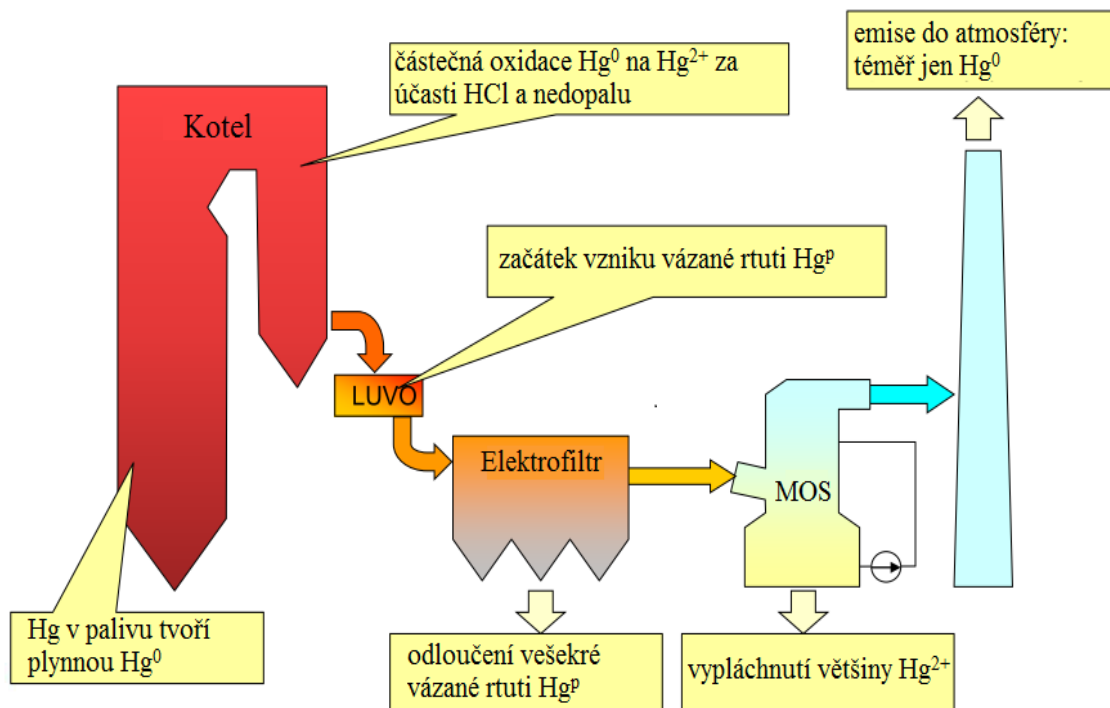
Pro stanovení elementární rtuti v odpadních plynech existuje poměrně jednoduchá metoda, která je založena na zakoncentrování rtuti ve formě amalgamu ve vhodném absorbéru. Uvolněná elementární rtuť se nosným plynem přivádí do plynové kyvety atomového absorpčního spektrometru.

Dalším typem analyzátoru, umožňující on-line měření, je atomový fluorescenční spektrofotometr, který rovněž pracuje na principu zakoncentrování rtuti. [14] Do této skupiny patří systém Gasmeter CMM, který je navržen pro kontinuální monitoring celkových emisí rtuti Hg_{c} ; je založen na metodě atomové fluorescenční spektrometrie studených par. Systém má integrovaný vysokoteplotní konvertor, který dokáže transformovat různé formy rtuti na rtuť atomární. [5]

6. Vznik emisí rtuti při spalování uhlí

Rtuť se vyskytuje již v samotných uhelných slojích. Během spalování uhlí se rtuť snadno odpařuje a přechází ve formě par do spalin. Spaliny pak putují přes teplosměnné plochy kotle. Na těchto plochách se spaliny ochlazují a část rtuti, která je v nich obsažená, začíná oxidovat přítomnými halogenovými složkami na HgCl_2 a HgBr_2 . V průběhu dalšího ochlazování, počínaje ohřívákem vzduchu (LUVO) je atomární rtuť zachycována na povrchu pevných částic (popílek, nedopal). Rtuť dále pokračuje přes jednotku mokrého odsíření spalin, kde se zachytí oxidovaná forma rtuti Hg^{2+} (resp. $\text{HgCl}_2\dots$). Do ovzduší

putuje elementární forma rtuti Hg^0 . Mechanismus vzniku emisí rtuti během spalování uhlí je znázorněno na obrázku 6. 1. [3]



Obrázek 6.1 mechanismy vzniku emisí rtuti v procesu spalování uhlí [3]

Černé a hnědé uhlí má rozdílný obsah rtuti, dle některých analýz obsahuje hnědé uhlí až dvojnásobek Hg oproti uhlí černému. [5]

Černé uhlí má však nižší obsah chloru oproti uhlí hnědému. Chlor je důležitý pro oxidaci elementární rtuti, což se projeví na výsledném poměru Hg^0 a Hg^{2+} . Spaliny ze spalování černého uhlí pak obsahují větší množství Hg^0 na rozdíl od spalin z hnědého uhlí, ve kterých převažuje snadněji odstranitelná oxidovaná forma rtuti Hg^{2+} . [2][3]

7. Metody pro odstranění rtuti ze spalin energetických zařízení

Jedním z možných opatření, vedoucích ke snížení emisí rtuti ve spalinách, je omezit spalování stávajícího paliva, popřípadě jej nahradit za palivo s menším obsahem rtuti. Tato možnost je však ve většině případů nereálná.

Dalším způsobem redukce emisí rtuti je spolu-využití, tzv. co-benefit, jednotek pro denitrifikaci s využitím katalyzátoru (deNO_x) a mokré metody odsíření (deSO_x) spalin. Tato oblast je z hlediska snížení emisí rtuti stěžejní, a proto je dále podrobněji popsána.

Existují také specifické technologie používané pro redukci emisí rtuti, které se využívají v případě, že spolu-využití jednotek deNO_x a deSO_x není schopno zajistit požadované emisní limity. Jedná se o technologie: úpravy uhlí před spalovacím procesem (mechanicky, chemicky, termicky), přidávání sorbentů a aditiv (bromové soli, aktivní uhlí) aj. Tyto metody jsou však spojeny s investičními náklady a zvýšenými provozními náklady. [2]

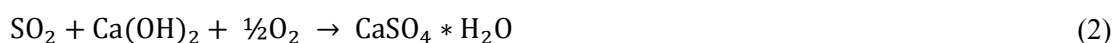
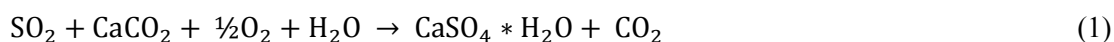
7.1 Co-benefit odsířování a denitrifikace

7.1.1 Odsířování

Jednotky odsíření spalin, pracující na principu polosuché či mokré metody dokáží téměř odstranit všechny vzniklé emise oxidované rtuti Hg²⁺. Rtuť je v této formě rozpustná ve vodě, a proto při skrápění spalin v odsiřovacím reaktoru přechází do suspenze.

Polosuchá metoda odsířování je založena na vstřikování vodní suspenze vápna (vápenného mléka) do reaktoru. V reaktoru pak dochází k odpaření vody ze suspenze a ochlazení spalin na optimální teplotu reakce.

Principem mokré metody odsířování je zachycení kyselé složky spalin (tj. hlavně SO₂ a fluorovodík), což se provádí recirkulací vodní suspenze rozemletého vápence. Produktem této reakce jsou siřičitany a hydrosiřičitany vápenaté, jejich následnou oxidací pak vzniká sádrovec. Souhrnné reakce můžeme psát ve tvaru (1)(2):



Odsiřovací jednotky jsou schopny, z hlediska redukce emisí rtuti, odstranit pouze oxidovanou formu rtuti Hg²⁺ (resp. HgCl₂). Jednotky vykazují velice omezené možnosti redukce elementární rtuti Hg⁰; elementární rtuť tímto procesem tedy prochází. [2]

7.1.2 Redukce NO_x

Pro redukci emisí oxidů dusíku, existují dvě skupiny opatření:

- Primární
- Sekundární

Primární opatření

Primární opatření spočívají v omezení samotného vzniku NO_x při spalování a to úpravou spalovacího procesu. Jedním z takových opatření může být například použití nízkoemisních hořáků. Jsou to hořáky, které kombinují dva či více jednoduchých principů primárních opatření (př. postupný přívod spalovacího vzduchu, recirkulaci spalin). Nízkoemisní hořáky vytváří zóny se sníženým obsahem kyslíku v blízkosti hořáku, čímž se omezí nejvyšší teploty plamene. [6][2]

Nízkoemisní hořáky dokáží redukovat vznik NO_x, co se však týče redukce emisí rtuti, nemají na tento proces žádný vliv. [2]

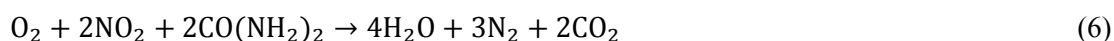
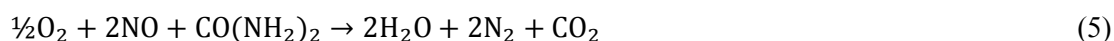
Vliv na redukci emisí rtuti by mohlo mít zvětšení množství nedopalu, které může vést k mírnému zvětšení absorpce rtuti a jejímu odloučení v elektroodlučovači jako Hg^p. [2]

Sekundární opatření

Sekundární metody snižují obsah již vzniklých NO_x ve spalinách a to buď chemickými, nebo fyzikálně-chemickými procesy. V současnosti jsou využívány procesy selektivní katalytické a selektivní nekatalytické redukce. [6]

Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

SNCR je založena na vstřikování reakčních činidel (př. čpavek, močovina...) do spalin. Reakce NO_x s činidlem je závislá, jak na teplotě, tak i na jejich vzájemném poměru. Teplota, při níž probíhá reakce s optimálním výtěžkem tzv. teplotní okno, je pro čpavek 880-920 °C a pro močovinu 900-1050 °C.. Reakce můžeme psát ve tvaru (3-6) [5]



Pokud dojde k nedodržení podmínek, dochází k tzv. čpavkovému skluzu, kdy nezreagovaný čpavek odchází společně se spaliny. V případě teplot vyšších pak dochází k sekundární tvorbě NO_x [5]

Není známý žádný vliv SNCR na redukci emisí Hg.[2]

Selektivní katalytická redukce (SCR)

SCR využívá redukce oxidů dusíku čpavkem v katalyzátoru pro dosažení vyšších stupňů konverze a to za nižších teplot než u SNCR. Teplotní okno SCR se pohybuje v rozmezí 300-450 °C.

Velkou výhodou SCR je schopnost oxidovat elementární rtuť Hg^0 . To má za následek, že v kombinaci s odsířením je SCR nejefektivnější metodou odstranění rtuti ze spalin. Oxidace Hg^0 je možná přibližně do 85% a celková dosažená redukce emisí rtuti se pohybuje okolo 90%. [2]

Katalyzátor je obecně látka, která vstupuje do chemické reakce, urychluje ji (popřípadě zpomaluje), přičemž vystupuje zcela nezměněna. Katalyzátory jsou schopny reakci nejen urychlit, ale i vyvolat reakce, které by jinak vůbec neproběhly. Pokud použití katalyzátoru vede ke vzniku určitých produktů, bavíme se pak o selektivní katalýze. [7][8]

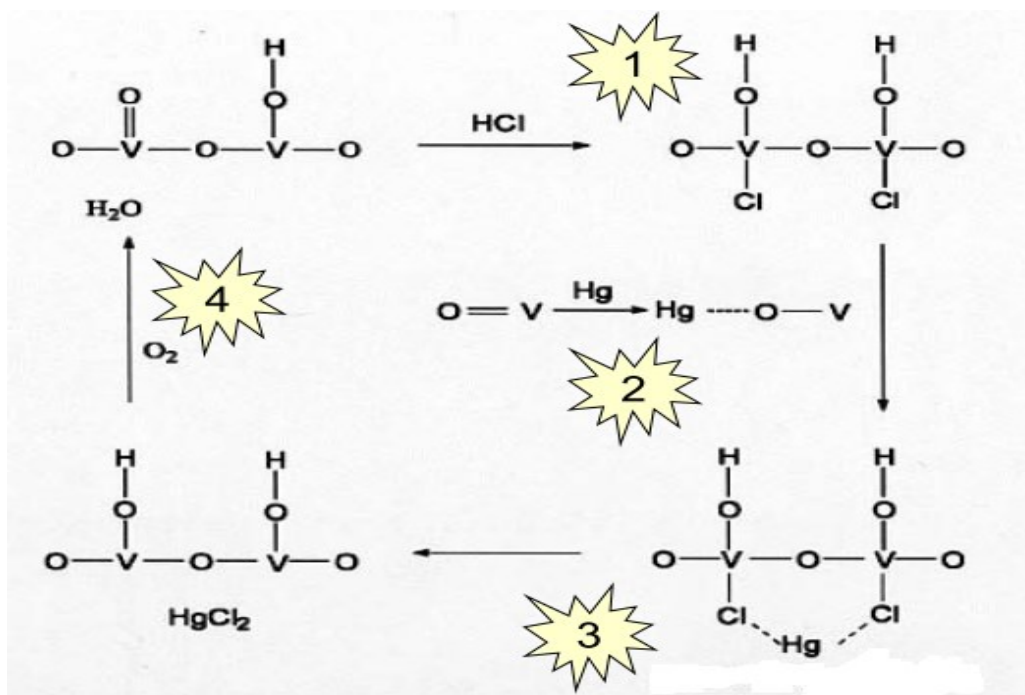
8. Selektivní katalytická redukce SCR

8.1 Průběh oxidace rtuti na povrchu katalyzátoru

Oxidaci rtuti na katalyzátorech lze rozdělit na čtyři po sobě jdoucí části: [7]

1. Adsorpce
2. Povrchová difúze
3. Povrchová reakce
4. Desorpce

V první řadě se na katalyzátor adsorbuje plynný chlorovodík HCl, který je obsažen ve spalinách. Následně pak probíhá difúze elementární rtuti Hg^0 k adsorbované HCl. Dále dochází k reakci HCl s Hg^0 za vzniku oxidované formy rtuti Hg^{2+} respektive chloridu rtuťnatého HgCl_2 . V poslední řadě pak probíhá desorpce HgCl_2 a regenerace samotného katalyzátoru. Celý průběh oxidace rtuti na katalyzátoru je znázorněn na obrázku 8.1.



Obrázek 8. 1. průběh oxidace rtuti na povrchu katalyzátoru SCR [2]

Laboratorní výzkumy prokázaly, že katalyzátor na svém povrchu rychleji váže částice čpavku, proto dochází v první řadě k redukci emisí NO_x . Až po snížení obsahu čpavku ve spalinách narůstá aktivita katalyzátoru vzhledem ke rtuti. Je také důležité, aby bylo ve spalinách obsažené určité množství chloru resp. plynného chlorovodíku HCl , jinak by oxidace rtuti neproběhla. [2]

Je důležité poznamenat, že v jednotce SCR nedochází k odstranění rtuti, ale pouze k oxidaci elementární formy rtuti Hg^0 na oxidovanou formu Hg^{2+} (resp. na HgCl_2), kterou lze již dále odstranit v odsiřovací jednotce.

Účinnost SCR závisí na vlastnostech katalyzátoru, především pak na jeho aktivní ploše, na době setrvání spalin na katalyzátoru, teplotě a na stechiometrii. Doba setrvání spalin je stěžejním parametrem jak pro denitrifikaci spalin, tak i pro redukci rtuti. Vyjadřuje totiž dobu zdržení spalin na katalyzátoru.[6]

8.2 Druhy katalyzátorů

Zpracováno na podle literatury [6]

Katalyzátory jsou vyráběny jako:

- blokové s vylisovanými otvory
- deskové
- peletizované

Blokové katalyzátory

Blokové katalyzátory, viz obrázek 8.2, jsou složeny z keramické nosné podložky, na kterou je nanesen katalyzátor. Katalyzátor je tvořen nosičem a aktivní složkou. Nosičem bývá nejčastěji oxid titaničitý TiO_2 , resp. oxid hlinitý Al_2O_3 . Aktivní složkou nejčastěji bývá oxid vanadičný V_2O_5 , dopovaný oxidem wolframovým WO_3 nebo oxidem molybdenovým MoO_3 .

Blokový katalyzátor má velký měrný povrch, přičemž velikost je možno měnit, aniž by došlo ke změně vnějších rozměrů.



Obrázek 8.2 blokový katalyzátor honeycomb [13]

Deskové katalyzátory

Deskový katalyzátor, viz obr. 8.3, je tvořen kovovou mříží, na které je nanesen katalyzátor. Hlavním parametrem deskového katalyzátoru je vzdálenost mezi dvěma deskami, která se mění v závislosti na obsahu popílku ve spalinách.

Oproti blokovému katalyzátoru je více odolný proti zanášení popílkem, avšak je více náchylný z hlediska abraze.

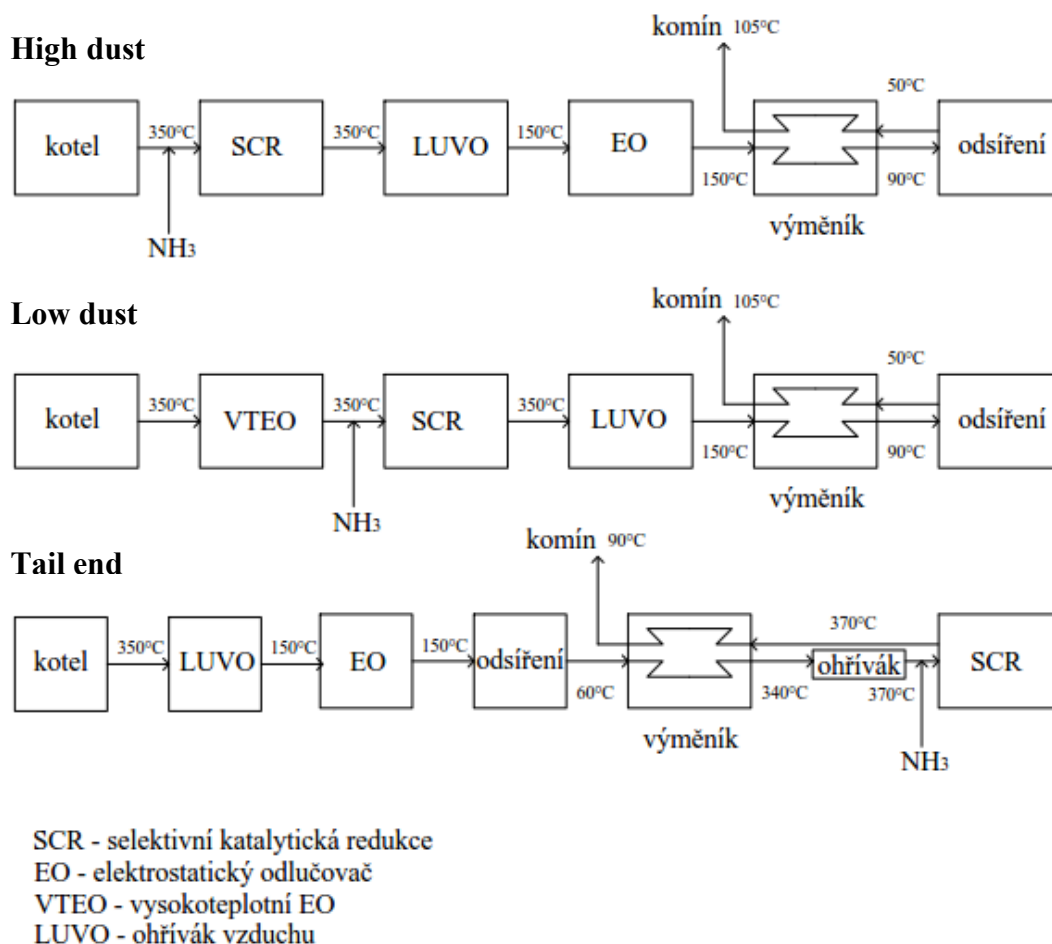


Obrázek 8.3 deskový katalyzátor [13]

Katalyzátory musí splňovat řadu požadavků. Musí být nejen mechanicky a tepelně odolné, ale také být i chemicky odolné vůči některým látkám (př. SO_2 , těžkým kovům atd.). Dále musí odolávat náhlým změnám teplot, mít nízkou tlakovou ztrátu, dlouhou životnost atd.

8.3 Technologické varianty SCR

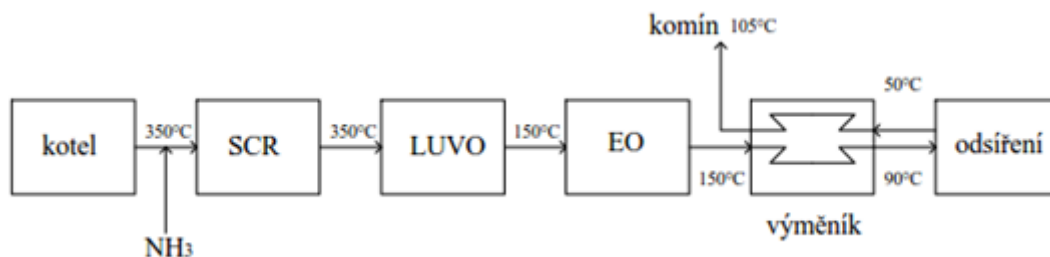
Na obrázku 8.4 vidíme tři možné varianty zapojení SCR do koncepce kotle tzv. high dust, low dust a tail end. Odlišují se od sebe tím, zdali do katalyzátoru vstupují odprášené či neodprášené spaliny. SCR tedy může být přímo součástí kotle nebo jako součást odsiřování spalin za kotlem.



Obrázek 8.4 varianty zapojení SCR [5]

High dust

Při řazení High dust viz obr. 8.5 vystupují z kotle neodprášené spaliny přímo do SCR. Samotná jednotka je umístěna mezi ekonomizérem (EKO) a ohřívákem vzduchu (LUVU), kde se vyskytuje optimální teplotní okno pro SCR. Dále spaliny pokračují již obvyklým způsobem přes elektrostatický odlučovač do odsiřovací jednotky. Před odsiřovací jednotkou je zařazen výměník tepla, který spaliny ochlazuje na teplotu potřebnou pro odsiřování. Odsiřené spaliny po ohřátí ve výměníku tepla odchází do komína. [6]

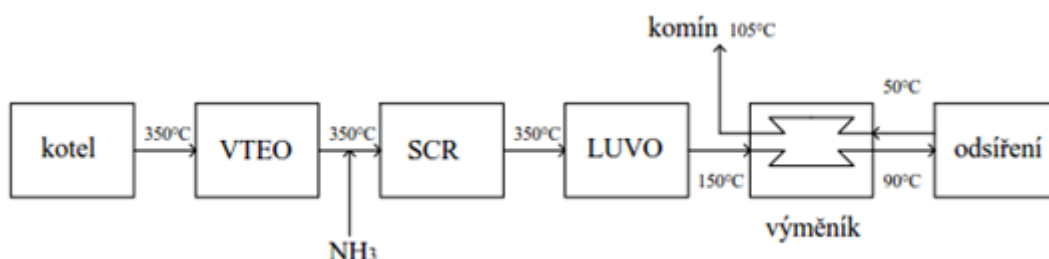


Obrázek 8.5 řazení High dust

Výhodou tohoto uspořádání je, že nepotřebují dodatečný přívod tepla, aby byl zajištěn optimální proces katalýzy a také, že je samotný katalyzátor „čištěn“ popílkem. Na druhou stranu může docházet k ucpání a otravě katalyzátoru. [5]

Low dust

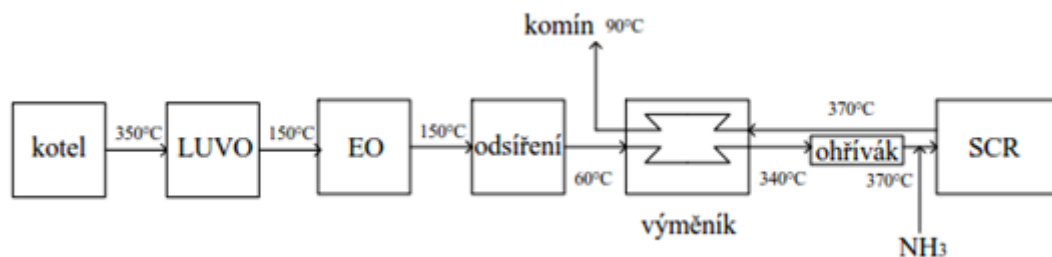
U varianty Low dust, obr. 8.6, jdou spaliny z kotle nejprve do vysokoteplotního odlučovače a dále vstupují do SCR. Za SCR se nachází ohřívák vzduchu a následuje stejně jako v předchozím případě odsířovací jednotka.



Obrázek 8.6 řazení Low dust

Tail end

V posledním případě, varianta Tail end obr. 8.7, projdou spaliny běžným uspořádáním přes kotel, elektrostatický odlučovač, odsířovací jednotku. Reaktor s katalyzátorem je v tomto případě umístěn až na samém konci. Před SCR je umístěn ohřívák (př. na ZP), který zajišťuje optimální teplotu spalin pro správnou funkci SCR. [6]



Obrázek 8.7 řazení Tail end

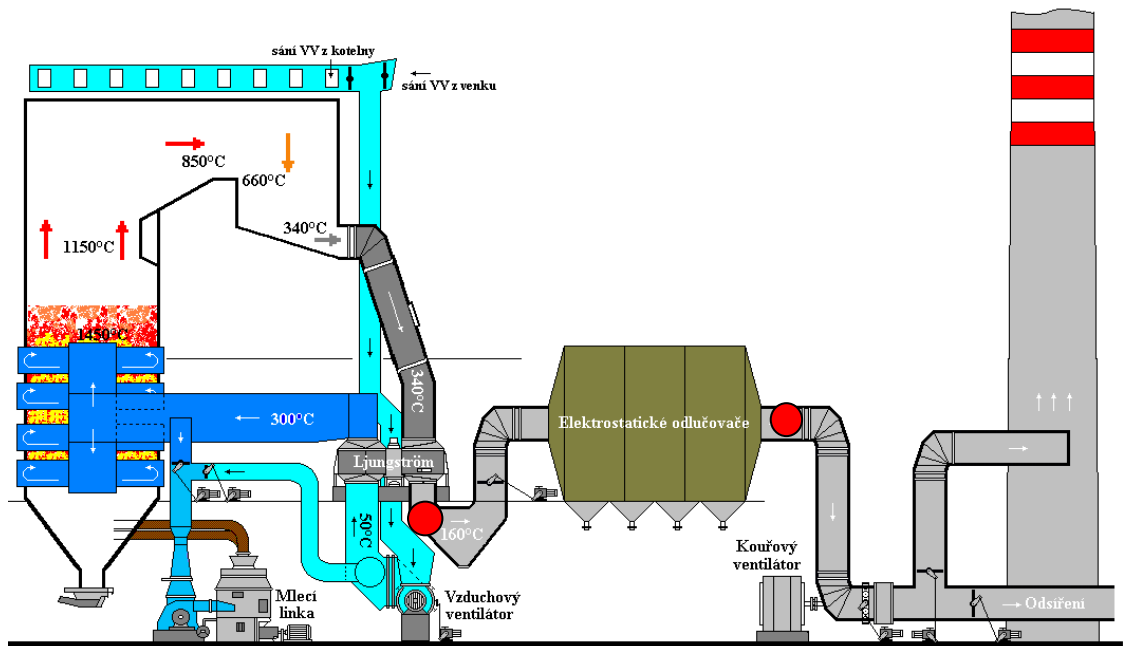
Při tomto řazení se jednotka SCR nachází mimo kotelní jednotku. Dochází tak k minimálnímu zanášení a znečišťování katalyzátoru, což přispívá k vysoké životnosti katalyzátoru. Nevýhoda však spočívá v potřebě dodatečného přívodu tepla za odsířováním, které zvyšuje provozní náklady jednotky. [5]

Pro redukci emisí rtuti lze použít uspořádání high dust a low dust. Varianta tail end by neměla z tohoto hlediska žádný efekt. V tomto uspořádání se na katalyzátor nedostává žádný plynný chlorovodík, tzn., že se atomární rtuť Hg^0 nebude vůbec oxidovat.

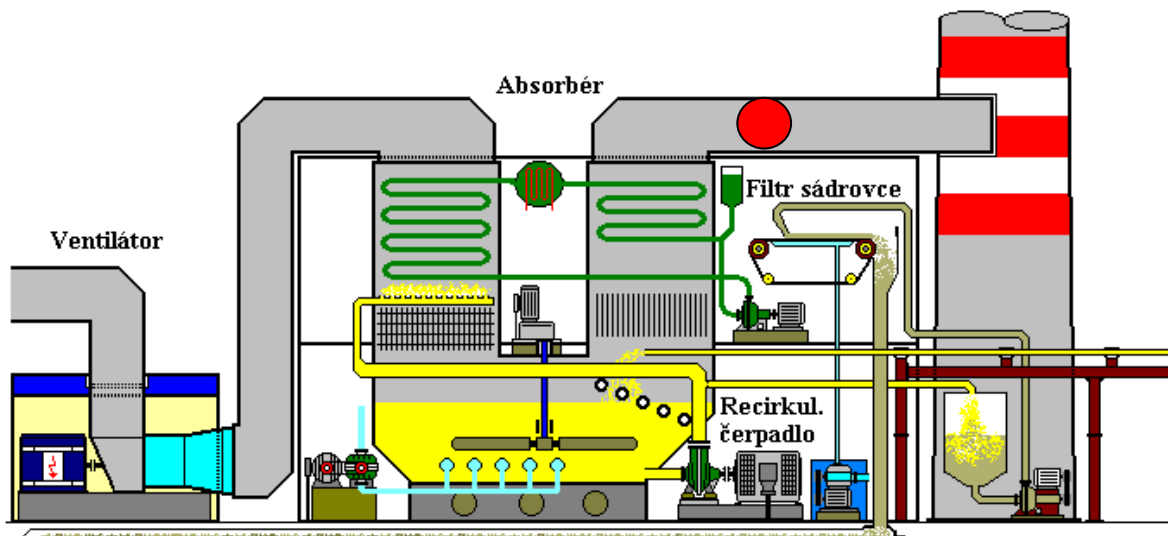
9. Měření rtuti na výrobním bloku v Elektrárně Dětmarovice

Za účelem zjistit reálné koncentrace rtuti při spalování proběhlo měření rtuti v ČEZ, a. s. Elektrárně Dětmarovice (EDĚ). Koncentrace rtuti byly měřeny na kotli č. 2 (bez katalyzátoru). Měřící místa se nacházela před a za elektrofiltrem a dále za odsířovací jednotkou viz obr. 9.1 - 2. Na každém měřícím místě byly provedeny 3 měření. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 9.1.

Pro zjištění celkové koncentrace rtuti ve spalinách Hg_c byl použit analyzátor pro kontinuální měření Gasmel CVAF. Jednotlivé formy rtuti (elementární, oxidovaná a vázaná na popílek) byly vyhodnoceny na základě Ontario-Hydro metody.



Obrázek 9.1 měřicí místa před a za elektrostatickým odlučovačem EDĚ před instalací metody SCR [5]



Obrázek 9.2 měřicí místo za odsířovací jednotkou č. 2 EDĚ [5]

První den bylo měření prováděno před elektrostatickým odlučovačem EO, přičemž množství obsažené rtuti v surovém palivu bylo $0,0815 \text{ mg.kg}^{-1}$. Druhý den se měřilo za EO – obsah rtuti v surovém palivu $0,088 \text{ mg.kg}^{-1}$. Další den se měřilo za odsířovací jednotkou deSO_x – obsah rtuti v surovém palivu $0,183 \text{ mg.kg}^{-1}$. Koncentrace rtuti byly měřeny v suchých spalínách a přepočteny na normální podmínky (0°C , $101\,325 \text{ Pa}$) tabulka 9.1.

Následně přepočteny na referenční obsah kyslíku $O_2=6\%$; tabulka 9.2. Tabulky uvádí naměřené koncentrace jednotlivých forem rtuť v jednotlivých měřících místech.

$O_2 = 5,8 \%$				
$\mu\text{g.Nm}^{-3}$	Hg ^p	Hg ²⁺	Hg ⁰	Hg _c
před EO	6,836	6,75	0,73	14,31
před EO	9,264	5,96	2,5	17,72
před EO	4,609	6,3	0,56	11,47
před EO	6,90	6,34	1,26	14,50
$O_2 = 7,9 \%$				
za EO	0,005	7,55	0,67	8,23
za EO	0,002	5,36	0,63	5,99
za EO	0,002	5,94	0,62	6,56
za EO	0,003	6,283	0,640	6,927
$O_2=8,66 \%$				
za deSO _x	0,012	4,58	1,2	5,79
za deSO _x	0,08	3,97	1,05	5,03
za deSO _x	0,011	2,75	1,07	3,83
za deSO _x	0,034	3,767	1,107	4,883

Tabulka 9.1 výsledky měření koncentrací rtuť v Elektrárně Dětmorovice [5]

$O_2=6\%$				
$\mu\text{g.Nm}^{-3}$	Hg ^p	Hg ²⁺	Hg ⁰	Hg _c
před EO	6,75	6,66	0,72	14,12
před EO	9,2	5,92	2,48	17,61
před EO	4,55	6,21	0,55	11,32
před EO	6,833	6,26	1,25	14,35
$O_2=6\%$				
za EO	0,005	8,65	0,77	9,42
za EO	0,003	6,23	0,74	6,97
za EO	0,002	6,75	0,71	7,46
za EO	0,003	7,210	0,740	7,950
$O_2=6\%$				
za deSO _x	0,014	5,59	1,46	7,07
za deSO _x	0,01	4,83	1,28	6,12
za deSO _x	0,013	3,33	1,29	4,63
za deSO _x	0,012	4,583	1,343	5,940

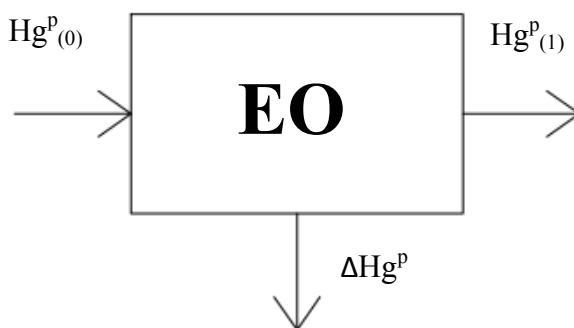
Tabulka 9.2 výsledky měření přepočteny na referenční obsah kyslíku 6 % [5]

Přibližnou účinnost EO, vzhledem k záhytu Hg^p , určíme z bilance, viz obr. 9.3, kdy do jednotky vstupuje určité množství rtuti vázané na popílek $\text{Hg}_{\{0\}}^p$ a vystupuje nezachycené $\text{Hg}_{\{1\}}^p$. Množství zachycené rtuti ΔHg^p je hodnota, která se použije pro výpočet účinnosti (7).

$$\eta_{\text{Hg}^p} = \frac{\Delta\text{Hg}^p}{\text{Hg}_{\{0\}}^p} * 100 = \frac{\text{Hg}_{\{0\}}^p - \text{Hg}_{\{1\}}^p}{\text{Hg}_{\{0\}}^p} * 100 \quad [\%] \quad (7)$$

$$\eta_{\text{Hg}^p} = \frac{6,833 - 0,003}{6,833} * 100 = \underline{99,95} \quad [\%]$$

Elektrostatický odlučovač zachycuje rtuť vázanou na popílek s účinností 99,95 %.



Obrázek 9.3 bilance rtuti elektrostatického odlučovače

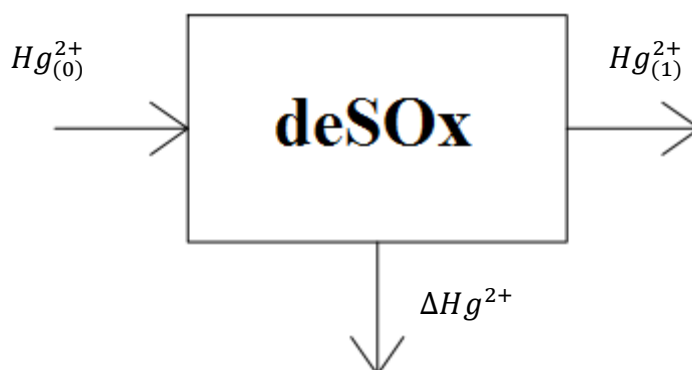
Účinnost odsiřovacího zařízení se určí obdobným způsobem, budeme však uvažovat v bilanci s oxidovanou formou rtuti Hg^{2+} a to proto, že je odsiřovací jednotka schopna tuto formu rtuti odstranit.

Je třeba vzít v úvahu, že když bylo prováděno měření za odsiřovací jednotkou, bylo v surovém palivu o 63,8 % více rtuti než při měření za EO. Abychom byli schopni určit alespoň přibližnou účinnost odsiřovacího zařízení vzhledem k oxidované formě rtuti Hg^{2+} , jsou koncentrace rtuti za odsiřovacím zařízením přepočteny na 63,8 % z naměřené hodnoty. Přepočtené hodnoty koncentrace rtuti za deSO_x jsou uvedeny v tabulce 9.3.

O ₂ =6%				
μg.Nm ⁻³	Hg ^p	Hg ²⁺	Hg ⁰	Hg _c
za deSO _x	0,008	2,923	0,857	3,788

Tabulka 9.3 přepočtené hodnoty koncentrací rtuti

Účinnost záchytu oxidované formy rtuti Hg^{2+} v odsiřovací jednotce vychází z bilance, která je znázorněna na obrázku 9.4 a její přibližná účinnost se určí dle vztahu (8)



Obrázek 9.4 bilance rtuti odsiřovacího zařízení

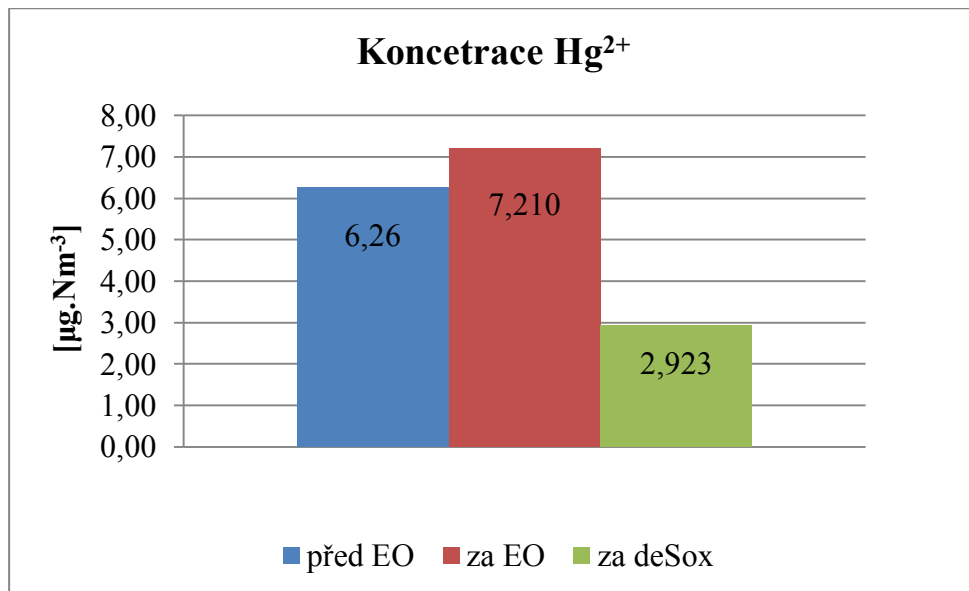
$$\eta_{Hg^{2+}} = \frac{\Delta H_g^{2+}}{Hg_{(0)}^{2+}} * 100 = \frac{Hg_{(0)}^{2+} - Hg_{(1)}^{2+}}{Hg_{(0)}^{2+}} * 100 \quad [\%] \quad (8)$$

$$\eta_{Hg^{2+}} = \frac{7,21 - 2,923}{7,21} * 100 = \underline{59,5} \quad [\%]$$

Účinnost zařízení z hlediska záchytu oxidované formy rtuti Hg^{2+} je přibližně 59,5 %. Přesnější hodnotu bychom dostali, kdyby se během měření používalo palivo se stejným obsahem rtuti.

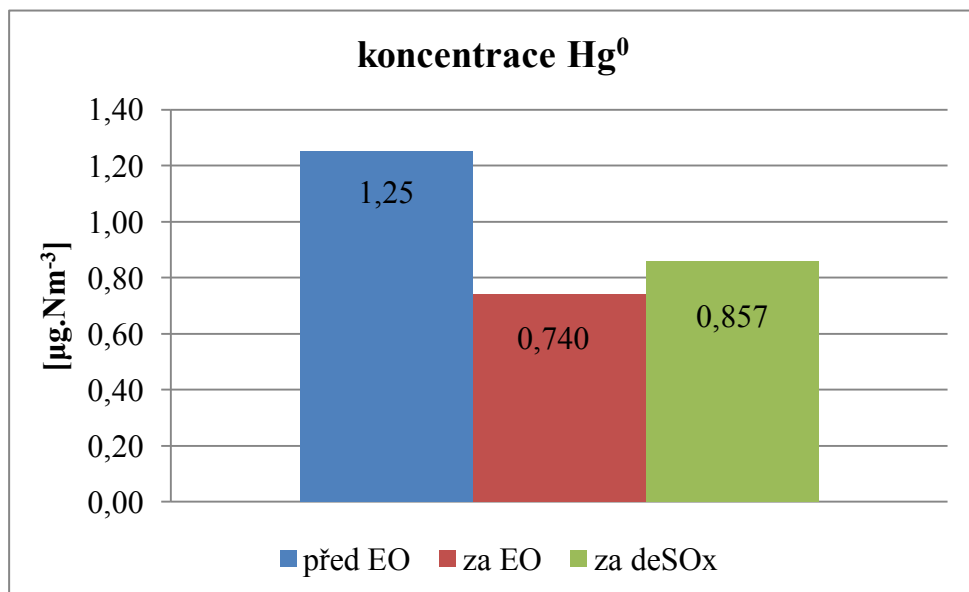
Znázorníme-li průběhy naměřených koncentrací jednotlivých forem rtutí, při průtoku spalinovým traktem vidíme, jak se mění jejich koncentrace.

Obrázek 9.3 znázorňuje naměřené koncentrace oxidované formy rtuti Hg^{2+} . Při průchodu EO se množství Hg^{2+} navýší, což je pro nás pozitivní, protože tuto formu rtuti dokážeme odstranit v odsiřovací jednotce. Tento pokles je rovněž na obr. 9.5 viditelný.



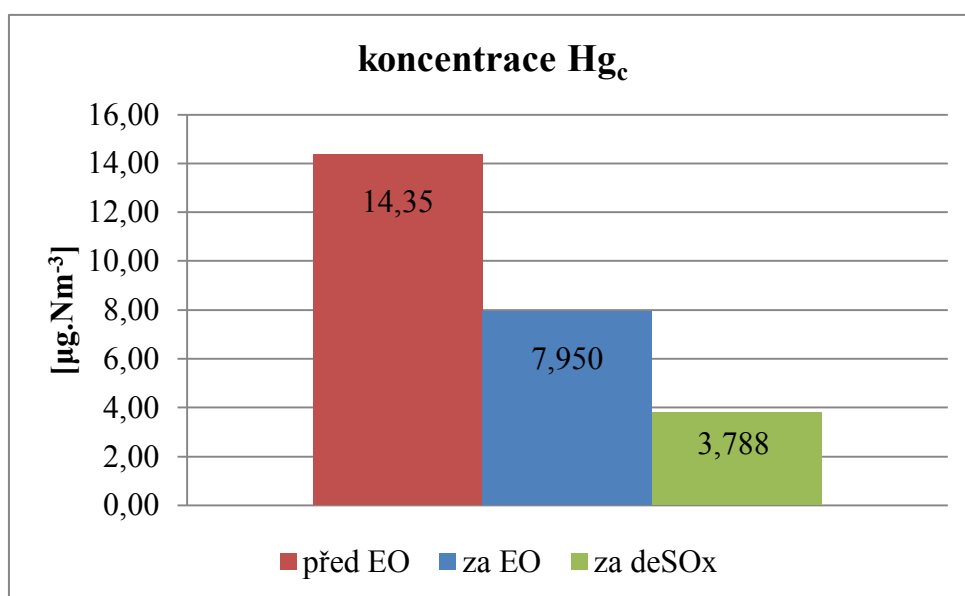
Obrázek 9.5 koncentrace Hg²⁺ ve spalinovém traktu

Na obrázku 9.6 jsou znázorněny koncentrace elementární rtuti Hg⁰. Po průtoku EO koncentrace Hg⁰ klesá. Z měření za odsiřovací jednotkou vychází mírný nárůst koncentrace Hg⁰ ve spalinách, to však může být způsobeno rozdílnou koncentrací rtuti v palivu nebo nepřesností měření.



Obrázek 9.6 koncentrace Hg⁰ ve spalinovém traktu

Obrázek 9.7 znázorňuje celkovou koncentraci rtuti Hg_c ve spalínách. I přes rozdílný obsah rtuti v palivu při prováděném měření je, z výsledků v tab. 9.1, 9.2 a z obrázku 9.5, zřejmé, že celkový obsah rtuti ve spalínách Hg_c při průchodu spalínovým traktem včetně odsíření klesá.



Obrázek 9.7 koncentrace Hg_c ve spalínovém traktu

10. Návrh zařízení

Připravovaná legislativa, stanovující limity pro emise rtuti, se v blízké době dotkne i české energetiky, je tedy v našem zájmu začít zkoumat možnosti redukce rtuti ze spalování tuhých fosilních paliv. Z dřívějších výzkumů vyšlo najevo, že jedním z možných a také dostupných prostředků, pro redukci emisí rtuti, je využití katalyzátoru společně s odsířovací jednotkou.

Z těchto důvodů je předmětem této práce navrhnout výzkumné zařízení využívající katalyzátor. Katalyzátor, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, oxiduje atomární formu rtuti Hg^0 na formu Hg^{2+} , kterou jsme pak schopni odstranit v odsířovacím zařízení.

Předmětem zkoumání je stanovit, kolik rtuti jsme schopni na katalyzátoru zoxidovat a to za různých podmínek jako je například složení paliva (spalin) nebo změna plochy katalyzátoru. Zařízení by se také do budoucna dalo využít ke sledování aktivity katalyzátoru vzhledem ke rtuti, při současném vstřikování čpavku do spalin (redukce NO_x).

Podmínky v pilotním zkušebním zařízení musí být stejné, jako v reálním spalovacím zařízení. Z toho vyplývá, že v praxi musíme tuto jednotku umístit přesně do místa, kde se předpokládá instalace katalyzátoru metody SCR. Musíme splnit podmínky teplotní a měli bychom přibližně splnit i podmínky koncentrace včetně popílku unášeného spalinami.

V praxi to znamená, že zařízení odebere ze stávajícího spalínového traktu, většinou z druhého tahu kotle, určitý podíl spalin a po proběhlé reakci je vzorek spalin vrácen zpět do spalínového traktu.

Dalším požadavkem, který musí zařízení splnit je mobilita. Zařízení musí být jednoduše přepravitelné v podmínkách běžného vybavení kotelního zařízení. Musí být rovněž přístupné z běžných obslužných plošin kotelny a musí umožňovat instalaci různých měřících prvků pro měření tlaku, teploty, rychlosti proudění, odběru vzorků spalin aj.

Do budoucna se počítá s ověřením na velkých jednotkách o jmenovitém výkonu 200 MW_{el} na černé i hnědé uhlí a předpokládá se i odzkoušení na teplotních zdrojích nižšího výkonu.

10.1 Popis zařízení

Zařízení se skládá z několika hlavních částí; jsou to: vrchní část reaktoru, skříň reaktoru, spodní část reaktoru a měřící místa. Vrchní část reaktoru je opatřena vstupní přírubou, ke které bude připojen spalínový kanál. Spaliny pak budou putovat přes usměrňovací lopatky a usměrňovací mříž do skříně reaktoru. Vrchní část reaktoru je navíc opatřena jímkou termočlánku (měření teploty) a opěrnou plochou, která složí k přepravě, aby nedošlo k poškození jednotky.

Na vrchní část reaktoru navazuje skříň reaktoru, ve které jsou umístěny 4 bloky paralelně řazených katalyzátorů. Katalyzátory budou čištěny pomocí stlačeného vzduchu z ofukovače. Zajistí se tak, aby nedocházelo k jeho zanesení a tím k snížení reakční plochy katalyzátoru. Ofukovač je umístěn ve dveřích jednotky. Dveře jednotky slouží k umístění katalyzátorů do skříně reaktoru. Víko dveří je ke skříni reaktoru upevněno šrouby. Aby byla manipulace s víkem jednodušší, je víko zavěšeno na otočném rameni. Otočné rameno tak přenesou celou váhu víka. Na skříni reaktoru se také nachází měřící místo pro umístění rychlostní sondy

Poslední část zařízení je spodní část reaktoru. Spodní část je opatřena výstupní přírubou, ke které bude připevněn spalínový kanál. Ke spodní části jsou přivařeny 4 podpěry, které nesou celou konstrukci zařízení.

Jelikož se jedná o zkušební zařízení, kde budeme sledovat aktivitu katalyzátoru vzhledem ke rtuti, je jednotka konstruována tak, aby zde byla možnost měnit velikost katalyzátoru (délku). Změnou délky katalyzátoru docílíme zvětšení reakční plochy. Na konci střední části reaktoru jsou proto umístěny plechy, které při zvětšení délky katalyzátorů, zabrání jejich kmitání vlivem proudění spalin.

Jednotka je rovněž na několika místech opatřena úchyty, které slouží k manipulaci a umístění jednotky na požadované místo.

Konstrukční výkres jednotky a výrobní výkres skříně reaktoru je v příloze.

10.2 Umístění zařízení

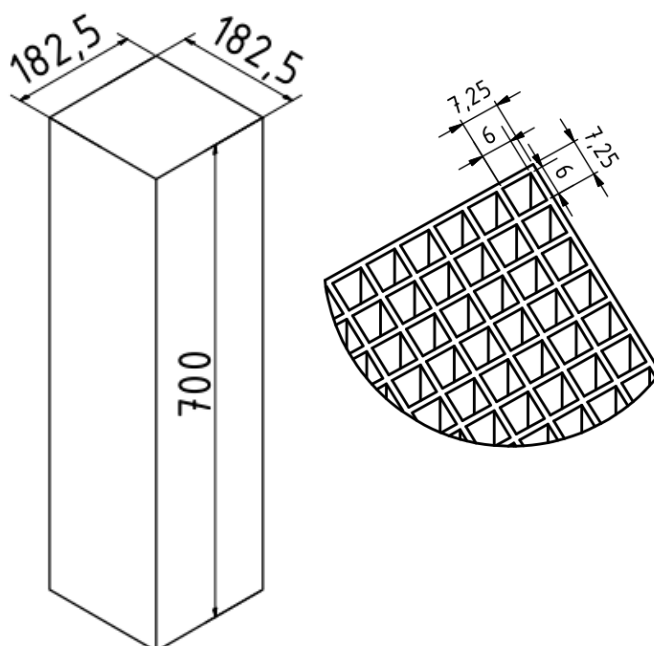
Zkušební zařízení se bude nacházet v Elektrárně Dětmarovice. Napojení jednotky na zdroj spalin bude přes vhodný průlez do druhého tahu kotle, zpravidla o rozměru 450 x 450 mm. Ve stávajícím průlezu do druhého tahu kotle budou dvířka nahrazena přírubou s potrubním nástavcem, na které bude připevněn spalínový kanál. Vše bude tepelně zaizolováno dvojitou tepelnou izolací z minerální plsti s předpokládanou tloušťkou 2 x 80 mm. Povrch bude opatřen Al fólií. Výstupní část spalin ze spodního dílu bude rovněž napojena spalínovým kanálem na ventilátor s návratem spalin do druhého tahu kotle ve stejné úpravě jako nasávací část.

Pro zajištění konstantního proudění spalin přes pilotní jednotku bude použit ventilátor. Průtok spalin pak bude řízen otáčkami ventilátoru s předpokládaným automatickým provozem v závislosti na diferenčním tlaku vhodného škrťícího orgánu.

Výpočet zařízení

V zařízení se budou nacházet 4 bloky paralelně řazených katalyzátorů. Rozměry katalyzátorů a rychlost proudění spalin v otvorech katalyzátorů jsou známé. Rozměry jednoho katalyzátoru jsou znázorněny na obrázku č. 10.1 a efektivní rychlost spalin v otvoru katalyzátoru je dána $4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z těchto hodnot jsme schopni dopočítat objemový

průtok jednotkou a rychlosti v jednotlivých částech jednotky. Tyto hodnoty pak budou potřebné pro určení tlakové ztráty zařízení.



Obrázek 10.1 rozměry katalyzátoru

Abychom mohli vypočítat tlakovou ztrátu zařízení, navrhnout ventilátor pro pokrytí této ztráty a vytvořit bilanci zařízení, budeme navíc potřebovat i další parametry např. vlastnosti spalin (hustota, teplota, složení). Tyto hodnoty budou vycházet ze složení paliva a provozu v Elektrárně Dětmarovice.

11. Výpočet tlakové ztráty

Jedná se o aerodynamický výpočet, popsáný v literatuře [16][17], který slouží k určení odporů (tlakových ztrát) při proudění spalin jednotkou. Na základě tohoto výpočtu navrhne ventilátor.

Tlakové ztráty vznikající při proudění můžeme rozdělit na ztráty třením a na tzv. ztráty místními odpory. Celková tlaková ztráta zařízení je pak vyjádřena, jako součet těchto jednotlivých ztrát (9).

$$\Delta p_c = \sum_{i=1}^m \Delta p_t + \sum_{j=1}^n \Delta p_m \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

, kde Δp_tztráty vzniklé třením [Pa]

Δp_m ztráty místními odpory [Pa]

Ztráty třením

Ztráty třením jsou závislé na délce kanálu l [m], ekvivalentním průměru d_{ekv} [m], rychlosti proudění w [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], na hustotě proudícího média ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] a součiniteli tření λ [-] dle vztahu (10).

$$\Delta p_t = \lambda * \frac{l}{d_{ekv}} * \frac{w^2}{2} * \rho \quad [\text{Pa}] \quad (10)$$

Součinitel tření závisí na absolutní drsnosti kanálu ε [m] a na druhu proudění, které charakterizuje Reynoldsovo číslo Re [-] viz rovnice (11).

$$Re = \frac{w_{stř} * d_{ekv}}{\nu} \quad [-] \quad (11)$$

, kde $w_{stř}$střední rychlost média [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

νkinematická viskozita média [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]

Ekvivalentní průměr potrubí

Ekvivalentní průměr kruhového potrubí je roven vnitřnímu průměru potrubí. Pro nekruhová potrubí se ekvivalentní průměr potrubí určí ze vztahu (12)

$$d_{\text{ekv}} = \frac{4 * S}{O} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

, kde S.....plocha průřezu potrubí [m²]

O.....obvod potrubí [m]

Ztráty místními odpory

Ztráty místními odpory se určují z rovnice (13)

$$\Delta p_m = \xi * \frac{w^2}{2} * \rho \quad [\text{Pa}] \quad (13)$$

, kde ξsoučinitel místního odporu [-]

Součinitel místního odporu závisí na geometrickém tvaru kanálu.

Je tedy potřeba vypočítat vlastnosti spalin, rychlosti spalin, součinitel tření a součinitel místních odporů v jednotlivých částech zařízení. Postup výpočtů je uveden v kapitolách 11.1 až 11.4.

Vypočtené a určené hodnoty, potřebné pro výpočet tlakové ztráty, jsou uvedeny v kapitole 11.6.

11.1 Vlastnosti spalin

Ze zadaného prvkového složení paliva, které je používáno v teplárně Dětmarovice, viz tabulka 11.1, zjistíme vlastnosti spalin. Výpočet provedeme dle vztahů uvedených v literatuře [16] [17].

Výpočet je vztažen na normální podmínky; teplota $T_n = 273,15$ K a tlak $p_n = 101\,325$ Pa.

Černé uhlí - Polsko			
Popis	Označení	Hodnota	Jednotka
voda veškerá původní	W^r	6,10	%
popel původní	A^r	18,44	%
síra v hořlavíně	S^{daf}	1,12	%
dušík v hořlavíně	N^{daf}	1,058	%
uhlík v hořlavíně	C^{daf}	88,152	%
vodík v hořlavíně	H^{daf}	5,948	%
kyslík v hořlavíně	O^{daf}	3,722	%
výhřevnost	Q_i^r	24,83	MJ.kg ⁻¹

Tabulka 11.1 prvkový rozbor paliva; černé uhlí – Polsko [5]

Přepočítání paliva

Pro další výpočet potřebujeme znát hořlavinu v původním stavu, kterou určíme dle vztahů (14-18):

$$S^r = S^{daf} \left(1 - \frac{W^r}{100} - \frac{A^r}{100} \right) \quad [\%] \quad (14)$$

$$S^r = 1,12 \left(1 - \frac{6,10}{100} - \frac{18,44}{100} \right) = \underline{0,845} \quad [\%]$$

$$N^r = N^{\text{daf}} \left(1 - \frac{W^r}{100} - \frac{A^r}{100} \right) \quad [\%] \quad (15)$$

$$N^r = 1,058 \left(1 - \frac{6,10}{100} - \frac{18,44}{100} \right) = \underline{0,798} \quad [\%]$$

$$C^r = C^{\text{daf}} \left(1 - \frac{W^r}{100} - \frac{A^r}{100} \right) \quad [\%] \quad (16)$$

$$C^r = 88,152 \left(1 - \frac{6,10}{100} - \frac{18,44}{100} \right) = \underline{66,52} \quad [\%]$$

$$H^r = H^{\text{daf}} \left(1 - \frac{W^r}{100} - \frac{A^r}{100} \right) \quad [\%] \quad (17)$$

$$H^r = 5,948 \left(1 - \frac{6,10}{100} - \frac{18,44}{100} \right) = \underline{4,488} \quad [\%]$$

$$O^r = O^{\text{daf}} \left(1 - \frac{W^r}{100} - \frac{A^r}{100} \right) \quad [\%] \quad (18)$$

$$O^r = 3,722 \left(1 - \frac{6,10}{100} - \frac{18,44}{100} \right) = \underline{2,809} \quad [\%]$$

Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1kg paliva

Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva určíme ze vztahu (19)

$$V_{O_{2\text{min}}} = 22,39 \left(\frac{C^r}{12,01 * 100} + \frac{H^r}{4,032 * 100} + \frac{S^r}{32,06 * 100} - \frac{O^r}{32 * 100} \right) \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (19)$$

$$V_{O_{2\text{min}}} = 22,39 \left(\frac{66,52}{12,01 * 100} + \frac{4,488}{4,032 * 100} + \frac{0,845}{32,06 * 100} - \frac{2,809}{32 * 100} \right)$$

$$V_{O_{2\text{min}}} = \underline{1,476} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva

Minimální objem suchého vzduchu se vypočte dle (20); vychází z objemového podílu kyslíku v suchém vzduchu, který je uvedený v tabulce 11.2.

$$V_{vsmin} = \frac{V_{O_2min}}{0,21} \quad [Nm^3.kg^{-1}] \quad (20)$$

$$V_{vsmin} = \frac{1,476}{0,21} = \underline{7,027} \quad [Nm^3.kg^{-1}]$$

Složka	Objemový podíl [-]
kyslík O ₂	0,2100
dusík N ₂	0,7805
argon Ar (včetně vzácných plynů)	0,0092
oxid uhličitý CO ₂	0,0003

Tabulka 11.2 objemové složení suchého vzduchu [17]

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1kg paliva

Minimální objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva určíme z rovnice (21)

$$V_{vvmin} = \chi_v * V_{vsmin} \quad [Nm^3.kg^{-1}] \quad (21)$$

, kde χ_vsoučinitel vlhkého vzduchu [-]

Pro běžné klimatické podmínky, které odpovídají relativní vlhkosti 70% a teplotě 20 °C, je $\chi_v = 1,016$.

$$V_{vvmin} = 1,016 * 7,027 = \underline{7,139} \quad [Nm^3.kg^{-1}]$$

Skutečné množství suchého spalovacího vzduchu

Skutečné množství suchého spalovacího vzduchu vypočteme dle vztahu (22)

$$V_{vs} = V_{vsmin} * \alpha \quad [Nm^3.kg^{-1}] \quad (22)$$

, kde αsoučinitel přebytku spalovacího vzduchu [-]

Součinitel spalovacího vzduchu se určí ze vztahu (23)

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_{2\text{měř}}} \quad [-] \quad (23)$$

, kde $O_{2\text{měř}}$ naměřené množství kyslíku [%]

Množství kyslíku pro druhý tah kotle $O_{2\text{měř}} = 5,1 \%$.

$$\alpha = \frac{21}{21 - 5,1} = \underline{1,32} \quad [-]$$

$$V_{\text{vs}} = 7,027 * 1,32 = \underline{9,275} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu

Z rovnice (24) určíme skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu

$$V_{\text{vv}} = V_{\text{vvmin}} * \alpha \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (24)$$

$$V_{\text{vv}} = 7,139 * 1,32 = \underline{9,424} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem suchých spalin vzniklých dokonalým spálením 1kg paliva

Pro určení minimálního objemu suchých spalin použijeme (25)

$$V_{\text{ssmin}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{Ar}} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (25)$$

, kde V_{CO_2} objem oxidu uhličitého $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

V_{SO_2} objem oxidu siřičitého $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

V_{N_2} objem dusíku $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

V_{Ar} objem argonu (včetně vzácných plynů) $[\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

Objemy jednotlivých složek jsou určeny následujícími vztahy (26-29):

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} * \frac{C^r}{100} + 0,0003 * V_{\text{vsmin}} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (26)$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} * \frac{66,52}{100} + 0,0003 * 7,027 = \underline{1,235} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} * \frac{S^r}{100} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (27)$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} * \frac{0,845}{100} = \underline{0,006} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} * N^r + 0,7805 * V_{\text{vsmin}} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (28)$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} * 0,798 + 0,7805 * 7,027 = \underline{5,491} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{\text{Ar}} = 0,0092 * V_{\text{vsmin}} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (29)$$

$$V_{\text{Ar}} = 0,0092 * 7,027 = \underline{0,065} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{\text{ssmin}} = 1,235 + 0,006 + 5,491 + 0,065 = \underline{6,796} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem vlhkých spalin vzniklých dokonalým spálením 1kg paliva

Pro výpočet minimálních vlhkých spalin použijeme (30)

$$V_{\text{svmin}} = V_{\text{ssmin}} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (30)$$

, kde $V_{\text{H}_2\text{O}}$ objem vodní páry ve spalinách [Nm³·kg⁻¹]

Objem vodní páry ve spalinách se určí dle vztahu (31)

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{44,8}{4,032} * \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} * \frac{W^r}{100} + (\chi_v - 1)V_{\text{vsmin}} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (31)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{44,8}{4,032} * \frac{4,488}{100} + \frac{22,4}{18,016} * \frac{6,10}{100} + (1,016 - 1) * 7,027$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \underline{0,687} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{\text{svmin}} = 6,796 + 0,687 = \underline{7,483} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečné množství vlhkých spalin

Skutečné množství vlhkých spalin pak určíme ze vztahu (32)

$$V_{\text{sv}} = V_{\text{svmin}} + (\alpha - 1) * V_{\text{vvmin}} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (32)$$

$$V_{\text{sv}} = 7,483 + (1,32 - 1) * 9,424 = \underline{9,768} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Složení skutečných vlhkých spalín

Objemové složení skutečných vlhkých spalín zjistíme ze vztahů (33-38).

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{\frac{22,26}{12,01} * \frac{C^r}{100} + 0,0003 * V_{\text{vs}}}{V_{\text{sv}}} * 100 \quad [\%] \quad (33)$$

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{\frac{22,26}{12,01} * \frac{66,52}{100} + 0,0003 * 9,275}{9,768} * 100 = \underline{12,65} \quad [\%]$$

$$\omega_{\text{SO}_2} = \frac{\frac{21,89}{32,06} * \frac{S^r}{100}}{V_{\text{sv}}} * 100 \quad [\%] \quad (34)$$

$$\omega_{\text{SO}_2} = \frac{\frac{21,89}{32,06} * \frac{0,845}{100}}{9,768} * 100 = \underline{0,059} \quad [\%]$$

$$\omega_{\text{N}_2} = \frac{\frac{22,4}{28,013} * \frac{N^r}{100} + 0,7805 * V_{\text{vs}}}{V_{\text{sv}}} * 100 \quad [\%] \quad (35)$$

$$\omega_{\text{N}_2} = \frac{\frac{22,4}{28,013} * \frac{0,798}{100} + 0,7805 * 9,275}{9,768} * 100 = \underline{74,18} \quad [\%]$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\frac{44,8}{4,032} * \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} * \frac{W^r}{100} + (\chi_v - 1) * V_{\text{vs}}}{V_{\text{sv}}} * 100 \quad [\%] \quad (36)$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\frac{44,8}{4,032} * \frac{4,488}{100} + \frac{22,4}{18,016} * \frac{6,10}{100} + (1,06 - 1) * 9,275}{9,768} * 100 \quad [\%]$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \underline{7,402} \quad [\%]$$

$$\omega_{\text{Ar}} = \frac{0,0092 * V_{\text{vs}}}{V_{\text{sv}}} * 100 \quad [\%] \quad (37)$$

$$\omega_{\text{Ar}} = \frac{0,0092 * 9,275}{9,768} * 100 = \underline{0,874} \quad [\%]$$

$$\omega_{\text{O}_2} = \frac{0,021 * (\alpha - 1) * V_{\text{vsmin}}}{V_{\text{sv}}} * 100 \quad [\%] \quad (38)$$

$$\omega_{O_2} = \frac{0,21 * (1,32 - 1) * 7,027}{9,768} * 100 = \underline{4,834} \quad [\%]$$

Pro větší přehlednost jsou výsledné hodnoty objemového složení skutečných vlhkých spalin uvedeny v tabulce č. 11.3.

Složka	Hodnota	Jednotka
ω_{CO_2}	12,65	%obj
ω_{SO_2}	0,059	%obj
ω_{N_2}	74,18	%obj
ω_{H_2O}	7,402	%obj
ω_{Ar}	0,874	%obj
ω_{O_2}	4,834	%obj
$\sum \omega_i$	100	%obj

Tabulka 11.3 složení skutečných vlhkých spalin

11.1.1 Hustota spalin

Hustotu vlhkých spalin s přebytkem vzduchu určíme pomocí vztahu (39)

$$\rho_{sv} = \frac{V_{svmin} * \rho_{svmin} + (\alpha - 1) * V_{vvmin} * \rho_{vv}}{V_{svmin} + (\alpha - 1) * V_{vvmin}} \quad [kg.Nm^{-3}] \quad (39)$$

, kde ρ_{svmin}hustota stechiometrických spalin dle (32) [kg.Nm⁻³]

ρ_{vv} hustota vzduchu dle (34) [kg.Nm⁻³]

Hustota stechiometrických spalin

$$\rho_{svmin} = \sum \frac{(\omega_i * \rho_i)}{100} \quad [\text{kg.Nm}^{-3}] \quad (40)$$

, kde ρ_ihustoty jednotlivých složek spalin viz tab. 11.4 [kg.Nm⁻³]

Plyn	Hustota ρ_i	jednotka
Ar	1,78385	[kg.Nm ⁻³]
N ₂	1,25047	[kg.Nm ⁻³]
CO ₂	1,9768	[kg.Nm ⁻³]
suchý vzduch	1,29279	[kg.Nm ⁻³]
vodní pára	0,8085	[kg.Nm ⁻³]
SO ₂	2,9262	[kg.Nm ⁻³]

Tabulka 11.4 hustoty jednotlivých složek spalin [17]

$$\rho_{svmin} = \frac{1}{100} * (\omega_{CO_2} * \rho_{CO_2} + \omega_{SO_2} * \rho_{SO_2} + \omega_{N_2} * \rho_{N_2} + \omega_{Ar} * \rho_{Ar} + \omega_{H_2O} * \rho_{H_2O}) \quad [\text{kg.Nm}^{-3}] \quad (41)$$

$$\rho_{svmin} = \frac{1}{100} * (12,65 * 1,977 + 0,059 * 2,926 + 74,18 * 1,251 + 0,874 * 1,784 + 7,402 * 0,809) = \underline{1,255} \quad [\text{kg.Nm}^{-3}]$$

Hustota vzduchu

Hustotu vlhkého vzduchu určíme z rovnice (42)

$$\rho_{vv} = \frac{V_{vsmin} * \rho_{vs} + (\chi_v - 1) * V_{vsmin} * \rho_{H_2O}}{V_{vvmin}} \quad [\text{kg.Nm}^{-3}] \quad (42)$$

$$\rho_{vv} = \frac{7,027 * 1,293 + (1,016 - 1) * 7,027 * 0,809}{7,139} = \underline{1,285} \quad [\text{kg.Nm}^{-3}]$$

Hustota spalin je pak rovna:

$$\rho_{sv} = \frac{7,483 * 1,255 + (1,32 - 1) * 7,139 * 1,285}{7,483 + (1,32 - 1) * 7,139} = \underline{1,262} \quad [\text{kg.Nm}^{-3}]$$

Skutečná hustota spalin

Skutečná hustota spalin v pilotním zařízení, pro teplotu 350 °C a tlak 100825 Pa, vychází se ze stavové rovnice (43)

$$\rho = \rho_{sv} * \frac{273,15}{t + 273,15} * \frac{p}{101325} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (44)$$

$$\rho = 1,262 * \frac{273,15}{350 + 273,15} * \frac{100825}{101325} = \underline{\underline{0,55}} \quad [\text{kg.m}^{-3}]$$

Vlastnosti spalin byly počítány v EES a jsou uvedeny v příloze na CD.

11.1.2 Kinematická viskozita spalin

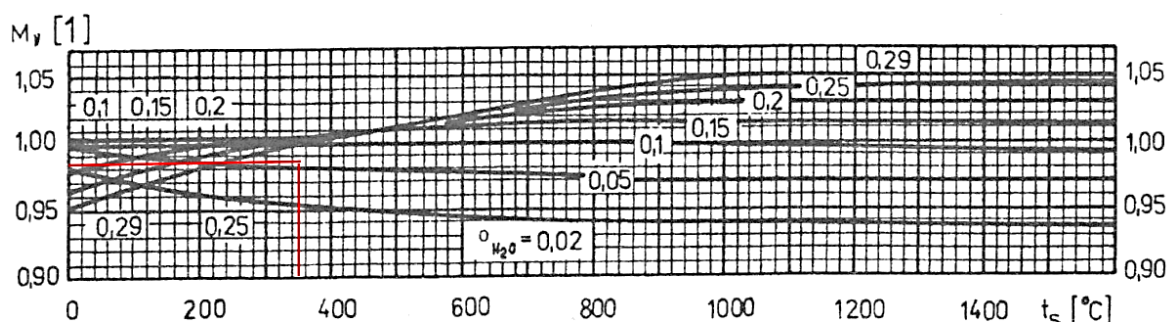
Kinematickou viskozitu spalin určíme ze vzorce (45)

$$\nu = M_v * \nu_{stř} \quad [\text{m}^2.\text{s}^{-1}] \quad (45)$$

, kde M_v opravný koeficient [-]

$\nu_{stř}$ kinematická viskozita spalin středního složení [m².s⁻¹]

Opravný koeficient M_v odečítáme z obrázku č. 11.1, v závislosti na obsahu vody ve spalinách a teplotě spalin. Teplota spalin je 350 °C a obsah vody ve spalinách je 7,402 % pak opravný koeficient má hodnotu $M_v=0,985$.



Obrázek 11.1 opravný koeficient kinematické viskozity spalin středního složení [17]

Pro určení kinematické viskozity spalin středního složení použijeme hodnoty z tabulky 11.5, která se nachází v literatuře [17] a z lineární interpolace (46) zjistíme hodnotu kinematické viskozity pro teplotu 350 °C.

T[°C]	$10^6 \cdot \nu_{stř}$ [m ² .s ⁻¹]
300	43,9
400	57,8

Tabulka 11.5 fyzikální charakteristiky spalin středního složení [17]

$$\nu_{stř_{350^{\circ}C}} = \frac{(350 - 400) * (57,8 * 10^{-6} - 43,9 * 10^{-6})}{400 - 300} + 43,9 * 10^{-6}$$

$$\nu_{stř_{350^{\circ}C}} = \underline{50,85 * 10^{-6}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (46)$$

Viskozita spalin je pak rovna

$$\nu = 0,985 * 50,85 * 10^{-6} = \underline{50,087 * 10^{-6}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

11.2 Součinitel tření

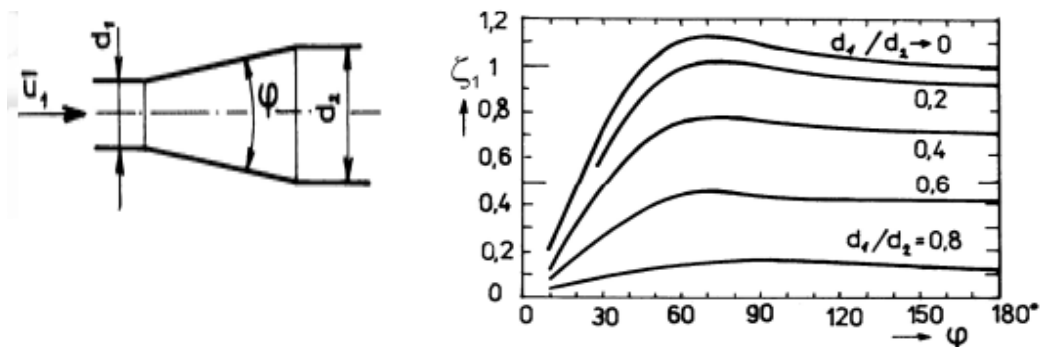
Součinitel tření λ [-] pro laminární proudění určíme z rovnice (47) a pro turbulentní proudění použijeme vztah dle Jakimova (48). Jestliže se bude jednat o přechodovou oblast, doporučuje se volit $\lambda=0,04$ [16].

$$\lambda = 64/\text{Re} \quad [-] \quad (47)$$

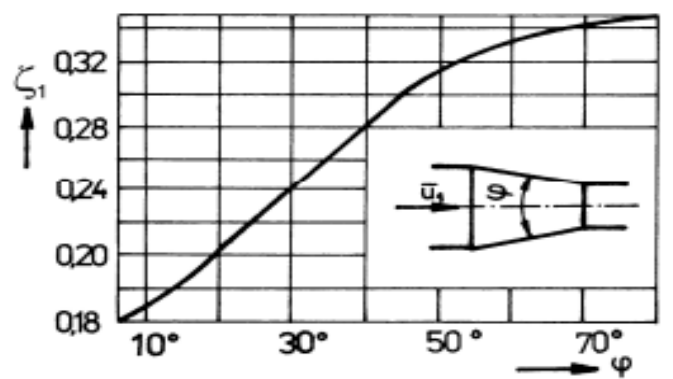
$$\lambda = 0,19 * \left(\frac{\varepsilon}{d_{ekv}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [-] \quad (48)$$

11.3 Součinitel místního odporu

Součinitele místních odporů se určují v závislosti na geometrii. Zařízení je tvořeno z několika částí, pro které je třeba tyto součinitele místních odporů určit. Je třeba určit součinitele místních odporů: pro pozvolné zúžení dle obr. č. 11.2, pro pozvolné rozšíření obr. č. 11.3 [18] a součinitele místního odporu pro průtok mříží, který se určí ze vzorce (49).



Obrázek 11.2 součinitel místního odporu pro pozvolné zúžení průřezu [18]



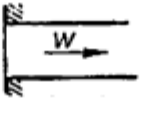
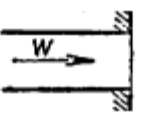
Obrázek 11.3 součinitel místního odporu pro pozvolné zúžení průřezu [18]

$$\xi = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 + 0,707 * \frac{S_2}{S_1} * \sqrt{\left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)} \right)^2 \quad [-] \quad (49)$$

, kde S_2 průřez trubky [m]

S_1 volný průřez mříže [m]

Pro potrubí spojující druhý tah kotle s pilotním zařízením, se počítá součinitel místního odporu pro vstup do trubky s ostrou hranou a pro výstup z trubky obr. č. 11.4.

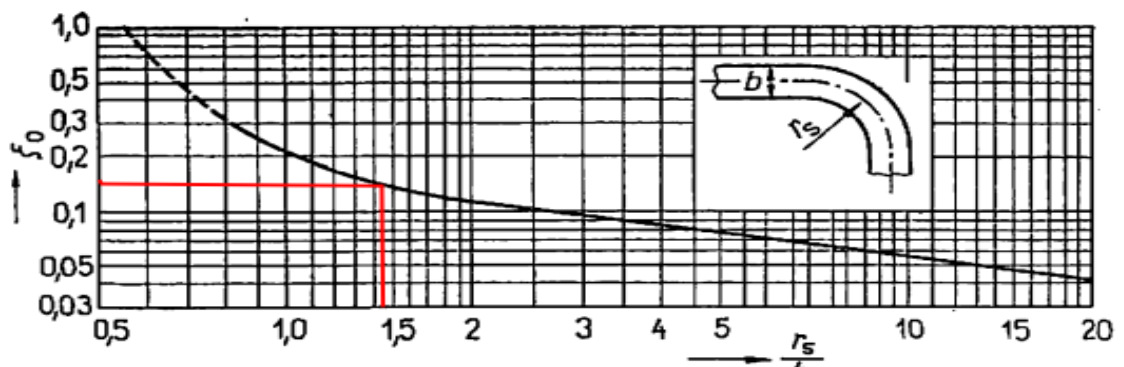
vstup do trubky s ostrou hranou		$\xi = 0,5$
výstup z trubky		$\xi = 1$

Obrázek 11.4 součinitel místního odporu pro výstup a vstup do trubky [16]

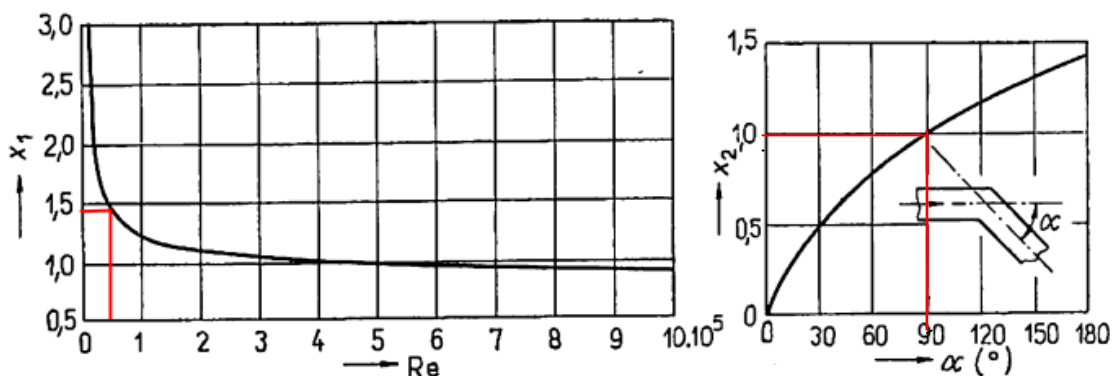
Součinitel místního odporu pro oblouková kolena kruhového průřezu se určí ze vztahu (50).

$$\xi = \xi_0 * x_1 * x_2 \quad [-] \quad (50)$$

Součinitel ξ_0 platí pro kruhový průřez, $Re = 5 \cdot 10^3$ a úhel kolena $\alpha = 90^\circ$ odečítáme z obrázku č. 11.5 Opravné součinitele x_1 a x_2 , které respektují jiné Re a jiný úhel kolena α , se odečítají z obrázku č. 11.6.



Obrázek 11.5 součinitel ξ_0 pro $Re = 5 \cdot 10^3$ a úhel kolena $\alpha = 90^\circ$ [16]



Obrázek 11.6 opravné součinitele pro oblouková kolena [16]

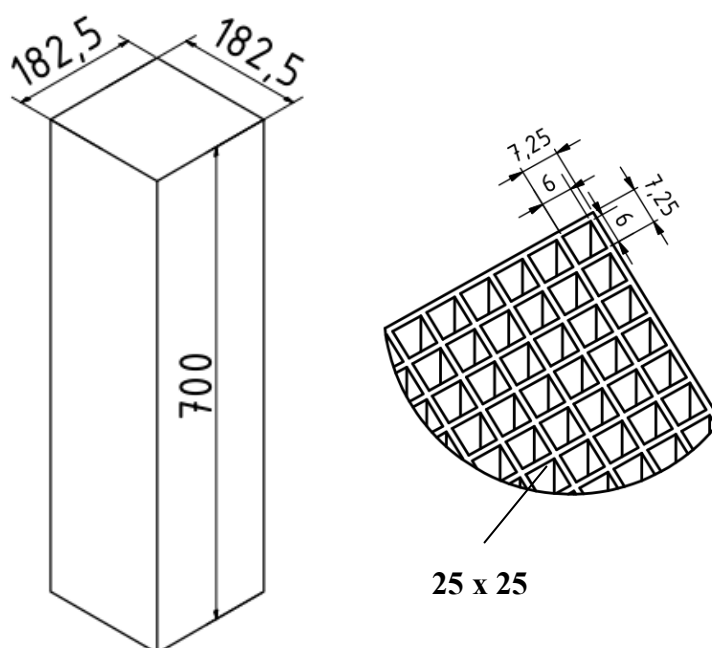
11.4 Rychlosti v zařízení

Ze známé efektivní rychlosti $w = 4,5 \text{ m.s}^{-1}$ v katalyzátoru a rozměrů katalyzátoru obr. 11.7, se na základě rovnice kontinuity (51) určí objemový průtok jednotkou.

$$\dot{V} = S * w \quad [\text{m}^3.\text{s}^{-1}] \quad (51)$$

, kde S.....plocha otvoru katalyzátoru $[\text{m}^2]$

w.....rychlost proudění spalin v katalyzátoru $[\text{m.s}^{-1}]$



Obrázek 11.7 rozměry katalyzátoru

V zařízení se budou nacházet 4 tyto bloky katalyzátorů paralelně řazených. Každý blok katalyzátoru má 625 otvorů, kterými prochází spaliny. Celkový počet otvorů je 2500.

Objemový průtok jednotkou je tedy dán vztahem (52).

$$\dot{V} = S * w * n \quad [\text{m}^3.\text{s}^{-1}] \quad (52)$$

, kde n.....celkový počet otvorů $[-]$

$$\dot{V} = (6 * 10^{-3})^2 * 4,5 * 2500 = \underline{0,405} \quad [\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$$

Objemový průtok za normálních podmínek je roven (53)

$$\dot{V}_n = \frac{p}{p_n} * \frac{T_n}{T} * \dot{V} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (53)$$

$$\dot{V}_n = \frac{100\,825}{101\,325} * \frac{273,15}{(273,15 + 350)} * 0,405 = \underline{0,177} \quad [\text{Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Z objemového průtoku jednotkou určíme rychlosti v jednotlivých částech zařízení, dle vztahu (54), které pak použijeme pro zjištění tlakové ztráty.

$$w = \frac{\dot{V}}{S} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (54)$$

, kde Sprůřezu dané části [m²]

Jednotka je tvořena částmi s měnícím se průřezem. Pro výpočet tlakové ztráty pak bude použita střední rychlost v počítané části zařízení (55)

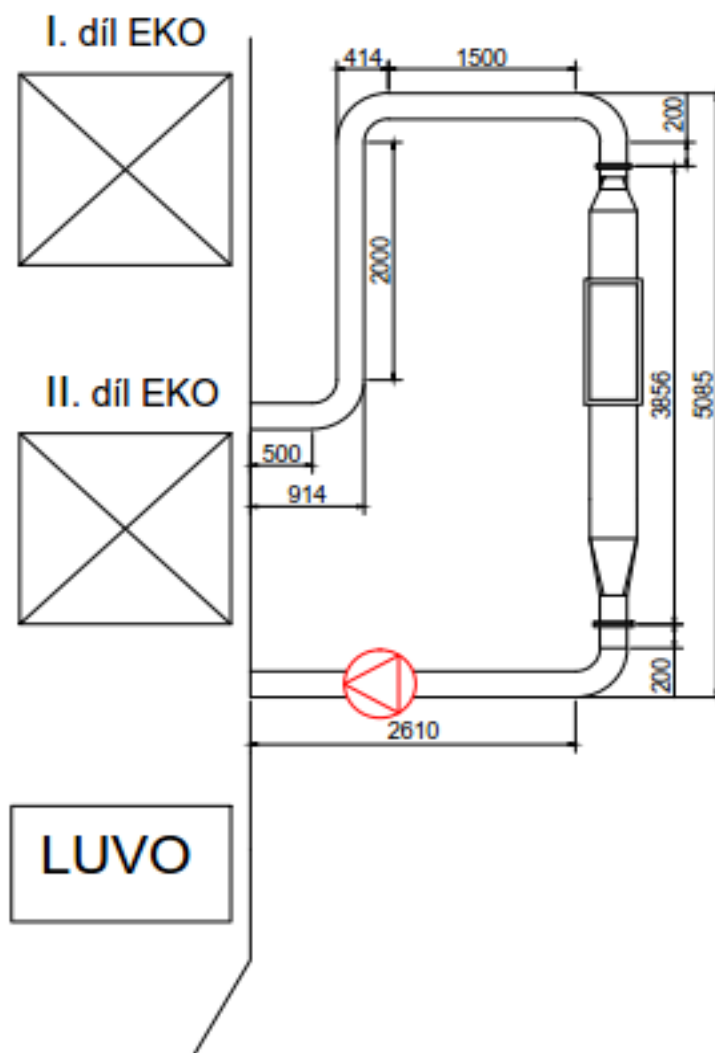
$$w_{\text{stř}} = \frac{w_{(0)} + w_{(1)}}{2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (55)$$

, kde $w_{(0)}$ rychlost na vstupu [m.s⁻¹]

$w_{(2)}$ rychlost na výstupu [m.s⁻¹]

11.5 Tlaková ztráta zařízení

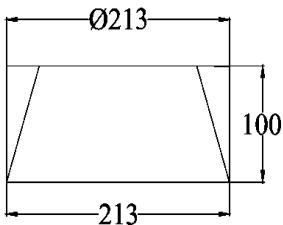
Tato kapitola uvádí vypočtené hodnoty (rychlosti, součinitele...) pro jednotlivé části zařízení a jejich tlakové ztráty. Pro návrh ventilátoru počítáme s tlakovou ztrátou zařízení i tlakovou ztrátou spalinových kanálů. Zapojení zařízení do druhého tahu kotle a rozměry potrubí jsou znázorněny na obrázku 11.8. Výpočty byly prováděny v Microsoft Excel a jsou uvedeny v příloze na CD.

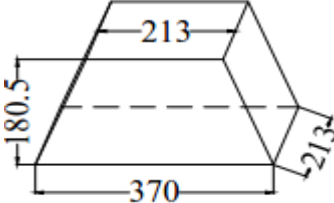


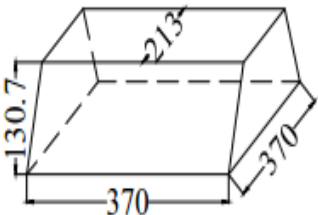
Obrázek 11.8 zapojení zařízení do druhého tahu kotle

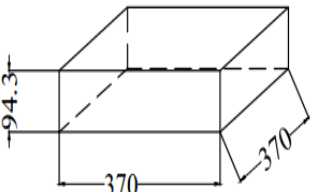
Níže jsou, pro větší přehlednost schematicky znázorněny jednotlivé části zařízení. Schémata částí jsou řazeny tak, jak budou proudit spaliny. Ke každé části je uvedena střední rychlost v součásti $w_{stř}$, Reynoldsovo číslo Re , ekvivalentní průměr d_{ekv} , součinitel tření λ a součinitel místního odporu ξ ; z těchto hodnot jsou ze vztahů (-) vypočteny třecí Δp_t a místní ztráty Δp_m a z nich pak celková tlaková ztráta Δp_c dané části.

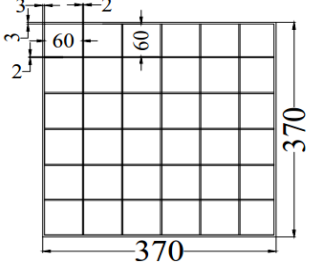
	w [m.s ⁻¹]	11,37	λ [-]	0,015
	Re [-]	48 334	ξ [-]	0
	l [-]	0,0945	Δp_t [Pa]	0,23
	d_{ekv} [m]	0,213	Δp_m [Pa]	0
	$\Delta p_c = 0,23$ [Pa]			

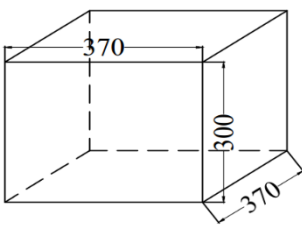
	w [m.s ⁻¹]	10,15	λ [-]	0,015
	Re [-]	43 148	ξ [-]	0,05
	l [-]	0,1	Δp_t [Pa]	0,2
	d_{ekv} [m]	0,213	Δp_m [Pa]	1,42
	$\Delta p_c = 1,61$ [Pa]			

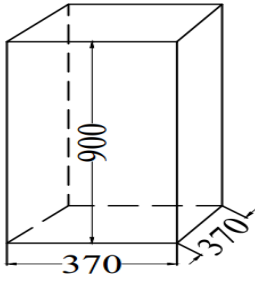
	$w_{stř}$ [m.s ⁻¹]	7,03	λ [-]	0,014
	Re [-]	29 907	ξ [-]	0,13
	l [-]	0,1805	Δp_t [Pa]	0,14
	d_{ekv} [m]	0,242	Δp_m [Pa]	1,78
	$\Delta p_c = 1,91$ [Pa]			

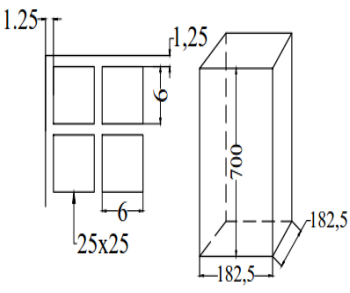
	$w_{stř}$ [m.s ⁻¹]	4,05	λ [-]	0,01
	Re [-]	25 880	ξ [-]	0,22
	l [-]	0,1307	Δp_t [Pa]	0,02
	d_{ekv} [m]	0,32	Δp_m [Pa]	0,99
	$\Delta p_c = 1,01$ [Pa]			

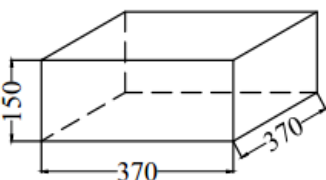
	$w_{stř}$ [m.s ⁻¹]	2,96	λ [-]	0,01
	Re [-]	21 853	ξ [-]	0
	l [-]	0,0943	Δp_t [Pa]	0,01
	d_{ekv} [m]	0,37	Δp_m [Pa]	0
	$\Delta p_c = 0,01$ [Pa]			

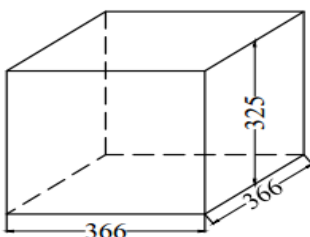
	$w_{stř}$ [m.s ⁻¹]	3,13	λ [-]	0,02
	Re [-]	3 743	ξ [-]	0,05
	l [-]	0,075	Δp_t [Pa]	0,13
	d_{ekv} [m]	0,06	Δp_m [Pa]	0,14
	$\Delta p_c = 0,28$ [Pa]			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	2,96	$\lambda [-]$	0,01
	Re [-]	21 853	$\xi [-]$	0
	l [-]	0,3	$\Delta p_t [Pa]$	0,02
	$d_{ekv} [m]$	0,37	$\Delta p_m [Pa]$	0
	$\Delta p_c = 0,02 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	2,96	$\lambda [-]$	0,01
	Re [-]	21 853	$\xi [-]$	0
	l [-]	0,9	$\Delta p_t [Pa]$	0,07
	$d_{ekv} [m]$	0,37	$\Delta p_m [Pa]$	0
	$\Delta p_c = 0,07 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	4,5	$\lambda [-]$	0,14
	Re [-]	539	$\xi [-]$	0,98
	l [-]	0,7	$\Delta p_t [Pa]$	77,18
	$d_{ekv} [m]$	0,00515	$\Delta p_m [Pa]$	7,38
	$\Delta p_c = 84,56 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	2,96	$\lambda [-]$	0,01
	Re [-]	21 853	$\xi [-]$	0
	l [-]	0,15	$\Delta p_t [Pa]$	0,01
	$d_{ekv} [m]$	0,37	$\Delta p_m [Pa]$	0
	$\Delta p_c = 0,01 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	2,96	$\lambda [-]$	0,01
	Re [-]	21 617	$\xi [-]$	0
	l [-]	0,325	$\Delta p_t [Pa]$	0,03
	$d_{ekv} [m]$	0,366	$\Delta p_m [Pa]$	0
	$\Delta p_c = 0,03 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	2,96	$\lambda [-]$	0,01
	Re [-]	17 217	$\xi [-]$	0,2
	l [-]	0,48	$\Delta p_t [Pa]$	0,05
	$d_{ekv} [m]$	0,29	$\Delta p_m [Pa]$	0,48
	$\Delta p_c = 0,53 [Pa]$			

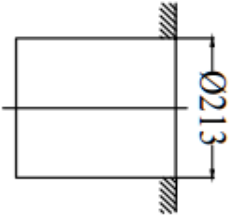
	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	11,37	$\lambda [-]$	0,02
	Re [-]	53 445	$\xi [-]$	0
	l [-]	0,23	$\Delta p_t [Pa]$	0,54
	$d_{ekv} [m]$	0,213	$\Delta p_m [Pa]$	0
	$\Delta p_c = 0,54 [Pa]$			

Následují části spalinového kanálu.

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	11,37	$\lambda [-]$	0,02
	Re [-]	48 334	$\xi [-]$	0,22
	l [-]	0,48	$\Delta p_t [Pa]$	1,18
	$d_{ekv} [m]$	0,213	$\Delta p_m [Pa]$	7,73
	$\Delta p_c = 35,65 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	11,37	$\lambda [-]$	0,02
	Re [-]	48 334	$\xi [-]$	0,5
	l [-]	0,5	$\Delta p_t [Pa]$	1,23
	$d_{ekv} [m]$	0,213	$\Delta p_m [Pa]$	17,77
	$\Delta p_c = 19,01 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	11,37	$\lambda [-]$	0,02
	Re [-]	48 334	$\xi [-]$	0
	l [-]	3,9	$\Delta p_t [Pa]$	9,61
	$d_{ekv} [m]$	0,213	$\Delta p_m [Pa]$	0
	$\Delta p_c = 9,61 [Pa]$			

	$w_{stř} [m.s^{-1}]$	11,37	$\lambda [-]$	0,02
	$Re [-]$	48 334	$\xi [-]$	1
	$l [-]$	2,414	$\Delta p_t [Pa]$	5,95
	$d_{ekv} [m]$	0,213	$\Delta p_m [Pa]$	35,55
	$\Delta p_c = 41,5 [Pa]$			

Celková tlaková ztráta zařízení je součtem jednotlivých ztrát částí Δp_c (56)

$$\Delta p_c = \sum \Delta p_{ci} \quad [Pa] \quad (56)$$

$$\Delta p_c = \underline{196,59} \quad [Pa]$$

Celková tlaková ztráta zařízení pro průtok $0,405 m^3.s^{-1}$ je 196,59 Pa. Pro pokrytí této tlakové ztráty je třeba navrhnout ventilátor.

12. Návrh ventilátoru

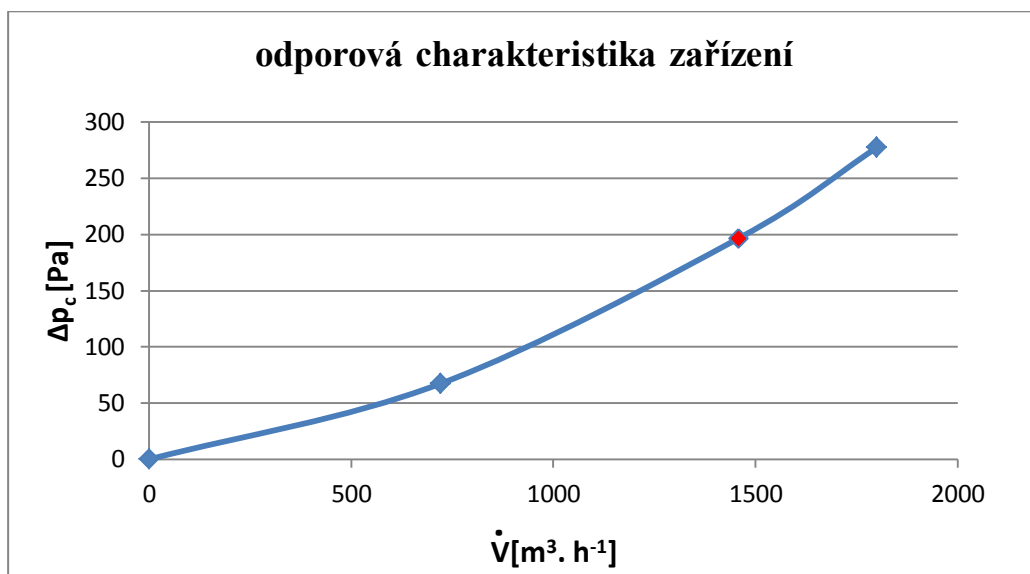
Zařízením budou procházet horké spaliny o teplotě 350 °C o objemovém průtoku $1458 m^3.h^{-1}$. Tlaková ztráta při tomto průtoku je přibližně 197 Pa. Pro tyto parametry je potřeba navrhnout ventilátor.

Pro správnou funkci ventilátoru, musí být určen tzv. provozní bod, což je průsečík odporové charakteristiky zařízení (spotřebiče) a tlakové charakteristiky ventilátoru.

Odporová charakteristika zařízení je závislost tlakové ztráty na změně objemového průtoku. Pro zvolené průtoky určíme tlakovou ztrátu, viz tabulka 12.1, dle které sestrojíme odporovou charakteristiku zařízení obr. 12.1.

Δp_c	[Pa]	0	67,2	196,6	277,3
V	[m ³ .h ⁻¹]	0	720	1458	1800

Tabulka 12.1 hodnoty tlakové ztráty pro zvolené průtoky



Obrázek 12.1 odporová charakteristika zařízení

Tlaková charakteristika ventilátoru se sestavuje na základě měření a je poskytnuta výrobcem. Každý ventilátor má svoji specifickou tlakovou charakteristiku.

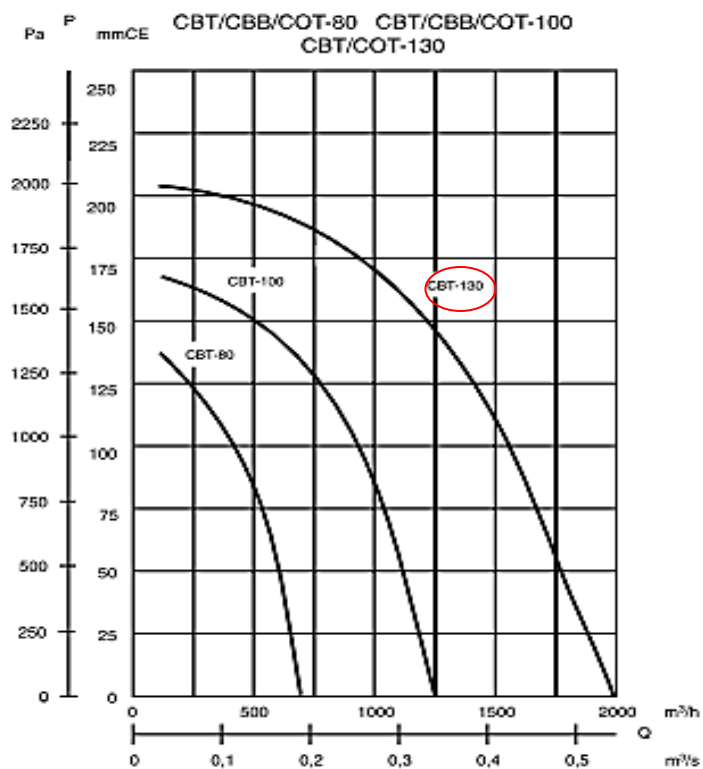
Vyráběné ventilátory, pro tento průtok, nesplňují teplotní podmínku. V našem případě se jedná se o atypický případ zadání. Je tedy zapotřebí navrhnout konstrukční úpravu ventilátoru, aby bylo možné použít spaliny o teplotě 350 °C. Navrhovaná úprava je uvedena v kapitole 12.1.

Na základě objemového průtoku byl vybrán radiální ventilátor, od firmy Elektrodesign, typu CBT - 13ON; s asynchronním motorem s kotvou nakrátko. Technické parametry ventilátoru jsou uvedeny v tabulce 12.2. Ventilátor se instaluje přímo do potrubí a je opatřen frekvenčním měničem pro změnu otáček. Podrobné informace a schémata jsou uvedeny v příloze 5.

CBT 130 N		
Průtok	1910	[m ³ .h ⁻¹]
Příkon	1,10	[kW]
Proud	2.50	[A]
Napětí	400	[V]
Otáčky	2800	[min ⁻¹]
Hmotnost	27,5	[kg]

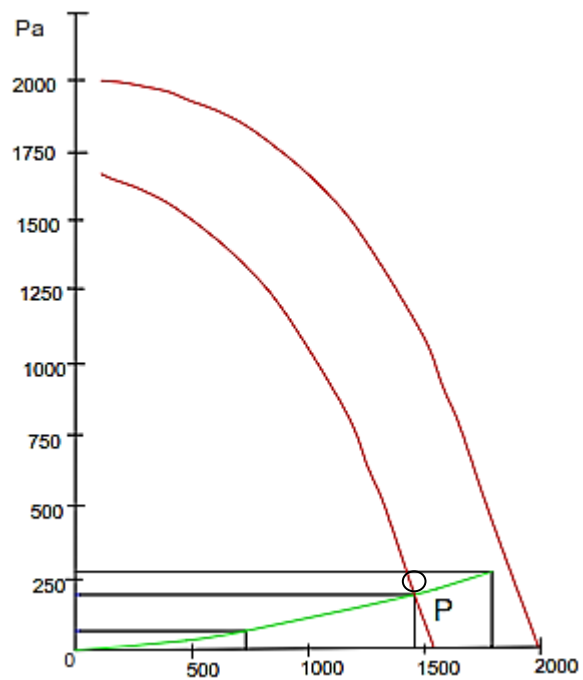
Tabulka 12.1 parametry ventilátoru CBT 130 N

Na obrázku 12. je vyobrazena tlaková charakteristika ventilátoru dána výrobcem.



Obrázek 12.2 charakteristika ventilátoru

Průsečíkem odporové charakteristiky zařízení a charakteristiky ventilátoru vznikne provozní bod ventilátoru. Pro dosažení požadovaného provozního bodu, je třeba snížit otáčky ventilátoru; obrázek 12.3.

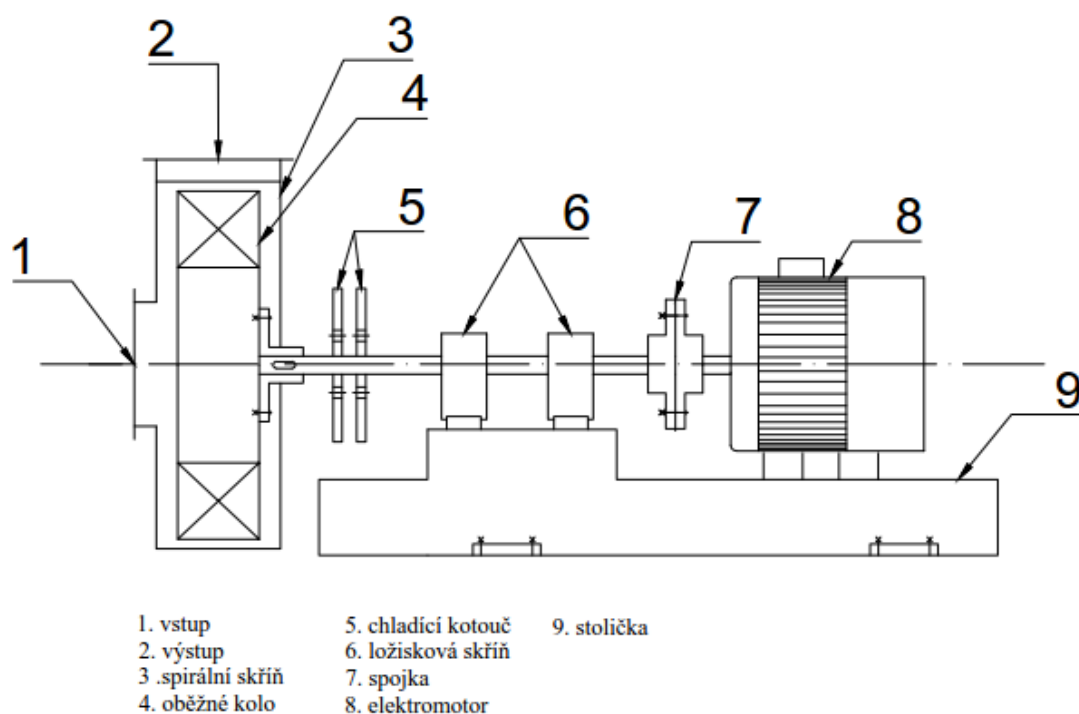


Obrázek 12. 3 provozní bod

12.1 Úprava ventilátoru

Ventilátor dopravuje spaliny o teplotě 350 °C; tato teplota však není vhodná pro správnou funkci ložisek. Musí být proto zajištěno jejich dostatečné chlazení.

Navrhovaná úprava zahrnuje změnu spojení rotoru ventilátoru a pohonu z tzv. zapojení napřímo na tzv. zapojení na spojku. Hřídel ventilátoru bude uložena ve valivých ložiskách v samostatných skříních. Pro chlazení ložisek budou použity dva chladicí kotouče, které budou nasazeny na hřídel mezi spirální skříní a ložiska. Zapojení je znázorněno na obr. č. 12.4.



Obrázek 12.4 návrh chlazení ventilátoru

13. Bilance zařízení

Zařízením (katalyzátorem) prochází spaliny o známém složení tab. 13.1. Objemový průtok spalin jednotkou je $0,405 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro určení hmotnostní bilance je třeba vyjádřit jednotlivé složky spalin v jednotkách $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Objemové složení spalin		
ω_{CO_2}	12,65	% _{obj}
ω_{SO_2}	0,059	% _{obj}
ω_{N_2}	74,16	% _{obj}
$\omega_{\text{H}_2\text{O}}$	7,402	% _{obj}
ω_{O_2}	4,834	% _{obj}
ω_{Ar}	0,874	% _{obj}
ω_{CO}	0,001	% _{obj}
ω_{NO_2}	$1,12 \cdot 10^{-3}$	% _{obj}
ω_{NO}	$1,49 \cdot 10^{-2}$	% _{obj}
ω_{Hg_c}	$1,71 \cdot 10^{-7}$	% _{obj}
suma	100	% _{obj}

Tabulka 13.1 Složení spalin na vstupu do katalyzátoru

Hmotnostní průtok katalyzátorem se určí ze vztahu (57).

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (57)$$

, kde ρ hustota spalin viz.(44)

$$\dot{m} = 0,405 * 0,55 = \underline{0,223} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Pro stanovení hmotnostní bilance je třeba přepočíst jednotlivé složky spalin na jednotky hmotnostního průtoku (58). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 13.2.

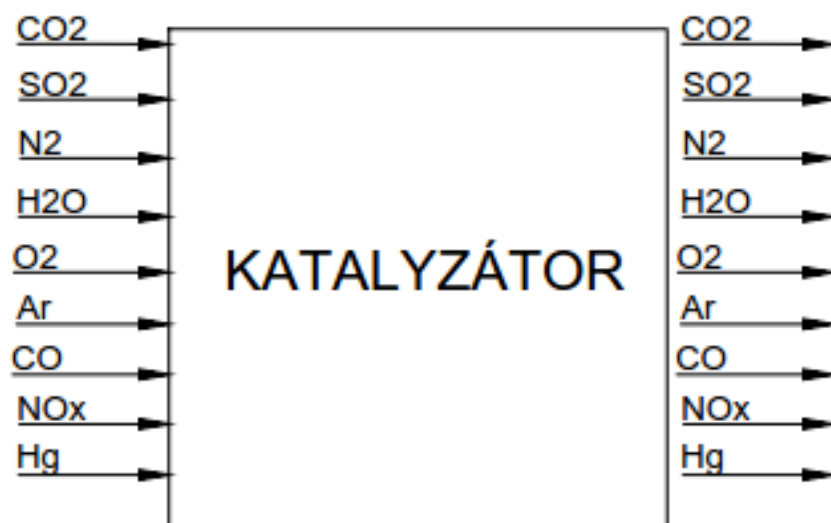
$$\dot{m}_i = \frac{\omega_i * \dot{m}}{100} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (58)$$

hmotnostní průtok				
\dot{m}_{CO_2}	0,028196	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	28196	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{SO_2}	0,000132	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	132	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{N_2}	0,165303	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	165300	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	0,016498	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	16498	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{O_2}	0,010775	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	10775	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{Ar}	0,001948	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	1948	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{CO}	$2,23\cdot 10^{-6}$	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	2,23	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{NO_2}	$2,89\cdot 10^{-6}$	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	2,89	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{NO}	$3,84\cdot 10^{-5}$	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	38,41	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{Hg_c}	$4,12\cdot 10^{-10}$	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0,000412	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$

Tabulka 13.2 hmotnostní průtoky jednotlivých složek na vstupu resp. výstupu

Z bilance viz obr. 13. 1 je zřejmé, že hmotnostní průtok spalin na vstupu bude stejný, jako hmotnostní průtok spalin na výstupu. Jednotlivé složky spalin jako CO_2 , SO_2 ... zůstanou stejné. Co se však týče rtuti, budou se měnit její jednotlivé formy i přesto, že celkové množství Hg_c zůstane nezměněno. Úkolem katalyzátoru je přeměnit, co největší množství elementární rtuti Hg^0 na oxidovanou formu rtuti Hg^{2+} . Z toho vyplývá, že na výstupu z katalyzátoru (zařízení) bude narůstat množství oxidované formy rtuti, klesat množství rtuti elementární a množství rtuti vázané na popílek Hg_p by se mělo, po průchodu jednotkou, nepatrně zvýšit vlivem absorpce.

Způsob jakým se přesně bude měnit obsah jednotlivých složek rtuti při průchodu jednotkou, ukážou až výsledky zkoušek na reálném zařízení.



Obrázek 13.1 hmotnostní bilance katalyzátoru

Další vyhodnocování, které by mohlo na jednotce probíhat, je závislost redukce NO_x, vzhledem ke rtuti. Jelikož katalyzátor na svém povrchu váže rychleji částice čpavku NH₃, dochází prvně k redukci emisí NO_x a až následně k oxidaci Hg⁰. Jaká by byla aktivita katalyzátoru vzhledem ke rtuti, při různém množství vstřikovaného čpavku, by mohlo být předmětem dalšího zkoumání.

Pokud bychom se chtěli dostat na hodnotu NO_x např. 180 mg.m⁻³, abychom i při změně vstřiku čpavku dodrželi emisní limity (200 mg.m⁻³) a zároveň, abychom byli schopni pozorovat aktivitu katalyzátoru vzhledem ke rtuti, je třeba navrhnout množství vstřikovaného čpavku.

Množství vstřikovaného čpavku určíme na základě rovnic (59-60).



Do jednotky vstupuje 330 mg.Nm⁻³ NO_x (změřeno), z toho 93% NO a 7% NO₂. Chceme se dostat na hodnotu 180 mg.Nm⁻³ tzn., že potřebujeme zredukovat ΔNO_x = 150 mg.Nm⁻³. Z toho pak ΔNO=139,5 mg.Nm⁻³ a ΔNO₂=10,5 mg.Nm⁻³.

Pro výpočet potřebujeme znát molární hmotnosti jednotlivých složek viz. tabulka 13.3.

4NO	120,03	g.kmol ⁻¹
4NH ₃	68,12	g.kmol ⁻¹
4N ₂	112,05	g.kmol ⁻¹
6H ₂ O	108,10	g.kmol ⁻¹

2NO ₂	92,01	g.kmol ⁻¹
4NH ₃	68,12	g.kmol ⁻¹
3N ₂	84,04	g.kmol ⁻¹
6H ₂ O	108,10	g.kmol ⁻¹

Tabulka 13.3 molární hmotnosti jednotlivých složek

Pak množství čpavku potřebné k redukci NO se spočte dle (61), vycházející z rovnice (59):

$$4\text{NO} \dots\dots\dots 120,03 \text{ g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots \Delta\text{NO} = 139,5 \text{ mg.Nm}^{-3}$$

$$4\text{NH}_3 \dots\dots\dots 68,12 \text{ g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots m\text{NH}_3$$

$$m\text{NH}_3 = \frac{4\text{NH}_3 * \Delta\text{NO}}{4\text{NO}} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}] \quad (61)$$

$$m\text{NH}_3 = \frac{68,12 * 139,5}{120,3} = \underline{79,18} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}]$$

Množství vzniklého N₂ při redukci NO, dle (62)

$$4\text{NH}_3 \dots\dots\dots 68,12 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots 79,18 \text{ mg.Nm}^{-3}$$

$$4\text{N}_2 \dots\dots\dots 112,05 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots \text{mN}_2$$

$$m\text{N}_2 = \frac{4\text{N}_2 * m\text{NH}_3}{4\text{NH}_3} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}] \quad (62)$$

$$m\text{N}_2 = \frac{112,05 * 79,18}{68,12} = \underline{130,23} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}]$$

Množství vzniklé H₂O při redukci NO, dle (63)

$$4\text{NH}_3 \dots\dots\dots 68,12 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots 79,18 \text{ mg.Nm}^{-3}$$

$$6\text{H}_2\text{O} \dots\dots\dots 108,10 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots \text{m H}_2\text{O}$$

$$m\text{H}_2\text{O} = \frac{6\text{H}_2\text{O} * m\text{NH}_3}{4\text{NH}_3} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}] \quad (63)$$

$$m\text{H}_2\text{O} = \frac{108,10 * 79,18}{68,12} = \underline{125,63} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}]$$

Obdobně pak množství čpavku potřebného pro redukci NO₂ dle (64) vycházející z rovnice (60).

$$2\text{NO}_2 \dots\dots\dots 92,01 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots \Delta\text{N}_2=10,5 \text{ mg.Nm}^{-3}$$

$$4\text{NH}_3 \dots\dots\dots 68,12 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots \text{mNH}_3$$

$$m\text{NH}_3 = \frac{4\text{NH}_3 * \Delta\text{NO}_2}{4\text{NO}} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}] \quad (64)$$

$$m\text{NH}_3 = \frac{68,12 * 10,5}{92,01} = \underline{7,77} \quad [\text{mg.Nm}^{-3}]$$

Množství vzniklého N₂ při redukci NO₂, dle (65)

$$4\text{NH}_3 \dots\dots\dots 68,12 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots 7,77 \text{ mg.Nm}^{-3}$$

$$3\text{N}_2 \dots\dots\dots 84,04 \quad \text{g.kmol}^{-1} \dots\dots\dots \text{mN}_2$$

$$mN_2 = \frac{3N_2 * mNH_3}{4NH_3} \quad [mg.Nm^{-3}] \quad (65)$$

$$mN_2 = \frac{84,04 * 7,77}{68,12} = \underline{9,59} \quad [mg.Nm^{-3}]$$

Množství vzniklé H₂O při redukci NO₂, dle (66)

$$4NH_3 \dots\dots\dots 68,12 \quad g.kmol^{-1} \dots\dots\dots 7,77 \quad mg.Nm^{-3}$$

$$6H_2O \dots\dots\dots 108,10 \quad g.kmol^{-1} \dots\dots\dots m \quad H_2O$$

$$mH_2O = \frac{6H_2O * mNH_3}{4NH_3} \quad [mg.Nm^{-3}] \quad (66)$$

$$mH_2O = \frac{108,10 * 7,77}{68,12} = \underline{12,34} \quad [mg.Nm^{-3}]$$

Vypočtené hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce č.13.4

mNH ₃	79,18	mg.Nm ⁻³	mNH ₃	7,77	mg.Nm ⁻³
mN ₂	130,23	mg.Nm ⁻³	mN ₂	9,59	mg.Nm ⁻³
mH ₂ O	125,63	mg.Nm ⁻³	mH ₂ O	12,34	mg.Nm ⁻³

Tabulka 13.4 výsledky výpočtů pro redukci NO (vlevo) a NO₂ (vpravo)

Pro redukci 180 mg.Nm⁻³ NO_x je zapotřebí 86,95 mg.Nm⁻³ čpavku, přičemž vznikne 139,80 mg.Nm⁻³ N₂ a 137,97 mg.Nm⁻³ H₂O; tabulka13.5. Pro přepočet na hmotnostní průtok se využije vztahu (67); výsledky jsou uvedeny v tab. 13.6.

mNH ₃	86,95	mg.Nm ⁻³
mN ₂	139,82	mg.Nm ⁻³
mH ₂ O	137,97	mg.Nm ⁻³

Tabulka 13.5 celkové množství potřebného NH₃ a vzniklých N₂ a H₂O

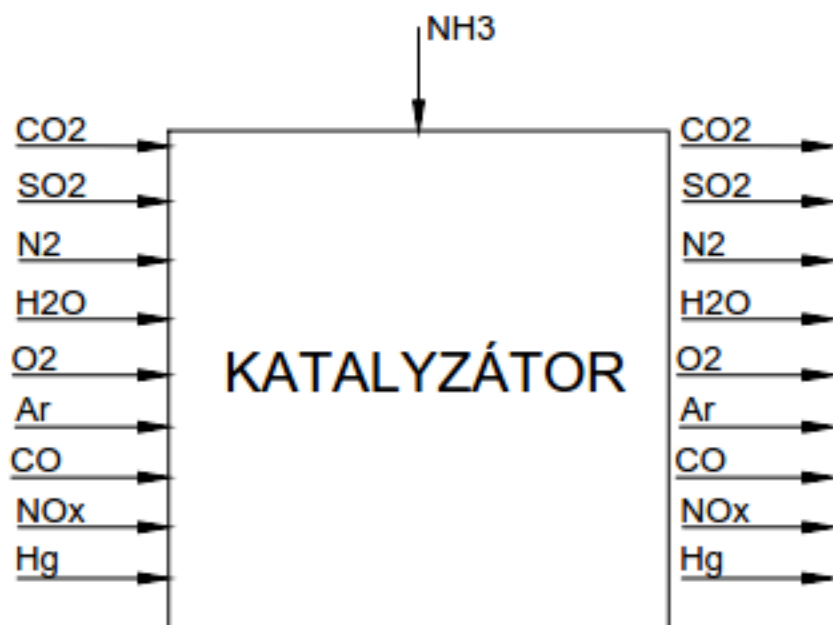
$$\dot{m} = m_i * \dot{V}_n \quad [mg.s^{-1}] \quad (67)$$

, V_n uvedeno v kapitole 11 v rovnici (54)

\dot{m}_{NH_3}	15,360	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{N_2}	24,700	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	24,372	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$

Tabulka 13.6 hmotnostní průtoky NH_3 , N_2 a H_2O

Hmotnostní bilance se bude v tomto případě již lišit, viz. obr. č. 13.2. Do jednotky bude navíc vstupovat čpavek, což bude mít za následek zvýšení průtoku. Na výstupu pak naroste množství H_2O , N_2 a poklesne množství NO_x . Výsledné hodnoty hmotnostních průtoků jednotlivých složek jsou uvedeny v tabulce 13.7.



Obrázek 13.2 hmotnostní bilance na katalyzátoru při redukci NO_x

hmotnostní průtok na výstupu		
\dot{m}_{CO_2}	28196	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{SO_2}	132	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{N_2}	165329	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	16523	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{O_2}	10775	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{Ar}	1948	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{CO}	2,23	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{NO_2}	0,72	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{NO}	10,99	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{Hg_c}	0,000382	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_c	222915	$\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$

Tabulka 13.7 hmotnostní průtok složek spalin při současné redukci NO_x

14. Závěr

Zadáním diplomové práce bylo navrhnout zkušební zařízení pro výzkum emisí rtuti ze spalování uhlí. Návrh vychází z aktuálně řešené problematiky emisí rtuti a dopadů chystané legislativy, které se v blízké době dotknou i českého teplárenství. Z dřívějších výzkumů vyplývá, že nejvhodnější způsob, jakým emise rtuti ze spalin odstranit je použití katalyzátoru v kombinaci s metodou mokrého odsíření spalin. Z těchto důvodů je katalyzátor využit v návrhu zkušebního zařízení.

Zařízení bude instalováno v Elektrárně Dětmárovice, kde bude napojeno, na zdroj spalin, přes vhodný průlez do druhého tahu kotle. Z tohoto místa budou vedeny spaliny spalínovým kanálem do zkušebního zařízení a po průchodu zařízením vráceny zpět do spalínového traktu.

Zařízení je tvořeno ze tří hlavních částí, jedná se o vrchní část reaktoru, skříň reaktoru a spodní část reaktoru. V zařízení se nachází 4 bloky paralelně řazených katalyzátorů, přes které proudí spaliny o objemovém průtoku $1458 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a teplotě $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Katalyzátory jsou čištěny stlačeným vzduchem z ofukovačů. Během průtoku spalin přes spalínové kanály a zkušební zařízení dojde k tlakové ztrátě 197 Pa . Pro pokrytí této ztráty je navržen ventilátor typu CBT-130N od firmy Elektrodesign. Z důvodu vysoké teploty je pro ventilátor navržena konstrukční úprava chlazení ložisek realizována dvojicí chladících kotoučů.

Jednotlivé části jednotky jsou opatřeny měřicími místy pro měření teploty, průtoku a odběr vzorků. Dále je zařízení opatřeno prvky, které slouží k jednodušší přepravě a manipulaci jednotky. Celá zkušební jednotka bude na místě zaizolována, aby nedocházelo k tepelným ztrátám.

Na závěr diplomové práce je provedena hmotnostní bilance zařízení, kdy do katalyzátoru vstupují spaliny známého složení o hmotnostním průtoku $0,223 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Hmotnostní průtok jednotlivých složek na výstupu zůstane nezměněn. Změní se však zastoupení jednotlivých forem rtuti; narůstá množství oxidované rtuti Hg^{2+} na úkor elementární rtuti Hg^0 . Bilance je vytvořena i pro případ, kdy bychom chtěli sledovat aktivitu katalyzátoru vzhledem ke rtuti při současném vstřikování čpavku, tedy redukci NO_x .

15. Seznam použité literatury

- [1] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1973, 595 s.
- [2] KROTLA, Krzysztof a Kurt OREHOVSKY. *Wykorzystanie katalytycznego oczyszczania spalin do redukcji emisji rtęci*. 2013
- [3] STACH, Martin, Zdeněk KLIKA a Lucie BARTOŇOVÁ. *Distribuce a zachytávání rtuti při spalování pevných paliv*. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: Řada hornicko-geologická*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2005, s. 27-42. ISSN 0474-8467
- [4] UNEP. *Global Mercury Assessment* [online]. 2013 [cit. 2014-10-10]. ISBN DTI/1636/GE. Dostupné z: <http://www.unep.org/PDF/PressReleases/GlobalMercuryAssessment2013.pdf>
- [5] ČECH, B. a kol. *Podklady a materiály katedry energetiky pro metody SCR*. 2015
- [6] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2003, 226 s. ISBN 80-708-0517-X.
- [7] FISCHER, Oldřich. *Fyzikální chemie: termodynamika, elektrochemie, kinetika, koloidní soustavy*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1984.
- [8] ZDENA, Zaorálková. *Didaktika chemické kinetiky*. 2000. Dostupné z: <http://cheminfo.chemi.muni.cz/ianua/Zdena/kinetika.pdf>
- [9] *Minamata Convention on Mercury: Text and annexes*. 2013. Dostupné z: www.mercuryconvention.org
- [10] *Minamata Convention on Mercury* [online]. 2015 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: www.mercuryconvention.org
- [11] SLOSS, Lesley. *Legislation, standards and methods for mercury emissions control* [online]. IEA Clean Coal Centre, 2012 [cit. 2015-01-28]. ISBN 978-92-9029-515-0. Dostupné z: <http://bookshop.iea-coal.org/reports/ccc-195/82898>
- [12] PILAŘ a VLČEK. ÚJV ŘEŽ, a. s. *Dopady evropské legislativy v blízké budoucnosti do českého teplárenství*. In: *Optimalizace energetických zdrojů s ohledem na ekologizaci spalin*. II. Ročník odborné konference 6. 11. 2014 [cit. 2015-02-04]

[13] SCR Catalyst. Johnson Matthey: Stationary Emission Control [online]. 2014 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.jmsec.com/cm/products/scr-catalysts.html>

[14] Rtuť a její sloučeniny. Praha, 2007. Dostupné z: http://www.irz.cz/irz/dokumenty/irz/metody_mereni/ovzdusi/rtut_a_jeji_slouceniny.pdf

[15] ČSN EN 13211. Kvalita ovzduší- Stacionární zdroje emisí -Manuální metoda stanovení celkové hmotnostní koncentrace rtuti. Praha: Český normalizační institut, 2002.

[16] Černý, V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL, Praha 1975

[17] Dlouhý, T. Výpočty kotlů a spalinových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005

[18] JIROUT, Tomáš. Hydromechanická zařízení: Potrubí a potrubní sítě. 2010. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz1.pdf>

16. Seznam příloh

Příloha 1. Konstrukční výkres pilotního zařízení

Příloha 2. Výrobní výkres skříně reaktoru

Příloha 3. Kusovník

Příloha 4. CD s DP a výpočty v EES a Excel

Příloha 5. Ventilátorový list