



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

DISTRIBUCE TĚŽKÝCH KOVŮ NA SPALOVNĚ ODPADŮ

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN WASTE INCINERATOR

DIPLMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ANNAMÁRIA POLÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. DAVID JECHA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Annamária Poláková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

Distribuce těžkých kovů na spalovně odpadů

v anglickém jazyce:

Distribution of heavy metals in waste incinerator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Termické zpracování odpadu (komunálního, biologického i nebezpečného) představuje nedílnou součást integrovaného odpadového hospodářství v rámci Evropy, protože se jedná o bezpečnější a účinnější technologii zpracování odpadů v porovnání se skládkováním. Pro minimalizaci dopadů této technologie na životní prostředí je potřebné odstraňovat škodlivé a nežádoucí látky uvolněné během procesu spalování. Tato práce se zabývá vytvořením celkové bilance tuhých znečišťujících látek. Pro tento účel byly jednotlivé měření voleny tak, aby mohla být určena účinnost odstranění znečišťujících látek v každém technologickém aparátu.

Cíle diplomové práce:

Obeznamení se s problematikou čištění spalin ze spaloven odpadů se zaměřením na odstranění těžkých kovů.

Seznámit se s legislativními požadavky na znečišťující látky, které vznikají při termickém zneškodňování odpadů.

Seznámení se s technologií odstraňování znečišťujících složek.

Emisní měření na spalovně odpadů.

Vyhodnocení emisního měření a posouzení reprodukovatelnosti výsledků.

Závěry a doporučení.

Seznam odborné literatury:

W. Strauss: Industrial gas cleaning, 2nd edition, Pergamon Press, Oxford, 1975

Joseph J. Santoleri, Joseph Reynolds and Louis Theodore: "Introduction to Hazardous Waste Incineration", Second Edition, John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-011790-6, 2000)

ČSN ISO 7935 Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace emisí oxidu siřičitého – Charakteristiky automatizovaných měřicích metod

ČSN 83 4741 Měření emisí organických sloučenin - Plamenoionizační metoda pro kontinuální stanovení celkového obsahu organických látek

Zákon 86/2002

Vyhláška MŽP č. 356/2002 Sb.

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Jecha, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne

L.S.

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

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

ABSTRAKT

Hlavnou náplňou práce je popísanie technológií odstraňovania znečisťujúcich látok so zameraním na ťažké kovy. S tým súvisia kapitoly popisujúce vznik znečisťujúcich látok a ich účinok na ľudské zdravie. Práca je zameraná na detailný opis technológie čistenia spalín a jeho vyhodnotenie. Vyhodnotenie je zobrazené v tabuľkách porovnávajúcich meranie emisií na spaľovni odpadov SAKO Brno, a.s. s hodnotami emisných limitov. V práci sú tiež stručne popísané iné možnosti nakladania s komunálnym odpadom.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

čistenie spalín, emisné limity, komunálny odpad, ťažké kovy

ABSTRACT

The main scope of thesis is to describe the pollutant removal techniques with a focus on heavy metals. With that relate chapters describing the formation of pollutants and their effect on human health. The thesis focuses on a detailed description of flue gas cleaning technology and its evaluation. Evaluation is shown in tables comparing emission measurement on waste incineration plant SAKO Brno, a.s. with emission limits. The thesis also briefly describes other options for municipal waste management.

KEY WORDS

flue gas cleaning, emission limits, municipal waste, heavy metals

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

POLÁKOVÁ, A. *Distribuce těžkých kovů na spalovně odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 92 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Jecha, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracovala samostatne a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citovala.

V Brne dňa 29.5. 2014

.....

podpis

POĎAKOVANIE

Rada by som sa poďakovala vedúcemu práce pánovi Ing. Davidovi Jechovi, Ph.D. za umožnenie vypracovania tejto témy ako diplomovej práce, za odborné vedenie, cenné rady a trpezlivosť.

Ďakujem tiež mojej rodine a najbližším, ktorí ma podporovali počas celého štúdia.

Obsah

ZOZNAM SKRATIEK	10
ZOZNAM SYMBOLOV	11
ÚVOD	13
1 SPAĽOVANIE ODPADOV	14
1.1 CHARAKTERISTIKA NEBEZPEČNÉHO ODPADU	14
1.2 STANOVENIE CHARAKTERU KOMUNÁLNEHO ODPADU	15
1.3 NAKLADANIE S ODPADMI	15
1.4 POROVNANIE NAKLADANIA S ODPADMI V ČR A SR	16
1.5 UMIESTNENIE SPAĽOVNE	18
2 TECHNOLOGICKÉ USPORIADANIE SPAĽOVNÍ ODPADU	19
2.1 PREDBEŽNÉ SPRACOVANIE ODPADU	20
2.1.1 <i>Konečná likvidácia odpadu</i>	20
2.2 TEPELNÉ SPRACOVANIE ODPADU	20
2.2.1 <i>Roštové spaľovne</i>	21
2.2.2 <i>Rotačné pece</i>	23
2.2.3 <i>Pece s fluidnými ložami</i>	24
2.2.4 <i>Systémy splyňovania a pyrolýzy</i>	24
2.3 VYUŽITIE ENERGIE	25
2.4 ČISTENIE SPALÍN	25
2.5 NAKLADANIE SO ZVÝŠKAMI Z ČISTENIA SPALÍN	25
2.5.1 <i>Solidifikácia s použitím cementu</i>	25
2.5.2 <i>Zosklovatenie a tavenie zvyškov z čistenia spalín</i>	26
3 SPALINY A HLAVNÉ ZNEČIŠŤUJÚCE LÁTKY VZNIKAJÚCE PRI SPAĽOVANÍ	27
3.1 LEGISLATÍVA TÝKAJÚCA SA EMISÍ ZO SPAĽOVNÍ ODPADOV	27
3.1.1 <i>Referenčný obsah O₂</i>	28
3.2 POROVNANIE EMISNÝCH LIMITOV PLATNÝCH V ČR A SR	28
3.3 PLYNNÉ ZNEČIŠŤUJÚCE ZLOŽKY	29
3.3.1 <i>Oxidy síry – SO_x</i>	29
3.3.2 <i>Oxidy dusíku – NO_x</i>	30
3.3.3 <i>Oxid uhoľnatý</i>	31
3.4 POLYCHLÓROVANÉ DIBENZO- <i>P</i> -DIOXÍNY (PCDD) A DIBENZOFURÁNY (PCDF)	31
3.5 TUHÉ ZNEČIŠŤUJÚCE LÁTKY	32
3.6 ŤAŽKÉ KOVY (ŤK)	32
3.6.1 <i>Olovo</i>	33
3.6.2 <i>Ortuť</i>	33
3.6.3 <i>Kadmium</i>	33
3.6.4 <i>Meď</i>	34
3.7 UHLÍKOVODÍKY	34
3.8 OSTATNÉ	34
4 SPÔSOBY ČISTENIA SPALÍN	35
4.1 MECHANICKÉ ČISTENIE PLYNOV	36
4.1.1 <i>Elektrostatické odlučovače (ESP)</i>	36
4.1.2 <i>Mokrú elektrostatické odlučovače</i>	39
4.1.3 <i>Tkaninové filtre (vrecové resp. hadicové filtre)</i>	40
4.1.4 <i>Odstredivé odlučovače (cyklóny a multicyklóny)</i>	41

4.1.5	<i>Mokrý absorbér (mokrú pračka)</i>	41
4.2	CHEMICKÉ A FYZIKÁLNO-CHEMICKÉ ČISTENIE PLYNOV	43
4.2.1	<i>Technológie na znižovanie emisií kyslých zložiek (SO_x, HCl, HF)</i>	43
4.2.2	<i>Technológie na znižovanie emisií oxidov dusíku</i>	46
4.2.3	<i>Technológie na znižovanie emisií ortuti</i>	50
4.2.4	<i>Technológie na znižovanie emisií ťažkých kovov</i>	50
4.2.5	<i>Technológie na znižovanie emisií CO a nespálených uhľovodíkov</i>	50
4.2.6	<i>Technológie na znižovanie emisií zlúčenín organického uhlíku</i>	51
5	TECHNOLÓGIA SPAĽOVNE SAKO BRNO, A.S.	52
5.1	TRANSPORT ODPADU – RADIAČNÁ OCHRANA A VÁŽENIE	54
5.2	TRANSPORT SPÁLITEĽNÉHO ODPADU	54
5.2.1	<i>Zásobník odpadu</i>	54
5.2.2	<i>Kotly</i>	54
5.2.3	<i>Turbína</i>	55
5.2.4	<i>Chemická úprava vody</i>	55
5.3	ČISTENIE SPALÍN	55
5.4	NAKLADANIE SO ŠKVAROU	56
5.5	MONITORING A KONTROLA EMISÍ	56
5.5.1	<i>Stanovenie meracích bodov v meracom priereze potrubia</i>	56
5.6	STANOVENIE CELKOVÝCH EMISÍ AS, CD, CR, CO, CU, MN, NI, PB, SB, TL A V.....	57
5.7	STANOVENIE EMISÍ ORTUTI.....	59
5.8	ODBER TUHÝCH ZNEČIŠŤUJÚCICH LÁTOK A KOVOV	62
6	BILANCIA ZNEČIŠŤUJÚCICH LÁTOK V SPALINÁCH SPAĽOVNE KOMUNÁLNEHO ODPADU	63
6.1	PREVÁDZKOVÉ PODMIENKY MERANIA.....	63
6.2	MATERIÁLOVÁ BILANCIA SPAĽOVNE	65
6.3	VÝSLEDKY MERANIA	69
6.4	ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV BILANCIE ŤAŽKÝCH KOVOV A OSTATNÝCH ZL V SPALINÁCH	71
6.4.1	<i>Vplyv spaľovania odpadu na distribúciu ťažkých kovov</i>	73
7	ZÁVER	74
	POUŽITÁ LITERATÚRA	75
	ZOZNAM OBRÁZKOV	78
	ZOZNAM TABULIEK	79
	ZOZNAM GRAFOV	79
	ZOZNAM PRÍLOH	79
	PRÍLOHY	80

ZOZNAM SKRATIEK

Skratka	Význam
BTX	benzén, toluén a xylén
CZT	centrálne zásobovanie telom
ČR	Česká republika
DeNOx	Systém odstraňovania oxidov dusíku
EPA	Environmental Protection Agency – Agentúra pre ochranu životného prostredia
ESP	electrostatic precipitator – elektrostatický odlučovač
EÚ	Európska únia
PAH	polycyclic aromatic hydrocarbons – polycyklycké aromatické uhľovodíky
PCB	polychlorované bifenyly
PCDD	polychlorované dibenzo- <i>p</i> -dioxiny
PCDF	polychlorované dibenzofurány
PCDM	polychlorované difenylmetány
POP	perzistentné organické polutanty
PVC	polyvinylchlorid
SCR	Selective Catalytic Reduction – selektívna katalytická redukcia
SNCR	Selective Non-catalytic Reduction – selektívna nekatalytická redukcia
SR	Slovenská republika
S.z.	Sbírka zákonů
TEQ	toxic equivalence
ŤK	ťažké kovy
TZL	tuhé znečisťujúce látky
VOC	Volatile Organic Compound – prchavé organické látky
ZEVO	zariadenie na energetické využitie odpadu
ZKO	zmesový komunálny odpad
ZL	znečisťujúce látky
Z.z.	Zbierka zákonov

ZOZNAM SYMBOLOV

Symbol	Význam	Jednotka
β_{El}	hmotnostná koncentrácia určeného prvku	[mg/m ³]
$\beta_{El,nom}$	celková hmotnostná koncentrácia prvku	[mg/m ³]
C_i	koncentrácia zložky v reálnych spalinách	[-]
$C_{i,ref}$	koncentrácia zložky v referenčných spalinách	[-]
c_{Hg}	celková hmotnostná koncentrácia ortuti v suchom plyne za normálnych stavových podmienok	[mg/m ³]
$c_{Hg,ref, O_2\%}$	celková hmotnostná koncentrácia ortuti v suchom odpadnom plyne po prepočte na vzťažný obsah kyslíku	[mg/m ³]
C_{O_2}	koncentrácia kyslíku v reálnych spalinách	[-]
$C_{O_2,ref}$	koncentrácia kyslíku v referenčných spalinách	[-]
$m_{El,gas}$	celkový obsah určeného prvku v oplachu vedľajšej vetvy vzorkovacej trate a v absorbéroch	[mg]
$m_{El,sol}$	celkový obsah určeného prvku v oplachu hlavnej vetvy vzorkovacej trate a vo filtri	[mg]
m_{filtr}	hmotnosť ortuti na filtri	[mg]
m_{oplach}	hmotnosť ortuti v oplachovom roztoku	[mg]
$\dot{M}_{(1)}$	hmotnostný tok TZL v prúde (1)	[kg/h]
$\dot{M}_{(5)}$	hmotnostný tok TZL v prúde (5)	[kg/h]
$\dot{M}_{(6)}$	hmotnostný tok TZL v prúde (6)	[kg/h]
$\dot{M}_{(6a)}$	20 % hmotnostného toku TZL v prúde (6)	[kg/h]
$\dot{M}_{(6b)}$	80 % hmotnostného toku TZL v prúde (6)	[kg/h]
$\dot{M}_{(7)}$	hmotnostný tok TZL v prúde (7)	[kg/h]
$\dot{M}_{(9)}$	hmotnostný tok TZL v prúde (9)	[kg/h]
\dot{M}_{AC}	hmotnostný tok prídavku aktívneho uhlia do prúdu (1)	[kg/h]
\dot{M}_{HV}	hmotnostný tok prídavku haseného vápna do prúdu (9)	[kg/h]
\dot{M}_{NV}	hmotnostný tok prídavku nehaseného vápna do prúdu (1)	[kg/h]
$\dot{M}_{TK,(0)}$	hmotnostný tok prvku na vstupe do kotla v prúde (0)	[kg/h]
$\dot{M}_{TK,(1)}$	hmotnostný tok prvku na výstupe z kotla v prúde (1)	[kg/h]
$\dot{M}_{TK,(3)}$	hmotnostný tok prvku v škvare v prúde	[kg/h]
$\dot{M}_{TK,(4)}$	hmotnostný tok prvku v odpade z ekonomizéra II v prúde (4)	[kg/h]
O_{meas}	nameraný stredný obsah kyslíku v priebehu odberu vzorky	[-]
$O_{2,meas,dry}$	obsah kyslíku nameraný v spalinách vyjadrený jeho objemovým zlomkom po prepočte na stav suchého plynu	[-]
$O_{2,ref}$	vzťažný obsah kyslíku vyjadrený jeho objemovým zlomkom	[-]
p_0	tlak plynu s obsahom kyslíku za normálnych podmienok	[kPa]
p_{meas}	meraný tlak plynu za meranej teploty	[kPa]
T_0	teplota plynu s obsahom kyslíku za normálnych podmienok	[K]
T_{meas}	meraná teplota za meraného tlaku	[K]
V_0	objem suchého plynu s obsahom kyslíku za normálnych podmienok	[m ³] alebo [l]
V_{hlavni}	celkový objem vzorky, ktorý prešiel hlavnou vetvou vzorkovacej trate po prepočte na stav suchého plynu a normálne stavové podmienky	[m ³]

V_{main}	<i>objem suchého plynu za normálnych podmienok v hlavnej vetve</i>	$[m^3]$ alebo $[l]$
V_{meas}	<i>objem suchého plynu za meranej teploty a tlaku</i>	$[m^3]$ alebo $[l]$
V_{side}	<i>objem suchého plynu za normálnych podmienok vo vedľajšej vetve</i>	$[m^3]$ alebo $[l]$
$V_{vedlejší}$	<i>celkový objem vzorky, ktorý prešiel vedľajšou vetvou vzorkovacej trate po prepočte na stav suchého plynu a normálne stavové podmienky</i>	$[m^3]$

ÚVOD

Spaľovanie odpadov existuje už mnoho rokov ako žiadaný spôsob termickej likvidácie odpadu. SAKO Brno, a.s. uvádza, že s prvou spaľovňou v Českej republike postavenou v roku 1905 započalo obdobie využívania odpadu ako udržateľného zdroja energie. Spaľovňa bola postavená v Brne a ako prvá v Rakúsko-Uhorsku vyrobila elektrickú energiu z odpadu. V tom čase sa však ešte nevedelo o škodlivých látkach obsiahnutých v odpade a o ich distribúcii do ovzdušia, preto v prvej spaľovni neexistoval systém čistenia spalín. Až v roku 1989, po obnovení spaľovne, sa do technológie zaradil aj prvý stupeň čistenia, tzn. zachytenie pevných častíc na elektrostatických odľučovačoch [1]. So zvyšujúcim sa záujmom o životné prostredie sa vyvíjali a zdokonaľovali ďalšie technológie na obmedzenie emisií zo spaľovania.

Ako postupoval vývoj rôznych technológií a poznatkov dopredu, postúpil aj vývoj systémov čistenia spalín. V súčasnosti je v zariadení na energetické využitie odpadu (ďalej iba ZEVO) inštalovaných päť stupňov čistenia, čím sa zabezpečí minimalizácia legislatívou sledovaných škodlivých látok. Množstvo stupňov vyplýva aj z požiadaviek Európskej únie na emisné limity [1]. Zo štatistických údajov je zrejme, že odpadu produkujeme čoraz viac a teda je nutné zvyšovať aj kapacity a počet spaľovacích zariadení, ale na druhej strane sprísiť emisné limity škodlivých znečisťujúcich látok (ZL).

Zdrojov znečistenia ovzdušia (a nie len ovzdušia, ale tak isto vôd a pôdy) je mnoho. Takmer každá ľudská (a do istej miery aj zvieracia) činnosť je zdrojom „odpadu“ (tuhého, kvapalného alebo plyného). Ako ľudia sme zodpovední za stav životného prostredia, a preto je nutné zdokonaľovať technológie na odstránenie tohto odpadu alebo zmenšenie jeho objemu. Existuje istá hierarchia nakladania s odpadom: prvým a najdôležitejším krokom je prevencia, čo znamená predchádzať tvorbe veľkého množstva odpadov. Toto si môžeme predstaviť ako opätovné používanie nákupných tašiek alebo sáčkov na potraviny, ako je ovocie či zelenina, zmenšenie spotreby balených potravín alebo ako plánovanie využitia rôznych druhov produktov (teda aby po ich použití ostalo čo najmenej nevyužitého materiálu). Prvý krok je možno ťažko splniteľný, a tak máme ešte možnosť recyklovania a znovupoužívania odpadu. Recykláciou sa vytriedia rovnaké druhy odpadu (papier, plasty, kovy, sklo, biomasa atď.), ktoré môžu byť následne znovu využité na výrobu rovnakého alebo iného produktu z daného materiálu. Týmto spôsobom sa výrazne znižuje množstvo odpadu, ktorého je nutné sa zbaviť. Ďalšou možnosťou nakladania s odpadom je jeho energetické využitie v ZEVO pre výrobu tepla a/alebo elektriny. Vzhľadom na stálu produkciu odpadu, je táto možnosť najpriateľnejšia. Poslednou možnosťou nakladania s odpadom je skládkovanie. V súčasnosti je to najvyužívanejší spôsob odstránenia odpadu v Českej republike a na Slovensku. Vyplýva to z dôvodu nedostatku ZEVO na území Českej republiky. V snahe zníženia množstva skládkovaného odpadu sa Česká republika zaviazala Európskej únii, že do roku 2025 postaví 11 zariadení na spaľovanie odpadu a výrazne zníži skládkovanie. Tento cieľ je však nedosiahnuteľný.

Táto práca sa zoberá energetickým využitím komunálneho odpadu – stručne približuje technológie a postupy spaľovania a podrobne rozoberá spôsoby čistenia spalín. Pretože po spálení sa odpady menia na spaliny a tuhé zvyšky, je nutné zaoberať sa látkami obsiahnutými v oboch ťahoch. Tuhé zvyšky sa spracovávajú v škarovom hospodárstve a spaliny postupujú do systému čistenia spalín, kde sa odstraňujú všetky druhy znečisťujúcich látok. Práca je zameraná hlavne na distribúciu ťažkých kovov a ich odstránenie zo spalín.

1 SPAĽOVANIE ODPADOV

Spaľovanie odpadov je druh nakladania s odpadom, ktorý má za úlohu znížiť jeho objem a nebezpečnosť a súčasne zachytiť alebo zneškodniť potenciálne škodlivé látky, ktoré sa uvoľňujú počas termickej likvidácie odpadu. Spaľovanie tiež umožňuje následné využitie energie, ktorá vzniká pri spaľovaní nerastných alebo chemických látok obsiahnutých v odpade [2].

Hlavnou podstatou spaľovania odpadu je oxidácia horľavých materiálov, z ktorých je odpad zložený. Sú to hlavne organické látky, minerály a kovy, pričom organické látky budú horieť iba v prípade, ak dosiahnu teplotu vznietenia a dostanú sa do kontaktu s kyslíkom. Skutočné horenie však prebieha v plynnej fáze, keď sa zároveň uvoľňuje energia. Časť tepla zo spaľovania je obsiahnutá vo vzniknutých spalinách a môže byť ďalej využitá [2].

Výhodou spaľovní je efektívne odstránenie odpadu a zníženie potreby jeho skládkovania. Spaľovne však musia byť postavené v určitej vzdialenosti od zdroja odpadu, čím sa znížia náklady na prepravu súvisiace so vzdialenosťou zdroja odpadu od spaľovne. Energia uvoľnená spaľovaním odpadu môže byť ďalej použitá na výrobu elektriny a/alebo tepla a tým výrazne zníži nutnosť využívania energie z fosílnych palív. Jednou z významných vlastností spaľovania je zmenšenie objemu odpadu o 80 až 95 % [3].

Spaľovať je možné komunálny odpad, priemyselný odpad, nebezpečný odpad, nemocničný odpad, čistiarenské kaly a biomasu. V nasledujúcich kapitolách sú charakterizované nebezpečné a komunálne odpady.

1.1 Charakteristika nebezpečného odpadu

Charakteristikou odpadu rozumieme určenie druhu a zloženia odpadu, ktoré má najväčší vplyv na proces spaľovania. Táto charakteristika má vplyv na návrh spaľovacieho procesu a systému kontroly emisií a pomáha zosúladiť druh odpadu s navrhovaným alebo dostupným zariadením. Taktiež zohráva rolu pri určovaní podmienok spaľovania, ktoré sú dôležité pre maximálnu likvidáciu konkrétneho odpadu [4].

Nebezpečný odpad je možné rozdeliť do piatich kategórií:

- odpadné oleje a chlórované oleje,
- horľavé odpady, syntetické organické látky,
- toxické kovy, leptadlá, plechovkové a pokovované odpady,
- výbušné, reaktívne kovy a zlúčeniny,
- soli, kyseliny a zásady [4].

Horľavé odpady pozostávajú hlavne z kontaminovaných rozpúšťadiel. Do tejto kategórie tiež patrí mnoho druhov olejov, pesticídy, zmäkčovadlá, komplexné organické kaly a nešpecifikované chemikálie. Spaľovať sa dajú len spáliteľné odpady a pokiaľ obsahujú ťažké kovy, môžu byť sústredené a odstránené ešte pred spálením odpadu. Ťažké kovy sa pri spaľovaní menia na veľmi jemné častice oxidov kovov a solí kovov, ktoré nemusia byť zachytené systémom kontroly spalín. Vlastnosti spaľovaného odpadu výrazne ovplyvňujú podmienky spaľovania [4]:

- a) odpad plynny, kvapalný alebo tuhý
- b) pomer anorganickej a organickej časti odpadu a ich obsah vody
- c) obsah nebezpečných látok

1.2 Stanovenie charakteru komunálneho odpadu

Zloženie komunálneho odpadu sa stanovuje odberom vzoriek. Odber reprezentatívnej vzorky je náročná činnosť vzhľadom na nehomogenitu odpadu. Jeho zloženie sa navyše mení v priebehu týždňov aj roka a tiež závisí na oblasti, z ktorej sa odpad zväža. Výber vzorky závisí na počte obyvateľov sledovanej oblasti a na požadovanej presnosti výsledkov analýzy [5].

Analýza sa uskutočňuje tak, že sa zväží obsah niekoľkých zberných nádob (zvyčajne 4-6 ks) a vysype sa na rovnú nepriepustnú plochu. Množstvo vzorky by malo byť 200 kg. Pre reprezentatívnosť vzorky je vhodné odoberať nádoby z viacerých miest a vylúčiť tak vplyv špecifických odpadov. Po odbere vzorky nasleduje zrnitostný a látkový rozbor – vzorka sa podrobí sitovej analýze, frakcie sa zväžia a frakcie nad 40 mm sa ďalej ručne triedia na 11 látkových skupín:

- papier a lepenka,
- plastické hmoty,
- sklo,
- kovy Fe,
- kovy biele (Al),
- textil,
- minerálny odpad,
- nebezpečný odpad,
- spáliteľný odpad (koža, guma, korok, drevo),
- bioodpad (kuchynský odpad),
- zvyšok [5].

Na fyzikálno-chemickú analýzu sa odoberajú vzorky s frakciou menšou ako 8 mm. V takýchto vzorkách sa stanovuje:

- spalné teplo a výhrevnosť,
- obsah celkového dusíku,
- obsah ťažkých kovov,
- vlhkosť, spáliteľné látky, uhlík,
- fosfor [5].

1.3 Nakladanie s odpadmi

Pre úplné porozumenie problému s nebezpečným odpadom, je dôležité preskúmať minulosť nakladania s odpadom. V minulosti, hlavne v Spojených štátoch, sa nechával priemysel bez kontroly a regulácie a do 60-tych rokov minulého storočia neexistovala kontrola znečistenia vody a ovzdušia. Technológia na skládkovanie odpadu nebola adekvátna vzhľadom na druh odpadu, ktorý sa na skládku privážal, a preto sa počas druhej svetovej vojny zdravotnícky materiál skládkoval zvlášť. Toto však nevyriešilo problémy nakladania s tekutým odpadom, kalmi a odolnými chemikáliami. Na tento druh odpadu sa využívali jamy, nádrže a kalojemy, ale ani tie nakoniec neboli adekvátnym doplnkom skládkovania. Technológia spaľovania odpadov nebola v tej dobe zvažovaná vzhľadom na vysoké finančné náklady, a z toho dôvodu sa využívali vyššie uvedené finančne menej náročné spôsoby [4].

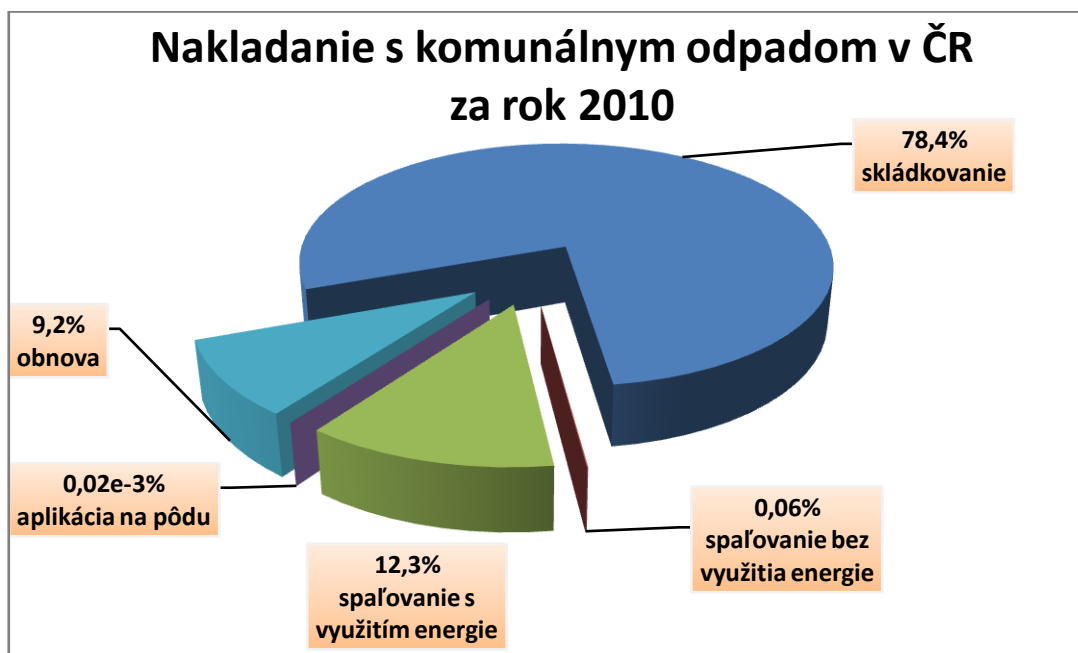
Postupne sa vyvíjali ďalšie techniky nakladania s odpadmi, ktoré sú stručne popísané v nasledujúcom výpise [4]:

- *Spaľovanie* – oxidačná premena spáliteľných materiálov na neškodné plyny, vhodné na vypustenie do atmosféry. Pred vypustením sa musia najprv odstrániť produkty ako sú HCl, SO_x, NO_x a dioxíny (PCDD/F, PCB). Teplo zo spaľovania môže byť niekedy znovu použité a prípadne musí byť pridaný materiál na zaistenie adekvátneho spaľovania. Tuhé zvyšky, ako je popol, sú skládkované.
- *Rozptýlenie do súvislých vodných útvarov* – v minulosti najviac využívaný spôsob, ktorý Agentúra pre ochranu životného prostredia (EPA) obmedzila v mnohých podnikoch. Obvykle sa odpad skladuje v kalojemoch, čím sa minimalizuje dopad na životné prostredie. Pred vypustením do rieky je prepad kalojemov vedený cez čističku odpadových vôd, kde sa kyseliny a zásady neutralizujú a nerozpustné látky sa môžu usadiť.
- *Kalajemy* – môžu byť použité ako dočasné alebo trvalé skládky. Trvalými skládkami sa stávajú, keď pevné látky nemajú tendenciu sa usadzovať.
- *Sanitárne skládky* – to sa týka materiálov, ktoré sa dajú ľahko kontrolovať a nie sú nebezpečné pre životné prostredie.
- *Chemické skládky* – sú rozšírením sanitárnych skládok ako riešenie nakladania s nebezpečným odpadom.
- *Podzemné skladovanie* – pri tomto spôsobe sa pevný materiál rozmixuje na suspenziu a dávkuje sa do podzemných dutín. EPA však odmieta takéto praktiky.

V súčasnej dobe existuje v Tichom oceáne medzi Kaliforniou a Havajom najväčšia neoficiálna (nelegálna) oceánska skládka, tzv. „Ostrov odpadkov“. Hromadí sa tu hlavne plastový odpad, ktorý ohrozuje morský život.

1.4 Porovnanie nakladania s odpadmi v ČR a SR

Nakladanie s odpadmi je v Českej republike dané Zákonom č. 185/2001 Sb., o odpadech a zmene niektorých ďalších zákonů a na Slovensku Zákonom č. 223/2001 Z.z., o odpadoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov. obr. 1.1 a obr. 1.2 znázorňujú porovnanie nakladania s odpadmi v ČR a SR. Najviac sa využíva skládkovanie z dôvodu nedostatku spaľovacích zariadení v oboch štátoch. Pre názornosť produkcie množstva odpadu populáciou je uvedený obr. 1.3, ktorý ukazuje množstvo odpadu vyprodukovaného jednou osobou za rok v rozpätí rokov 2006 až 2012.

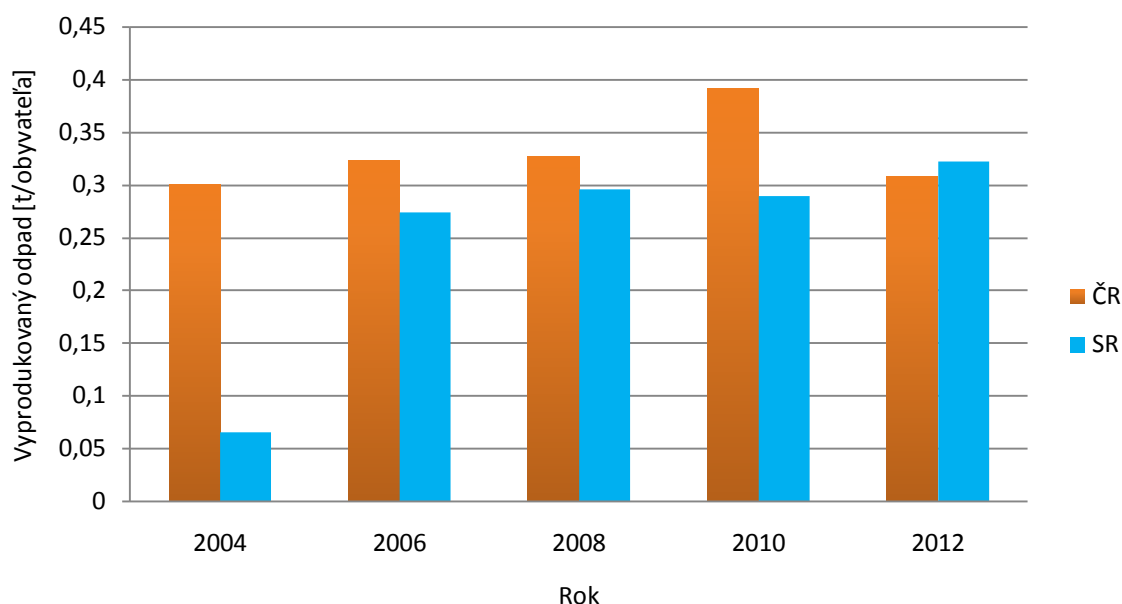


Obr. 1.1 Nakladanie s komunálnym odpadom v Českej republike za rok 2010 [6]



Obr. 1.2 Nakladanie s komunálnym odpadom v Slovenskej republike za rok 2010 [6]

Produkcia ZKO v ČR a SR v uvedených rokoch v prepočte na jedného obyvateľa



Obr. 1.3 Produkcia zmesového komunálneho odpadu v uvedených rokoch v prepočte na jedného obyvateľa a rok [6],[7]

1.5 Umiestnenie spaľovne

Umiestnenie spaľovne výrazne závisí na sociálno-ekonomickom a environmentálnom hľadisku, ako aj na postoji verejnosti voči spaľovaciemu zariadeniu. Ekonomické hľadisko zahŕňa náklady spojené s inštaláciou a prevádzkou spaľovne, transportom a triedením nebezpečného odpadu a s nákladmi na jeho likvidáciu. Ekonomická stránka projektu vybudovania spaľovne ďalej obsahuje náklady spojené s prispôbením miesta na prevádzku spaľovne, ako je vybudovanie prístupových ciest, riešenie problémov s vodou, pôdou a kalmi, topografické modifikácie, estetické spracovanie, atď. [4].

V laickej verejnosti všeobecne prevládajú obavy zo spaľovní. Hlavným dôvodom sú mylné informácie o fungovaní takéhoto zariadenia. Obyvatelia sa obávajú prílišného hluku, zápachu a hlavne znečistenia prostredia v okolí spaľovne.

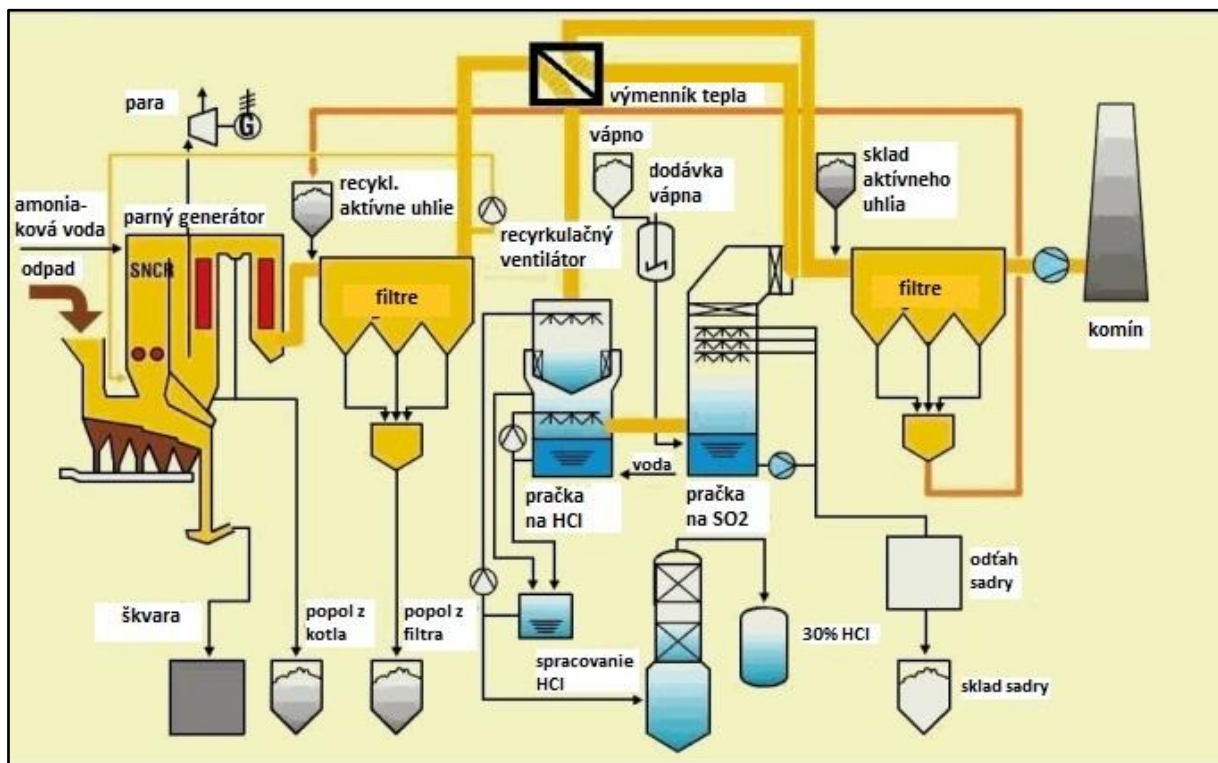
Je úlohou podnikov a vlády, aby presvedčili verejnosť o nutnosti umiestnenia spaľovacieho zariadenia a o vykonaní potrebných krokov na zabezpečenie ľudského zdravia. Tiež je potrebné, aby presvedčili verejnosť o tom, že takéto zariadenie nenaruší životné prostredie, ani nebude významne prispievať k nepohodliu obyvateľov bývajúcich v blízkosti spaľovne. Tieto postupy sú dnes známe ako environmentálna spravodlivosť [4].

2 TECHNOLOGICKÉ USPORIADANIE SPAĽOVNÍ ODPADU

Technológia spaľovania je rôzna pre rôzne spaľovne. Každá spaľovňa využíva vlastný spôsob procesu, pri ktorom kombinuje požadované typy zariadení. Vo všeobecnosti však technológia spaľovania zahŕňa nasledujúce operácie:

- príjem vstupujúceho odpadu,
- skladovanie odpadu a surovín,
- predbežné spracovanie odpadu,
- nakládka odpadu do procesu,
- tepelné spracovanie odpadu,
- využitie energie (napr. v kotle) a konverzia tepelnej energie na výrobu pary,
- čistenie spalín,
- nakladanie so zvyškami z čistenia spalín,
- vypúšťanie spalín,
- monitoring a kontrola emisií,
- čistenie a kontrola odpadných vôd odchádzajúcich z procesu,
- nakladanie a spracovanie popola resp. lôžkového popola,
- vypúšťanie resp. odstránenie tuhých zvyškov [2].

Každý stupeň je prispôsobený druhu odpadu, ktorý sa v zariadení upravuje [2].



Obr. 2.1 Schéma technologickeho usporiadania spaľovne [8]

Na obr. 2.1 je proces spaľovania odpadu znázornený vľavo. Na túto časť nadväzuje výroba pary, ktorá je predávaná do turbínovej sústavy. Najväčšiu časť obrázku tvorí systém čistenia spalín a využitia ich tepla vo výmenníku. Očistené a ochladené spaliny odchádzajú z procesu cez komín znázornený vpravo na obrázku. V nasledujúcich kapitolách sú popísané kľúčové technologické prvky procesu.

2.1 Predbežné spracovanie odpadu

Odpad prichádza do spaľovne ako zmes rôznych objektov – môže obsahovať bežné materiály, ako je sklo, plasty, papier z komunálneho odpadu, ale tak isto môže obsahovať aj ťažké kovy, organické látky, či iné chemické zlúčeniny. Tento odpad sa vytriedi podľa veľkosti, rozdrví, alebo sa zmenší jeho objem, čo sa vo všeobecnosti nazýva predčistenie.

Predčistenie znamená fyzikálny, termický, chemický alebo biologický proces, ktorý zahŕňa triedenie. Proces musí zmeniť charakter odpadu. Ďalej musí zmenšiť objem odpadu, redukovať jeho nebezpečnosť, uľahčiť manipuláciu s ním a zlepšiť jeho energetickú využiteľnosť [9]. Uvedené procesy sú stručne popísané v nasledujúcich podkapitolách.

Chemické predčistenie – nebezpečný odpad sa ošetruje chemickým predčistením, čo znamená, že nebezpečné látky sa z odpadu vytriedia pomocou chemických reakcií. Sú to napríklad reakcie kalcinácie (žihania), katalýzy, elektrolýzy, hydrolýzy, oxidácie, redukcie, neutralizácie a ďalších.

Biologické predčistenie – biologické predčistenie je principiálne založené na chemických reakciách ako je to v prípade chemického predčistenia, avšak v tomto prípade reakcie prebiehajú v telách mikroorganizmov alebo v ich blízkom okolí. Tento druh predčistenia sa využíva hlavne kvôli rozkladu organických komponentov obsiahnutých v odpade. Najčastejšími používanými biologickými procesmi sú aktivovanie kalu, sýtené kalojemy, anaeróbný rozklad, kompostovanie atď. [4].

Fyzikálne predčistenie – v tomto prípade sa pre čistenie nebezpečného odpadu využívajú fyzikálne princípy ako je sedimentácia, filtrácia, slnečné odparovanie, destilácia, kryštalizácia atp. V zásade môžeme fyzikálne predčistenie rozdeliť do dvoch kategórií: fázová separácia a zložková separácia [4].

Fázová separácia má za úlohu redukovať objem odpadu a koncentrovať nebezpečný odpad do jednej fázy pred jeho ďalším oštrením. Na druhej strane zložková separácia odstraňuje príslušné ióny alebo molekuly látky bez použitia chemikálií [4].

2.1.1 Konečná likvidácia odpadu

Konečná likvidácia znamená odstránenie odpadu iným spôsobom ako spaľovaním. Je zrejmé, že spaľovaním nie je možné odstrániť celé množstvo vyprodukovaného odpadu, a preto sa likviduje aj pomocou skládok, aplikácie na poľnohospodársku pôdu a vstrekaním do hlbokých studní.

2.2 Tepelné spracovanie odpadu

V súčasnej dobe sa využíva spaľovanie hmoty na pohyblivom rošte, pričom dizajn systému musí čo najviac brániť vzniku znečisťujúcich látok, obzvlášť oxidov dusíku (NO_x) a organických zložiek ako sú dioxíny [3].

Spaľovací systém, resp. stupeň tepelného spracovania sa pri rôznych druhoch odpadov uplatňuje rôznym spôsobom, čo znamená, že nie všetky tepelné spracovania sú vhodné pre všetky odpady. Najviac používané spôsoby sú vymenované nižšie:

- roštové spaľovne odpadov,
- rotačné pece,
- pece s fluidnými ložami,
- systémy pyrolýzy a splyňovania [2].

Tuhé komunálne odpady – ich výhodou je tuhé skupenstvo, pretože môžu byť spaľované v rôznych typoch zariadení, napr. v pohyblivých roštoch, rotačných peciach a fluidných ložiach [2].

Čistiarenské kaly – po úprave sušením sa spaľujú v rotačných peciach, nístejových peciach a v peciach s fluidným ložom. Uplatňuje sa však aj spoluspaľovanie s uhlím v spaľovacích roštových systémoch a priemyslových procesoch [2].

Nebezpečné a zdravotnícke odpady – pri spaľovaní sa najviac využívajú rotačné pece, v prípade tuhých odpadov to sú tiež roštové spaľovne a pre niektoré vopred upravené materiály spaľovne s fluidnými ložami. V chemických zariadeniach, tam kde odpady vznikajú, sú tiež veľmi rozšírené statické pece [2].

Hlavné stupne procesu spaľovania:

1. **Sušenie a odplynenie** – prebieha pri teplotách 100-300 °C, kedy sa odparí prchavý obsah ako je voda a uhlíkovodíky. Pri sušení a odplynení nie je potrebný prídavok oxidačných činidiel. Proces je závislý iba na dodávke tepla [2].
2. **Pyrolýza a splyňovanie** – pyrolýza je rozklad organických látok za neprítomnosti oxidačného činidla prebiehajúci pri teplote asi 250-700 °C. Splyňovanie je reakcia uhlíkatých zvyškov s vodnou parou a CO₂ pri teplote 500-1000 °C. Okrem vysokej teploty sa reakcie zúčastňuje aj voda, para a kyslík [2].
3. **Oxidácia** – v predchádzajúcich stupňoch vznikli horľavé plyny, ktoré oxidujú v závislosti na vybranej metóde spaľovania. Teplota spalín sa pritom pohybuje v rozmedzí medzi 800 až 1450 °C [2].

2.2.1 Roštové spaľovne

Roštové spaľovne sú najviac využívaným druhom spaľovní na spaľovanie zmesového komunálneho odpadu. Ich súčasťou je podávacie zariadenie, spaľovací rošt, výsypka ložového popola, systém prívodu spaľovacieho vzduchu, spaľovacia komora a pomocné horáky [2].

Podávacie zariadenie podáva odpad uskladnený v bunkri do násypky a potom na roštový systém, ktorý presúva odpad cez rôzne zóny spaľovacej komory pomocou prevaľovania. Plniaca násypka zabezpečí nepretržitú dodávku odpadu do procesu [2].

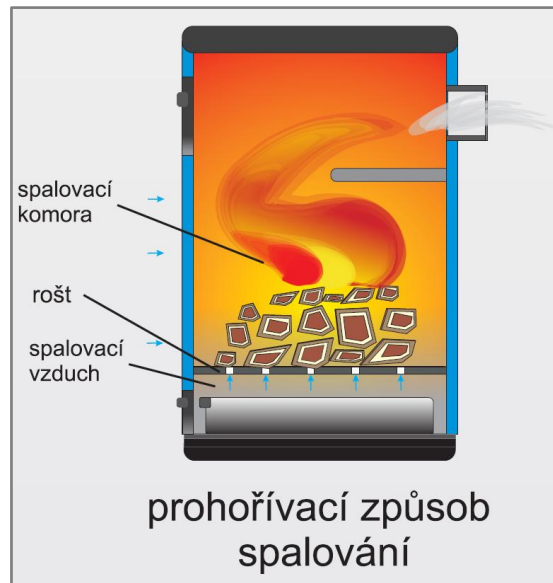
Spaľovací rošt dopravuje materiál k spáleniu v peci a distribuuje spaľovací vzduch do pece podľa požiadaviek spaľovania. Vzduch sa privádza z primárneho dúchadla cez vrstvu malých otvorov v rošte [2].

Po spálení odpadu ostáva na rošte tuhý zvyšok, ktorý je odstránený pomocou výsyvky ložového popola. Výsyпка tiež slúži ako vzduchový uzáver pece a na chladenie a zvlhčenie popola.

Samotné spaľovanie prebieha nad roštom spaľovacej komory. Rošt je umiestnený na dne komory a prídavné vyhrievanie kotla je situované v strope zariadenia.

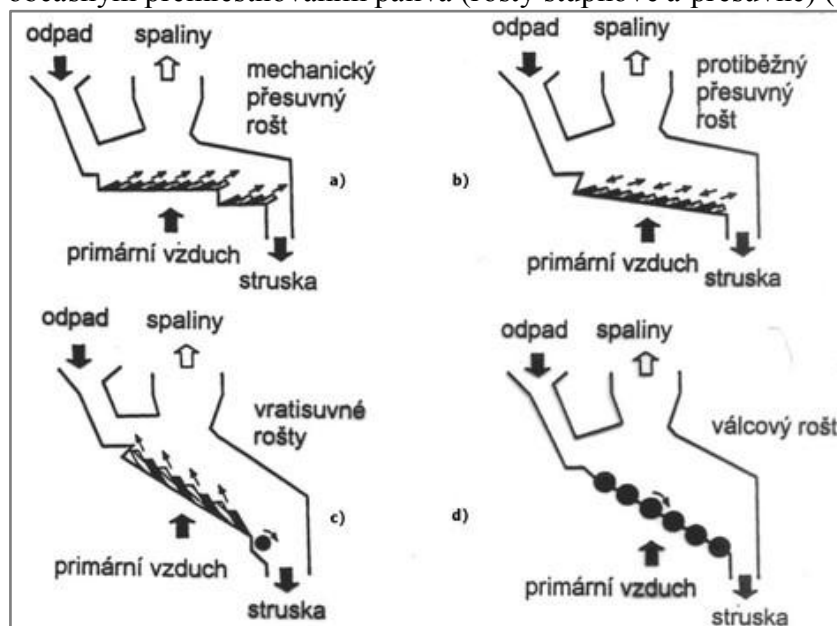
Podľa spôsobu premiestňovania paliva v roštovom ohnisku rozoznávame [10]:

- rošty s nehybnou vrstvou paliva (pevné rošty) (obr. 2.2),



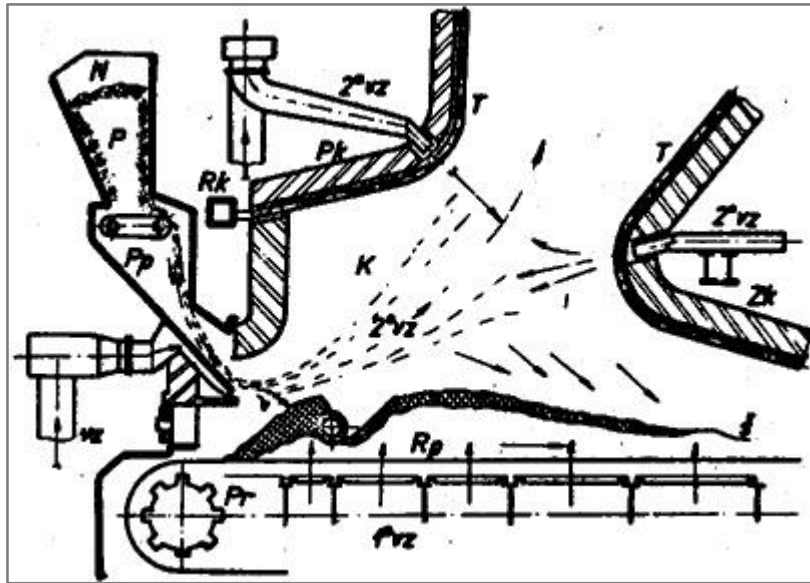
Obr. 2.2 Pevný rošt [10]

- rošty s občasným premiestňovaním paliva (rošty stupňové a presuvné) (obr. 2.3),



Obr. 2.3 Rošty stupňové a presuvné [10]

- rošty s trvalým premiestňovaním paliva (rošty pásové a reťazové) (obr. 2.4).

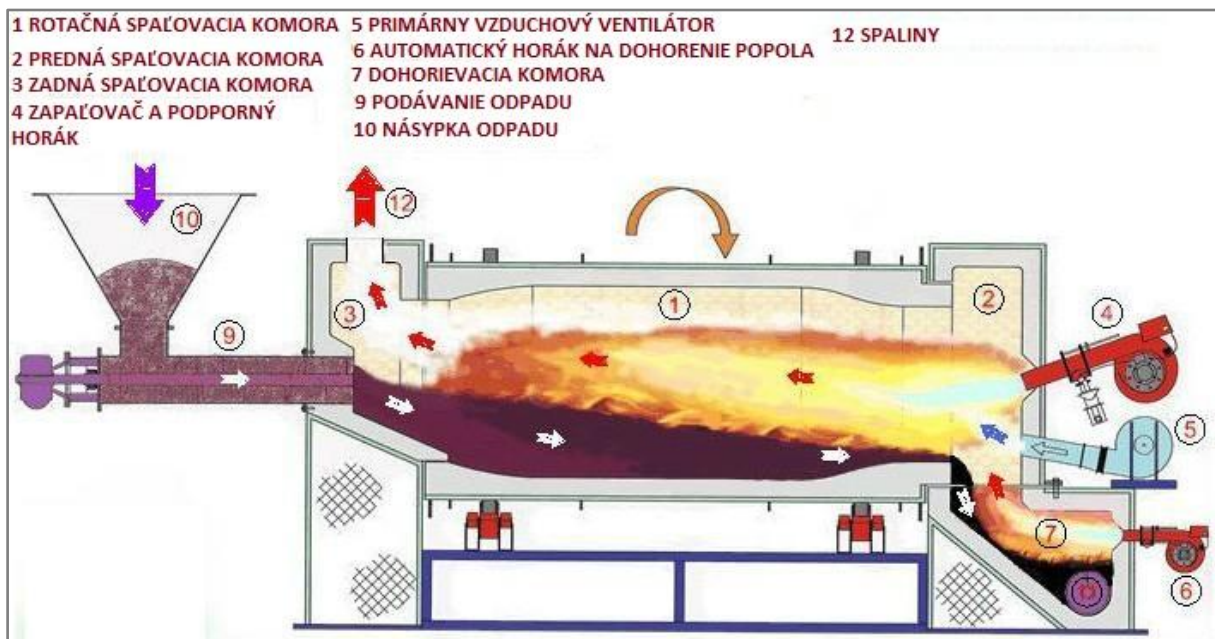


Obr. 2.4 Pásový rošt [11]

2.2.2 Rotačné pece

Rotačné pece sú rozmerné zariadenia a možno v nich spaľovať takmer každý druh odpadu. Najviac sa využívajú na spaľovanie nebezpečného odpadu. Prevádzkové teploty sa pohybujú v rozmedzí 500 °C (splyňovanie) až 1450 °C (vysokoteplotné tavenie popola) [2].

Rotačná pec je tvorená valcovou nádobou naklonenou pozdĺž vodorovnej osi. Otáčavý alebo oscilačný pohyb zabezpečujú valčeky, na ktorých je pec umiestnená. Odpad sa posúva v peci pôsobením gravitácie pri rotácii. Obvykle je v peci zaradená aj dohoriavacia komora, aby sa zvýšilo odbúranie toxických zlúčenín. Tento proces je znázornený na obr. 2.5 [2].



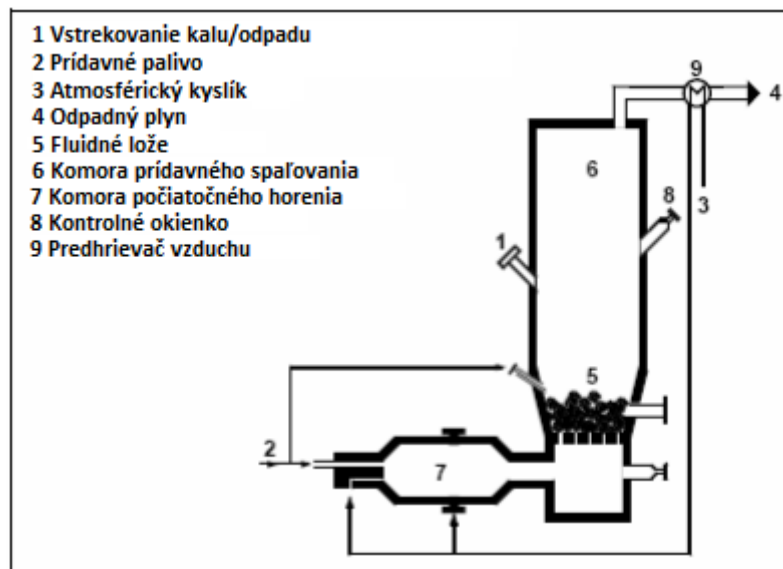
Obr. 2.5 Rotačná pec [12]

2.2.3 Pece s fluidnými ložami

Spaľovne s fluidnými ložami sú používané na spaľovanie rozptýleného odpadu, napr. paliva z odpadov a čistiarenských kalov [2]. Kotle pracujú na princípe spaľovania paliva vo fluidnej vrstve. To znamená, že pevné látky sa udržiavajú vo vznose prúdom tekutiny. Fluidná vrstva tvorí disperzný systém, ktorý sa vytvára prietokom plynu cez vrstvu častíc nasypných na pórovité dno – fluidný rošt. Fluidnú vrstvu tvorí palivo, odsírovacie aditívum (väčšinou vápenec) a aditívum pre stabilitu vrstvy (inertný materiál – piesok alebo popol). Zjednodušené znázornenie fluidnej pece je na obr. 2.6 [10].

Výhody fluidného spaľovania [10]:

- Možnosť dávkovania vápenca do kotla, za účelom odsírenia spalín (účinnosť 40-95 %) – fluidné kotle nepotrebujú vybudované odsírovacie zariadenie za kotlom.
- Nízke teploty vo fluidnej vrstve a odstupňovaný prívod vzduchu do ohniska – redukcia NO_x v spalínach.
- Vo fluidných kotloch možno spaľovať aj menej hodnotné palivá a odpady s veľmi nízkou výhrevnosťou.
- Spaľovanie prebieha s vyšším zaťažením roštovej plochy oproti klasickým roštovým kotlom – menšie rozmery roštu
- Nižšia komínová strata vďaka nižšej teplote odsírených spalín na konci kotla (v dôsledku nižšieho rosného bodu). Účinnosť kotlov býva pri menovitých parametroch 92-94 %.



Obr. 2.6 Fluidná pec (stacionárna) [2]

2.2.4 Systémy splyňovania a pyrolýzy

Splyňovanie je proces, pri ktorom sa odpad čiastočne spaľuje za vzniku horľavých plynov a tie ďalej slúžia ako surovina alebo palivo. Prebieha pri teplotách 800-1300 °C. Pre splyňovanie je dôležité, aby povaha odpadu zodpovedala určitým vopred definovaným limitom, čo znamená napr. špecifickú predbežnú úpravu. V porovnaní s bežným spaľovaním splyňovanie dáva menší objem plynu než je objem spalín pri spaľovaní, prevažuje tvorba CO nad CO_2 a tuhé zvyšky sa akumulujú vo forme strusky [2].

Pyrolýza je odplynovanie odpadu za neprítomnosti kyslíku pri teplotách 450-750 °C. Behom procesu vzniká pyrolýzny plyn a tuhý koks [2]. Pri pyrolýze sa ťažké kovy sústreďujú na pevné uhlíkaté zvyšky, čím sa vyplavujú z procesu jednoduchšie ako z popola po spálení nebezpečných odpadov.

2.3 Využitie energie

Hlavnou výhodou spaľovania tuhého odpadu je možnosť využitia odpadu ako paliva pre výrobu energie. Spaliny nesúce energiu uvoľnenú v spaľovacej peci musia byť ochladené v kotle pred systémom kontroly znečistenia. Kotol je dôležitou súčasťou systému obnovy energie, avšak typ použitého kotla závisí na tom, ako bude energia využitá [3].

Kotol má v spaľovniach odpadu dve funkcie, ktoré spolu súvisia:

- ochladzuje spaliny,
- prevádza teplo zo spalín do iného média, obvykle vody, ktoré vnútri kotla mení skupenstvo na paru [2].

2.4 Čistenie spalín

Spaľovanie komunálneho odpadu produkuje veľké množstvo spalín, ktoré obsahujú zvyšky z nedokonalého spálenia a širokú škálu znečisťujúcich látok. Druh a koncentrácia znečisťujúcich látok závisia na zložení spaľovaného odpadu a na podmienkach spaľovacieho procesu. Výber systému čistenia spalín závisí na aktuálnych emisných normách a limitoch [3], na objeme spalín a koncentrácii ZL v spalinách.

Čistenie spalín je dôležitou súčasťou spaľovacieho procesu, pretože je nevyhnutné odstrániť zo spalín čo najväčšie množstvo nebezpečných a znečisťujúcich látok. Podrobnejšie informácie o zariadeniach na čistenie spalín sú uvedené v kapitole 4.

2.5 Nakladanie so zvyškami z čistenia spalín

2.5.1 Solidifikácia s použitím cementu

Solidifikácia je mechanický proces premieňajúci sypký alebo kvapalný materiál na pevný materiál, kedy sa škodlivé látky uzatvárajú do monolitckej, mechanicky odolnej a obmedzene priepustnej štruktúry. Pri solidifikácii sa využívajú aditíva a spojivá na odstránenie škodlivých látok.

Zvyšky sa zmiešajú s minerálnymi alebo hydraulickými spojivami, aditívami regulujúcimi vlastnosti cementu a s dostatkom vody, ktorá zabezpečí, že po naviazaní cementu budú prebiehať hydratačné reakcie. Zvyšky sa týmto spôsobom vtlačia do cementovej matrice. Stuhnutý produkt sa buď skládkuje na povrchu alebo v podzemných zariadeniach. Výhodou solidifikácie pomocou cementu je znížený kontakt zvyškov s vodou, jednoduché nakladanie so stuhnutým produktom a nízke riziko prášenia [2].

Prínosom tejto metódy pre životné prostredie sú nasledujúce výhody:

- znížený kontakt medzi vodou a zvyškami,
- relatívne jednoduché nakladanie so stuhnutým produktom a veľmi nízke riziko prášenia,
- nízke riziko uvoľnenia ťažkých kovov z produktov [2].

2.5.2 Zosklovanie a tavenie zvyškov z čistenia spalín

Zosklovaním a tavením sa uvoľňujú prchavé prvky, ako sú ortuť, olovo a zinok. Princípom procesu je tavenie zvyškov napr. v elektrických taviacich systémoch inšpirovaných vysokými pecami používanými vo výrobe železa a ocele. K taveným zvyškom sa pridávajú špecifické aditíva, ktoré podporujú sklenú alebo kryštalickú maticu [2].

Výhody pre životné prostredie sú tieto:

- produkty zosklovania a tavenia majú obvykle veľmi dobré vylúhovacie vlastnosti,
- zosklovanie dáva zvyčajne najstabilnejšie a husté produkty,
- v procese sa zničia organické zlúčeniny, ako sú dioxíny [2].

3 SPALINY A HLAVNÉ ZNEČISŤUJÚCE LÁTKY VZNIKAJÚCE PRI SPAĽOVANÍ

Spaliny z ohnísk kotlov obsahujú vo všeobecnosti plyny a pary vzniknuté dokonalým alebo nedokonalým spaľovaním paliva, inertné zložky spaľovacieho vzduchu (pasívne zúčastnené), nadstechiometrický prebytok vzduchu, ktorý sa do reakcie priviedol vo vyššom množstve ako je jeho teoretická spotreba, a zvyšky po spaľovaní palív. Zloženie plynných zložiek závisí na zložení spáliteľných zložiek paliva alebo popoloviny, na dokonalosti priebehu spaľovania a na teplote horenia [13].

V plynnej časti spalín sa nachádza oxid uhličitý, ktorý vznikol spálením uhlíku alebo rozkladom uhličitanov z popolovín a bol privedený spaľovacím vzduchom. Ďalej plynná časť obsahuje kyslík zo zvyšku prebytočného spaľovacieho vzduchu, oxidy síry - SO_2 a SO_3 vzniknuté spálením síry obsiahnutej v palive a rozkladom síranov v popolovínach, dusík z paliva, uvoľnený spálením horľaviny a dusík zo spaľovacieho vzduchu, pričom niekedy sa dusík oxiduje až na oxidy dusíku. Pri nedokonalom spaľovaní sa v spalínach objaví aj oxid uhoľnatý, uhl'ovodíky a vodík. Vodná para vzniká odparením vody z paliva, spaľovaním vodíku a uhl'ovodíkov a z vlhkosti spaľovacieho vzduchu [13]. Podľa druhu a zloženia paliva môžu spaliny obsahovať aj ďalšie nebezpečné látky, ako sú ťažké kovy (Hg, Pb, As, Cu, Ni, Cd, Cr, Mn), perzistentné organické polutanty (POP), ktoré sa dlhodobo nerozkladajú a hromadia sa v živých organizmoch (polychlórované bifenyly (PCB), polychlórované dibenzo-*p*-dioxíny (PCDD), polychlórované dibenzofurány (PCDF)) a organické zlúčeniny ako polycyklické aromatické uhl'ovodíky (PAH).

Tuhé zložky spalín sú obsiahnuté hlavne v spalínach z tuhých palív a môžu byť podľa teploty v troch fázach [13]:

- a) Tuhá fáza – struskový aerosól, škvarové zrná alebo popolový prach.
- b) Kvapalná fáza – tekutá struska.
- c) Pary – zlúčeniny sodíku, draslíku a fosforu.

Tuhé zložky tvoria nánosy na výhrevných plochách, čím sa znižuje prestup tepla, spôsobujú eróziu kovových častí výhrevných plôch, spalínovodov a lopatiek spalínových ventilátorov.

3.1 Legislatíva týkajúca sa emisií zo spaľovní odpadov

Emisné limity sú všeobecne prísnejšie pre veľké zariadenia, ktoré majú lepšie podmienky pre optimalizáciu spaľovacieho procesu a väčšiu ekonomickú dostupnosť sekundárnych opatrení pre znižovanie emisií. Emisné limity sa vzťahujú na normálne stavové podmienky (101 315 Pa, 0 °C) a suchý plyn a sú dané Vyhláškou č. 415/2012 Sb. o prípustné úrovni znečisťovania a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Tieto limity všetkých sledovaných znečisťujúcich látok sú uvedené v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Emisné limity ZL pre Českú republiku [14]

Znečisťujúca látka	Emisný limit [mg/m_N³]
TZL	10
HCl	10
HF	1
SO ₂	50
NO _x	200
CO	50
Cd + Tl a ich zlúčeniny	0,05
Hg a jej zlúčeniny	0,05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V a ich zlúčeniny	0,5
PCDD/PCDF	0,1 ng TEQ/m _N ³

3.1.1 Referenčný obsah O₂

Niektoré koncentrácie znečisťujúcich látok v koncových plynoch sú prepočítavané na tzv. referenčný obsah kyslíku v nosnom plyne pomocou vzťahu (3.1).

$$C_{i,ref} = C_i \cdot \frac{21 - C_{O_2,ref}}{21 - C_{O_2}} \quad (3.1)$$

C_i – koncentrácia zložky v reálnych spalinách

$C_{i,ref}$ – koncentrácia zložky v referenčných spalinách

C_{O_2} – koncentrácia kyslíku v reálnych spalinách

$C_{O_2,ref}$ – koncentrácia kyslíku v referenčných spalinách (pre spaľovne odpadov je hodnota zmluvne stanovená $C_{O_2,ref} = 11$ % obj., prepočítava sa iba v prípade, že obsah kyslíku v spalinách je vyšší ako 11 %)

3.2 Porovnanie emisných limitov platných v ČR a SR

Tak ako Česká republika aj Slovensko sa muselo prispôbiť emisným limitom nariadeným Európskou úniou. Na Slovensku emisné limity stanovuje Vyhláška č. 410/2012 Z. z., Vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky, ktorou sa vykonávajú niektoré ustanovenia zákona o ovzduší a sú uvedené v tab. 3.2. Tým, že sa oba štáty prispôbili požiadavkám EÚ, majú rovnaké emisné limity pre dané znečisťujúce látky.

Tab. 3.2 Emisné limity ZL pre Slovensko [15]

Znečisťujúca látka	Emisný limit [mg/m³]
TZL	10
HCl	10
HF	1
SO ₂	50
NO _x	200
CO	50
Cd + Tl a ich zlúčeniny	0,05
Hg a jej zlúčeniny	0,05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V a ich zlúčeniny	0,5
PCDD/PCDF	0,1 ng TEQ/m ³

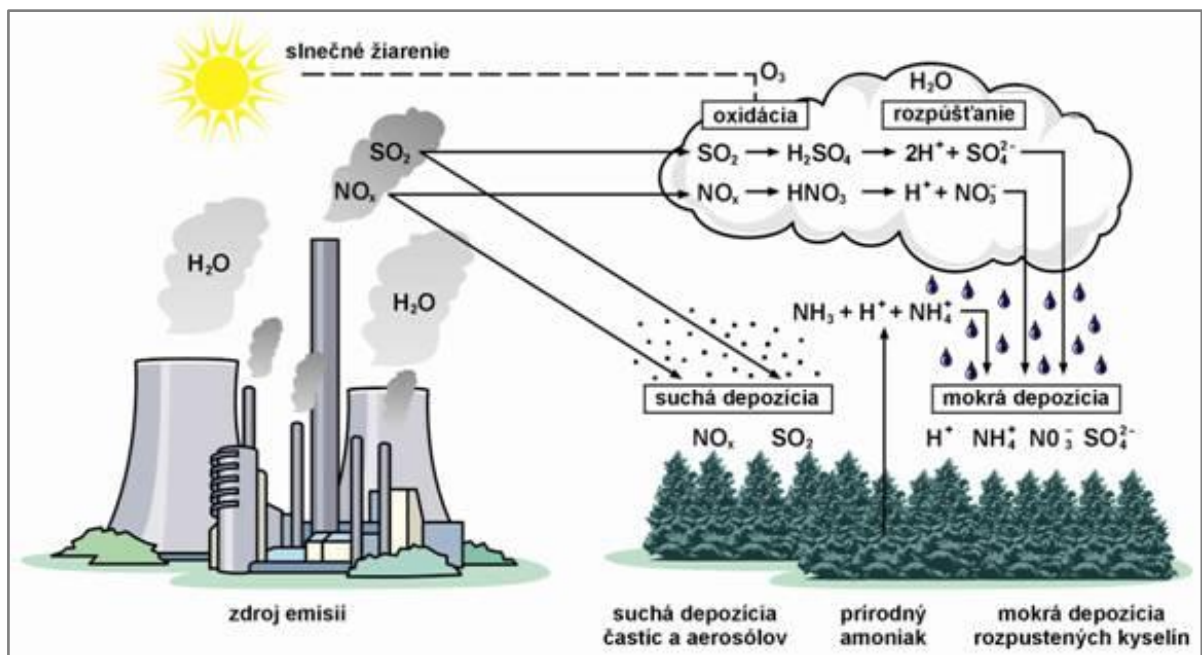
3.3 Plynné znečisťujúce zložky

3.3.1 Oxidy síry – SO_x

Oxid siričitý (SO₂) je bezfarebný, nehorľavý plyn ostrého štipľavého zápachu. Vzniká pri spaľovaní materiálu obsahujúceho síru ako dôsledok reakcie s kyslíkom. Ďalším pôsobením kyslíku prechádza až na oxid sírový (SO₃). Oba oxidy v styku so vzdušnou vlhkosťou vytvárajú kyseliny, ktoré sú hlavnou príčinou kyslých dažďov [16]. Proces tvorby kyslých dažďov je znázornený na obr. 3.1.

Oxidy síry sa vyskytujú predovšetkým v emisiách zo spaľovní hnedého uhlia a v zásade sa nachádzajú v emisiách spaľovacích procesov, kde je prítomná síra. Problematickým zdrojom emisií oxidov síry bývajú lokálne vykurovacie zariadenia na hnedé uhlie alebo lignit. Veľké mestá sa s týmto problémom vysporiadali prechodom z kúrenia hnedým uhlím na iné zdroje, avšak problémom stále ostávajú lokálne zdroje emisií v malých obciach [17].

Oxid siričitý vo vysokých koncentráciách dráždi dýchacie cesty a očné spojivky a pri vdychovaní spôsobuje zúženie priedušiek. Koncentrácia SO₂ v množstve 2600-2700 µg/m³ spôsobuje klinické zmeny spojené s bronchospazmou u astmatikov. V prípade krátkodobej expozície vysokým koncentráciám v kombinácii s dlhodobým vystavením sa nižším koncentráciám sa môže vyvinúť chronická bronchitída, a to najmä u fajčiarov cigariet. Všeobecne najviac ohrození sú obyvatelia trpiaci astmou a starší ľudia [16],[17].



Obr. 3.1 Proces tvorby kyslých dažďov [18]

3.3.2 Oxidy dusíku – NO_x

Oxidy dusíku sú plyny a označujú sa NO_x, pretože vznikajú rôzne zlúčeniny podľa počtu atómov dusíku a kyslíku: oxid dusný (N₂O), oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO₂), atď. [19].

Vznik určitého oxidu dusíku je závislý na reakčnej teplote, ako je uvedené v tab. 3.3. Sú významnými znečisťovateľmi ovzdušia a spolu s prchavými organickými látkami a ultrafialovým žiarením sa podieľajú na vzniku prízemného ozónu [17].

Z prízemného ozónu vzniká tzv. letný fotochemický smog, ktorého hlavnou príčinou sú emisie z dopravy. Ďalším veľkým zdrojom emisií oxidov dusíku sú spaliny zo spaľovacích procesov, predovšetkým veľkých zdrojov [17].

Z hľadiska pôsobenia na ľudské zdravie je najnebezpečnejší NO₂, pretože veľmi ľahko preniká do pľúc vďaka jeho malej rozpustnosti vo vode. Hlavným toxickým účinkom oxidu dusičitého je dráždenie sliznice. Pri otravách zmesami oxidu dusíku je nebezpečné dlhodobé vystavenie sa účinkom, ktoré sa prejavia pálením očí, poklesom krvného tlaku, bolesťami hlavy a dýchacími problémami až po niekoľkých hodinách. Chronické prejavy otravy sú častejšia a väčšia kazovosť zubov, zápal spojiviek atď. Oxidy dusíku sú nebezpečné hlavne pre deti a citlivých jedincov alebo ľudí s astmatickými problémami [17].

Tab. 3.3 Vplyv reakčnej teploty na vznik oxidov dusíku

Reakčná teplota	NO _x	Spôsob vzniku
>1425 °C	NO	Promptné – jeho množstvo stúpa s teplotou
1125 - 1425 °C	NO ₂	Termické – jeho množstvo stúpa s teplotou a dostupnosťou kyslíku
875 – 1125 °C	N ₂ O	Palivové – rozhodujúca je veľkosť prebytku vzduchu a množstvo dusíku v palive

3.3.3 Oxid uhoľnatý

Oxid uhoľnatý je plyn bez farby, zápachu a chuti, ktorý vzniká pri nedokonalom spaľovaní látok obsahujúcich uhlík v spojení s kyslíkom zo spaľovacieho vzduchu a ako produkt niektorých priemyslových a biologických procesov. Emisie z dopravy a spaľovacích procesov sú hlavným zdrojom oxidu uhoľnatého [17], [19].

Oxid uhoľnatý pôsobí na srdce, cievny a nervový systém. Do ľudského organizmu sa dostáva len vdychovaním a pri nízkych koncentráciách môže zdravý človek pociťovať únavu. Pri vyšších koncentráciách spôsobuje poruchy videnia a koordinácie, bolesti hlavy, závrate, zmätočné správanie a človek môže pociťovať žalúdočnú nevoľnosť. CO je tiež veľmi nebezpečný z dôvodu, že sa viaže na červené krvinky a obmedzí ich schopnosť prenášať kyslík, čo má za následok rýchle udusenie človeka. Pri koncentrácii nad 1,28 % CO vo vzduchu dôjde k smrti otravou behom 1-2 minút [17], [19].

3.4 Polychlórované dibenzo-*p*-dioxíny (PCDD) a dibenzofurány (PCDF)

Tieto dve skupiny obsahujúce 210 chemických látok sa súhrnne nazývajú dioxíny a sú považované za vysoko toxické látky. Svojimi fyzikálno-chemickými vlastnosťami sa radia medzi typické perzistentné organické látky. Sú to bezfarebné zlúčeniny, zle rozpustné vo vode, v tukoch a v organických zlúčeninách podobných tukom. Len ťažko reagujú s inými zlúčeninami, majú vysoký bod rozpustnosti a varu a pomaly sa odparujú. Ich stabilita sa udáva až do teploty 700 °C. Tieto vlastnosti sú dôvodom, prečo sa najčastejšie nachádzajú v tukových tkanivách. Dioxíny sú kontaminantmi globálneho ekosystému, pretože napríklad v jazerách a vodných tokoch sa viažu na usadeniny a môžu takto pretrvať aj stovky rokov. Následne sa ukladajú v tkanivách zvierat a tak sa dostanú do potravinového reťazca človeka. Nebezpečná je preto konzumácia kontaminovaného mäsa, rýb, vajec, mlieka a tukov. V pôde sa dioxíny viažu podobne ako vo vode a v ovzduší sa viažu na sadzu a popolčeky [20],[21].

V súčasnosti je známe, že 98 % dioxínov vzniká ľudskou činnosťou a zvyšok je výsledkom prírodných udalostí, ako sú lesné požiare alebo výbuchy sopiek. Medzi hlavné zdroje dioxínov, ktoré vznikli priemyselnou činnosťou, patrí papiernický a oceľiarsky priemysel. Ďalej vznikajú ako vedľajšie produkty spaľovacích procesov (spaľovanie komunálneho a nemocničného odpadu obsahujúceho veľké množstvo polyvinylchloridu (PVC) a chemického priemyslu za prítomnosti chlóru, pri kúrení tuhým palivom, cestnej doprave a pri tavení a čistení kovov [20],[21].

Dlhodobé vystavenie účinkom dioxínov a polychlorovaných bifenílov vedie k poškodeniu imunitného a nervového systému, ďalej k zmenám endokrinného systému (najmä štítnej žľazy) a reprodukčných funkcií. Podľa niektorých štúdií pôsobenie dioxínov má za následok zníženie inteligencie, schopnosti sústrediť sa a vplyv na správanie, hlavne u detí sa tak prejavuje hyperaktivita. Naj závažnejšími negatívnymi účinkami dioxínov sú ich karcinogénne účinky a preukázali sa aj ich teratogénne účinky (poškodzovanie nenarodeného plodu v tele matky, pričom pôsobia na nevyvinuté orgány) [17],[20].

3.5 Tuhé znečisťujúce látky

Tuhé znečisťujúce látky (ďalej len TZL) sú spolu s plynými a kvapalnými látkami hlavnými znečisťovateľmi životného prostredia. Pod pojmom TZL sa rozumejú častice znečisťujúcej látky ľubovoľného tvaru, štruktúry alebo hustoty rozptýlené v plynnej fáze, zjednodušene nazývané prach. Spravidla sa delia na dve hlavné skupiny [22],[23]:

- *hrubé častice* – pevné častice s veľkosťou $\leq 10 \mu\text{m}$ (veľkosť menšia ako hrúbka ľudského vlasu). Takto veľké častice sa ľahko dostávajú do pľúc, kde sa usadia a neskôr tak môžu vyvolať zdravotné problémy v srdcovo-cievnej a dýchacej sústave. Zdrojom hrubých častíc sú hlavne zvířený prach z ciest priemyselných podnikov, výfukové plyny z motorových vozidiel a menej významným zdrojom je spaľovanie tuhých látok.
- *jemné častice* – pevné častice s veľkosťou $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (veľkosť zistiteľná len elektrónovým mikroskopom). Zdrojmi produkcie jemných častíc sú všetky spaľovacie procesy, vrátane spaľovania dreva v domácnostiach, lesných požiarov. Ďalšími zdrojmi sú elektrárne, poľnohospodárske procesy, automobilová doprava atď. Pri inhalácii spôsobujú jemné častice dýchacie problémy.

TZL tiež možno rozdeliť na:

- popoloviny unesené prúdom spalín zo spaľovacej komory,
- aerosóly z reakcií medzi draslíkom alebo sodíkom a chlóróm alebo sírou (soli),
- sadze z nedokonalého spálenia – skladajú sa hlavne z uhlíku, ich tvorba je spôsobená lokálnym nedostatkom kyslíku pre spálenie,
- decht z nedokonalého spaľovania tvorený skondenzovanými ťažkými uhlíkovodíkmi.

3.6 Ťažké kovy (ŤK)

Ťažké kovy patria medzi základné znečisťujúce látky. Do tejto skupiny patria hlavne kovy a metaloidy s mernou hmotnosťou prvkov väčšou ako 4 g/cm^3 , čo je asi 60 kovov. Medzi najznámejšie patria: olovo, ortuť, kadmium, chróm, zinok, mangán, nikel, cín a volfrám [24]. Emisie s obsahom ťažkých kovov sú veľmi nebezpečné hlavne kvôli nepriaznivým účinkom na zdravie ľudí, zvierat a rastlín.

Zdrojmi emisií ťažkých kovov sú najmä [25]:

- ťažba a spracovanie polymetalických rúd
- spaľovanie odpadov, uhlia v tepelných elektrárnach, hutníctve
- domové kúrenie
- kaly z čistiarní odpadových vôd
- fungicídy
- spaľovacie motory – doprava

3.6.1 Olovo

Olovo je sivomodrý, mäkký, ťažný a dobre tvarovateľný kov. V prírode je väčšinou viazaný v zlúčeninách. Olovo sa používa na výrobu akumulátorov, pridáva sa do skla, rôznych zliatin a spájok. Najvýznamnejším producentom olova je sklársky priemysel, elektrotechnický priemysel, chemický a strojársky priemysel. Olovo sa v minulosti používalo do náterových hmôt, z ktorých sa môže uvoľňovať, a tiež ako aditívum do pohonných hmôt v podobe terametylolova a tetraetylolova [17].

Je známe, že olovo negatívne vplyva na zdravie ľudí. Do tela sa vstrebáva hlavne pľúcami, a tiež tráviacim ústrojenstvom. V tele človeka ovplyvňuje krvotvorný a nervový systém, obličky, imunitné mechanizmy, tráviaci a reprodukčný systém. Vo vyšších dávkach sa hromadí v kostiach, obličkách a pečeni. Bolo dokázané, že trvalá expozícia nízkym dávkam olova vedie k poruchám správania u detí a k zníženiu inteligencie [17].

3.6.2 Ortuť

Ortuť je striebrosivý kov. Elementárna je v tekutom stave a takto sa vyskytuje len veľmi vzácnne. Najčastejšie je obsiahnutá v mineráloch a fosílnych palivách. Zdrojom ortuti tak nie sú len prevádzky priamo vyrábajúce ortuť ale aj spaľovne fosílnych palív, odpadov, hutné a koksárenské prevádzky alebo krematóriá. Najväčším zdrojom úniku ortuti do životného prostredia ostáva chemický priemysel, kde sa ortuť používa na výrobu alkalických hydroxidov a chlóru [17].

Ortuť je veľmi toxická látka, vplyvom ktorej dochádza k zničeniu či porušeniu štruktúry bielkovín. Do ľudského tela sa dostáva vdychovaním, tráviacim traktom a difúziou pokožkou. Pary dráždia dýchacie cesty, človek pociťuje pálenie na hrudi a v bruchu, črevné problémy. Ortuť ďalej spôsobuje poruchy centrálnej nervovej sústavy, podráždenosť, bolesti hlavy, zúbdlivosť, únavu, triašku rúk, vypadávanie zubov, nechutenstvo, kašeľ, poruchy obličiek a pečene a v najhoršom prípade smrť [17].

3.6.3 Kadmium

Kadmium je biely kov podobný zinku. Uplatňuje sa ako prísada do rôznych zliatin, na výrobu galvanických článkov, v jadrových elektrárňach, ako antikoročný materiál a využíva sa tiež ako stabilizátor pri výrobe plastov. So sírou vytvára sulfid kademnatý, čo je žltý prášok používaný ako farbivo [17].

Kadmium sa do tela môže dostať niekoľkými cestami. Napríklad vdýchnutím s malými časticami prachu alebo cez tráviaci trakt pri prehltnutí hlienov. Kadmium má veľkú schopnosť vstrebávať sa a má dlhý polčas rozpadu v ľudskom tele. Pri jeho pôsobení sú najviac zasiahnuté obličky, v ktorých sa hromadí, a pečeň. V pečeni je viazané najväčšie množstvo kadmia, vďaka čomu už nemôže negatívne pôsobiť na organizmus. V krvi však aj naďalej koluje nepatrné množstvo, ktoré je nebezpečné pre vyvíjajúci sa plod. Kadmium tiež dokáže vytesniť zinok z rôznych enzýmov a tým narušiť metabolické pochody. Akútne otravy sú veľmi vážne, pretože spôsobujú zvýšenie krvného tlaku, zlyhanie obličiek a rozklad červených krviniek [17].

3.6.4 Med'

Med' je načervenalý kujný kov s výbornou elektrickou a tepelnou vodivosťou. Veľmi dobre sa spracováva a odoláva atmosférickej korózii. Vďaka svojim vlastnostiam sa široko uplatňuje najmä v elektrotechnike (ako elektrický vodič) alebo ako súčasť mnohých zliatin (napr. bronzu alebo mosadzi). Jej odolnosť voči korózii sa využíva pri výrobe strešných krytín, odkvapov, ale tiež trubiek pre rozvod vody a niektorých technických plynov [17].

Med' je odolná voči korózii vďaka reakcii atmosférickej vlhkosti a oxidu uhličitého s povrchom medi, pričom vzniká vrstvička nazelenalého a zásaditého uhličitanu meďnatého (tzv. medenka), ktorý chráni med' proti ďalšej korózii [17].

Med' je stopovým prvkom, čo znamená, že je dôležitá pre živé organizmy. Avšak vysoký príjem medi môže viesť k poškodeniu pečene a obličiek alebo k anémii. Extrémne vysoké dávky môžu zapríčiniť až smrť. Po vdýchnutí medeného prachu vo vzduchu môže dôjsť k podráždeniu očí a nosu, prípadne k bolesti hlavy, otupenosti a hnačke. Vdychovanie prachu spôsobuje tiež ochorenie, ktoré príznakmi pripomína chrípku [17].

3.7 Uhl'ovodíky

Vznikajú ako medziprodukt pri konverzii uhlíku a vodíku z paliva na CO_2 a H_2O . To je spôsobené nízkou teplotou spalín a nedostatočným zdržaním na tejto teplote alebo nedostupnosťou potrebného kyslíku. Patria sem PAH, prchavé organické zlúčeniny (VOC) a metán (CH_4).

Uhl'ovodíky ako organické zlúčeniny spolu s oxidmi dusíku podporujú tvorbu ozónu a niektoré zlúčeniny uhl'ovodíkov sú rakovinotvorné. Spôsobujú zápaly slizníc, bolesti hlavy a nevoľnosť a zvýšená koncentrácia ozónu vo vzduchu poškodzuje vegetáciu [19].

3.8 Ostatné

Ďalšími, nemenej významnými polutantami zo spaľovní odpadov, sú kyslé zložky, ako HCl a HF , ktoré vznikajú reakciou chlóru alebo fluóru s vodíkom a amoniak, ktorý môže v malom množstve vznikáť za veľmi nízkych teplôt ako medzistupeň pri tvorbe NO_x . Je to z dôvodu, že sa čpavok používa ako činidlo na znižovanie emisií. Atmosférickými reakciami medzi oxidom uhoľnatým, metánom, prchavými organickými zlúčeninami a oxidom dusíku vzniká nepriamo ozón, ktorý prispieva k oslabovaniu ochrannej atmosféry Zeme (tzv. ozónové diery).

4 SPÔSOBY ČISTENIA SPALÍN

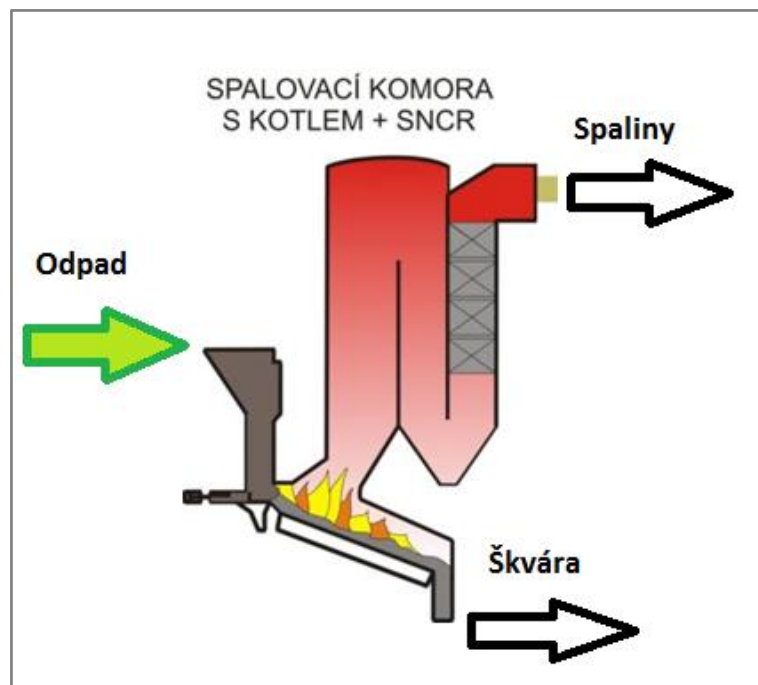
Jedným z hlavných problémov spojených so všetkými typmi spaľovania odpadov sú emisie vzdušných polutantov, ktoré sú popísané v predošlej kapitole. Množstvo emisií závisí na chemickom zložení odpadu, na type spaľovacieho zariadenia, vybavení kontroly znečisťovania vzduchu a na prevádzkových parametroch spaľovacieho systému [4].

Systémy čistenia spalín sú zostavené ako kombinácia jednotlivých procesných jednotiek, ktoré spoločne vytvárajú úplný systém na čistenie znečisťujúcich látok nachádzajúcich sa v spalinách [2].

Znížiť emisie z veľkých spaľovacích zariadení je možné rôznymi spôsobmi, avšak všeobecne delíme opatrenia na dve kategórie, a to na primárne a sekundárne [26]:

Primárne opatrenia (obr. 4.1)

Primárne opatrenia zahŕňajú integrované opatrenia, ktoré zamedzia tvorbu emisií. To znamená, že pred samotným vznikom spalín a následných emisií je možno ovplyvniť dodávku paliva a modifikovať spaľovací proces. V prípade dodávky paliva sa dá uvažovať o možnosti voľby využitia palív s nižším obsahom síry, dusíku, uhlíku, ortuti, atď. Modifikácia spaľovania znamená, že sa do procesu pridávajú aditíva podporujúce úplné spálenie. Aditíva možno tiež využiť ako primárne opatrenia na zníženie emisií prachu, SO_2 , NO_x a špecifických stopových prvkov v palive. Modifikovať možno aj horáky, spaľovací vzduch, výkon a spaľovanie vnútri ohniska [26].

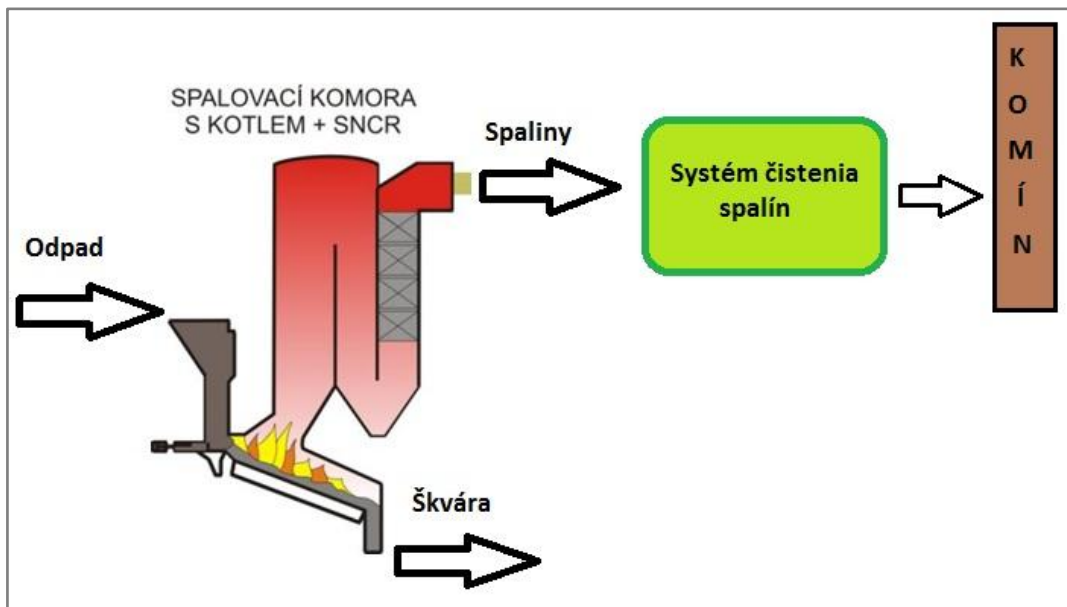


Obr. 4.1 Primárne opatrenia

Sekundárne opatrenia (obr. 4.2)

Sekundárne opatrenia zahŕňajú koncové čistenie, teda redukciu emisií do ovzdušia, vody a pôdy [26]. Sekundárnymi opatreniami sa podrobne zaoberá táto kapitola. Spôsoby čistenia spalín sa delia na základe použitých technológií nasledovne:

- Mechanické čistenie plynov
 - suché čistenie (účinkom gravitačnej sily, zmenou hybnosti, odstred'ovanie, filtrácia, elektrostatické odlučovače)
 - mokré čistenie (sprchové veže, penové, prúdové, vírnikové, hladinové odlučovače, mokré cyklóny, odstredivé pračky)
- Fyzikálno-chemické čistenie plynov
 - mokré
 - polosuché
 - suché



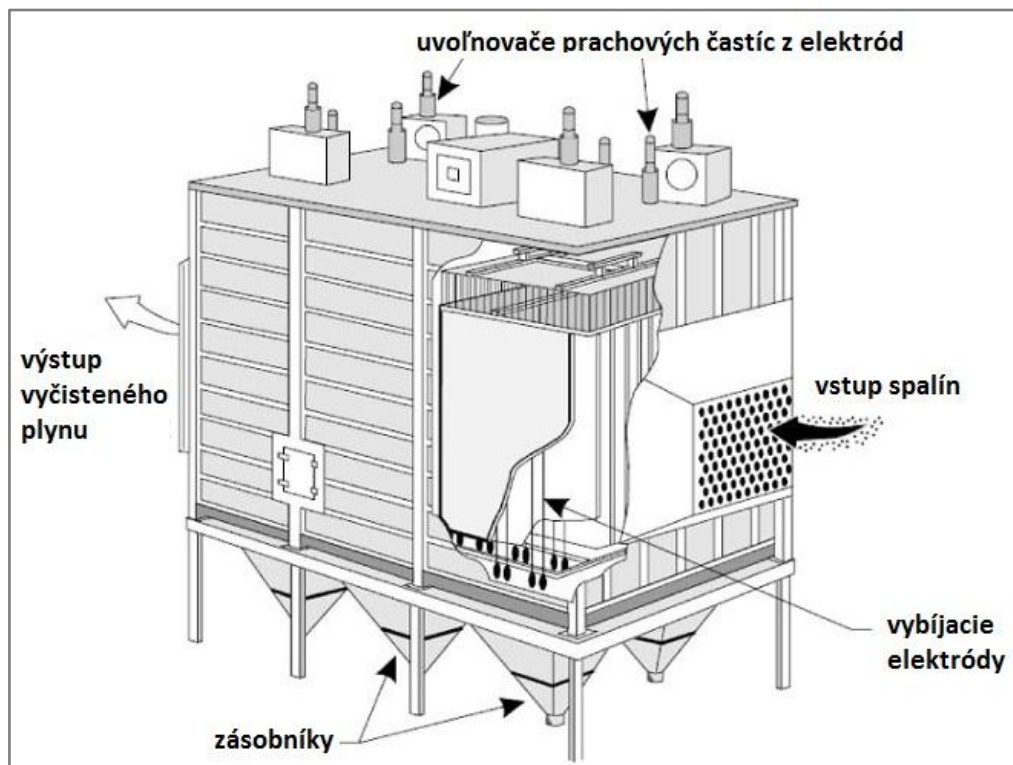
Obr. 4.2 Sekundárne opatrenia

4.1 Mechanické čistenie plynov

4.1.1 Elektrostatické odlučovače (ESP)

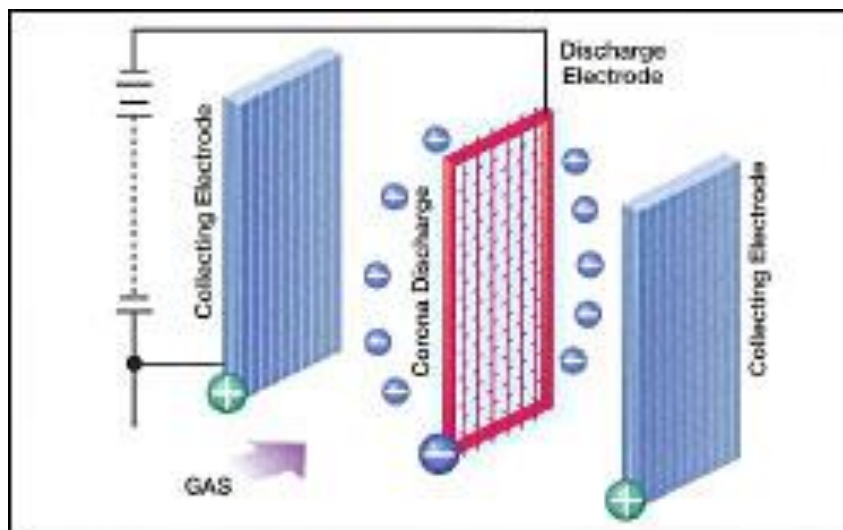
Elektrostatické odlučovače, ktoré vidno na obr. 4.3 sa často využívajú vo veľkých spaľovacích zariadeniach na odstránenie tuhých častíc z prúdu spalín a sú prevádzkovateľné v širokom rozmedzí teplotných a tlakových podmienok a zaťaženia prachom. Nie sú zvlášť citlivé na veľkosť častíc a zachytávajú prach za mokrých aj suchých podmienok. Účinnosť odstránenia popolčeku je najviac ovplyvnená merným elektrickým odporom popolčeku, ktorý závisí na zložení odpadu. To znamená, že odpor vrstvy popolčeku sa môže meniť rýchlo a výrazne spolu so zmenami zloženia odpadu. Síra prítomná v odpade a v spalínach v podobe SO_2 znižuje elektrický odpor vrstvy popolčeku a tým uľahčuje jeho usadzovanie v elektrickom poli. Prevádzkové teploty ESP sú 160-260 °C (vyššie teploty by mohli spôsobiť tvorbu PCDD/F) [2],[26].

Merný odpor prachu je zvlášť dôležitý. Ak je príliš nízky, častice, ktoré dosiahnu povrch zbernej elektródy, strácajú svoj náboj a môžu byť opätovne strhnuté do prúdu spalín. Keď má prach príliš vysoký merný odpor, vytvára sa na elektróde izolačná vrstva, ktorá zabraňuje výboju koróny, čím sa zníži účinnosť odlučovania [26].



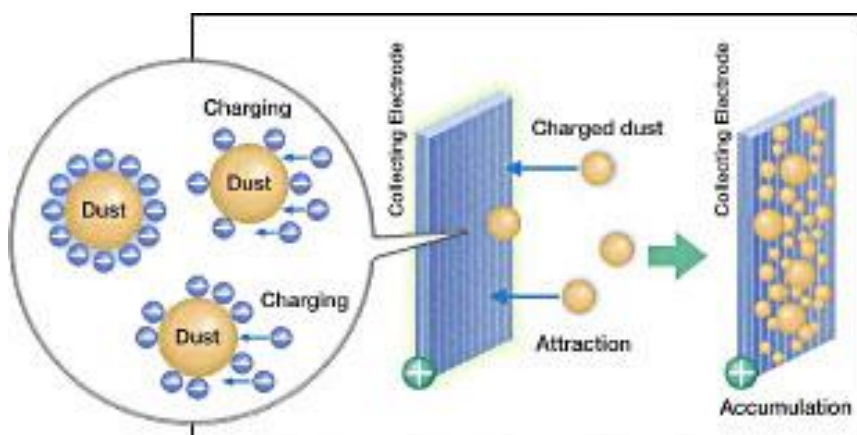
Obr. 4.3 Zariadenie elektrostatického odlučovača [27]

Elektrostatický odlučovač je na spodnej strane vybavený výsypkou (zásobníkom na odlúčené častice) a priechodmi, ktorými prúdia spaliny. V strede každého priechodu sú umiestnené elektródy pod vysokým napätím (obr. 4.3). Jednosmerný prúd zabezpečuje transformátor alebo sada usmerňovačov (T/R). Medzi elektródami sa vytvára elektrické pole vyvolané malým jednosmerným prúdom s vysokým napätím (100kV) (obr. 4.4). Privedené vysoké napätie ionizuje molekuly plynu tesne pri povrchu elektród, čím vzniká viditeľná koróna. Pri priechode znečistených spalín priestorom medzi uzemnenými elektródami dochádza ku kolízii prachových častíc s negatívne nabitými plynovými molekulami, ktoré sa zachytávajú na povrchu častíc popolčeka (obr. 4.5). Takto nabitý prach sa pohybuje ku zberným elektródam pôsobením Coulombovej sily. Tento pohyb je sprevádzaný elektrostatickou agregáciou častíc, čo znamená, že nabitá častica priľne k zbernej prachovej elektróde (obr. 4.6). Dosky sa periodicky čistia oklepovým systémom, aby sa uvoľnila vrstva a nahromadený materiál sa zhrnul do výsypiek popolčeka [26].



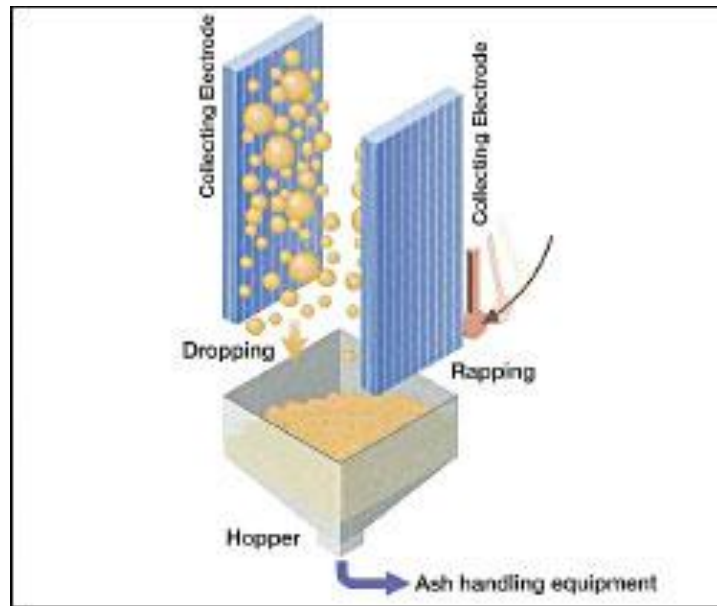
Obr. 4.4 Prvá fáza elektrostatického odľučovania TZL – nabíjanie elektród [28]

Pozn.: collecting electrode – zberná elektróda, corona discharge – výbojová koróna, discharge electrode – vybíjacia elektróda, gas - spaliny



Obr. 4.5 Druhá fáza elektrostatického odľučovania TZL [28]

Pozn.: dust – prach, charging – nabíjanie, attraction – priťahovanie, charged dust – nabitý prach, accumulation - akumulácia

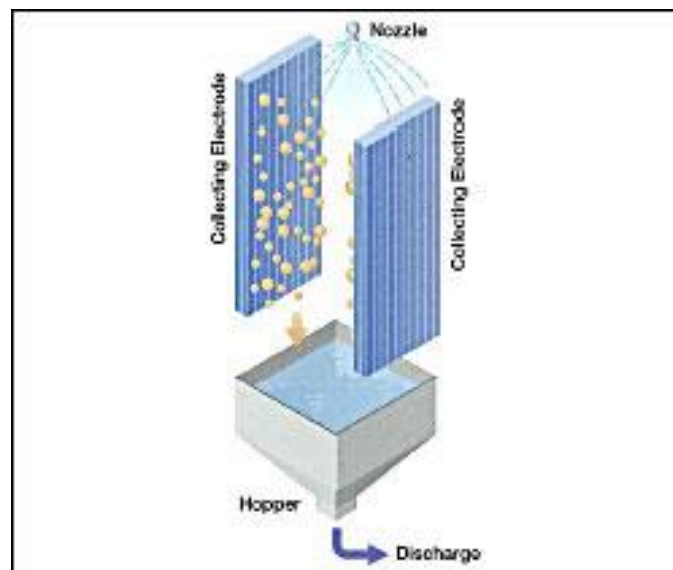


Obr. 4.6 Posledná fáza elektrostatického odľučovania TZL [28]

Pozn.: dropping – opadávanie, rapping – uvoľňovanie prachových častíc, hopper - zásobník

4.1.2 Mokrý elektrostatický odľučovač

Mokrý elektrostatický odľučovač pracujú na rovnakom princípe ako suché ESP, s tým rozdielom, že pri odstraňovaní vrstvy prachu zo zberných elektród sa používa kvapalina (obvykle voda). Tá periodicky alebo nepretržite omýva povrch dosiek, ako je vidno na obr. 4.7. Táto technológia sa používa v prípade vlhkých alebo ochladených spalín [26].



Obr. 4.7 Princíp mokrého elektrostatického odľučovača [28]

Pozn.: nozzle – hrdlo, discharge - odtok

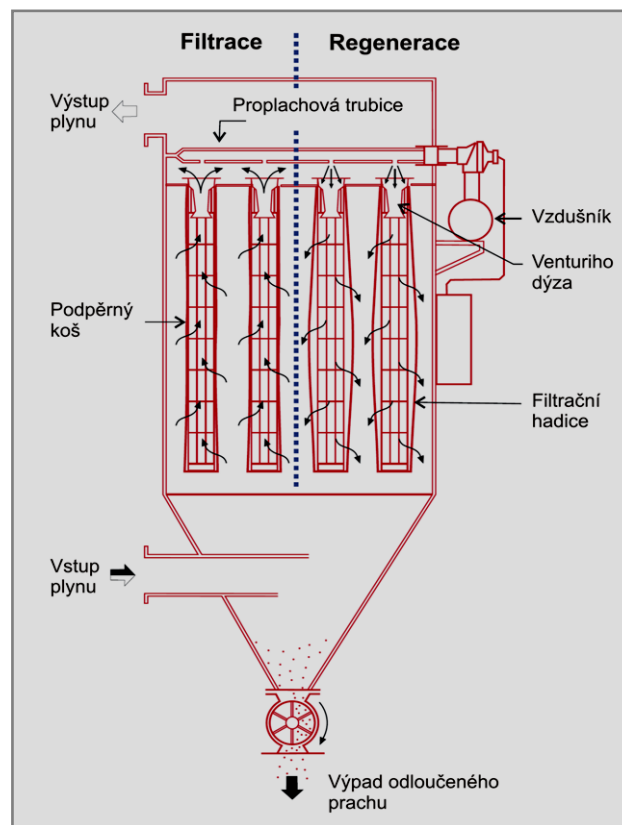
4.1.3 Tkaninové filtre (vrecové resp. hadicové filtre)

Tkaninové filtre sú zariadenia, ktoré suchou cestou odstraňujú častice (najmä poletavý popolček) z priemyslových dymových plynov a spaľovacích zariadení. V mnohých prípadoch sa táto technológia používa spoločne s injektážou suspenzie alebo práškoveho absorbentu (ako je vápno alebo kyslý uhličitan vápenatý). Takto sa dosahuje zníženie emisií oxidu siričitého zároveň so znížením emisií popolčeku [26].

Jednotka tkaninových filtrov obsahuje jeden alebo viac izolovaných oddielov, ktoré obsahujú rady tkaninových vriec alebo rukávov navlečených na podporných kovových konštrukciách. Časticami znečistený plyn zvyčajne vstupuje do zariadenia spodným otvorom a následne prúdi smerom hore pozdĺž povrchu vriec a potom šikmo tkaninou, ako je znázornené na obr. 4.8 vľavo, časť *filtrace*. Častice sa zachytávajú na vonkajšej strane vriec a vyčistený plyn sa vypúšťa do atmosféry. Filtre sa prevádzkujú cyklicky, čo znamená, že sa striedajú dlhé obdobia filtrovania s krátkymi intervalmi jeho čistenia [26].

Odstraňovanie prachu z tkaniny je dôležité pre udržanie efektívnej účinnosti odlučovania a životnosti filtra. Vrecové filtre sa čistia reverzným prietokom vzduchu (obr. 4.8 vpravo, časť *regenerace*), mechanickým otriasaním, vibráciami a pulzáciami stlačeným vzduchom. Týmto spôsobom sa neodstráni všetok usadený prach a hlboko usadené častice ostávajú v tkanine. Zanášanie tkaniny filtra do určitej miery zvyšuje účinnosť čistenia spalín, pretože sa zmenšuje veľkosť pórov, čím sa zabráni prechodu menších častíc do prúdu výstupného vzduchu [26].

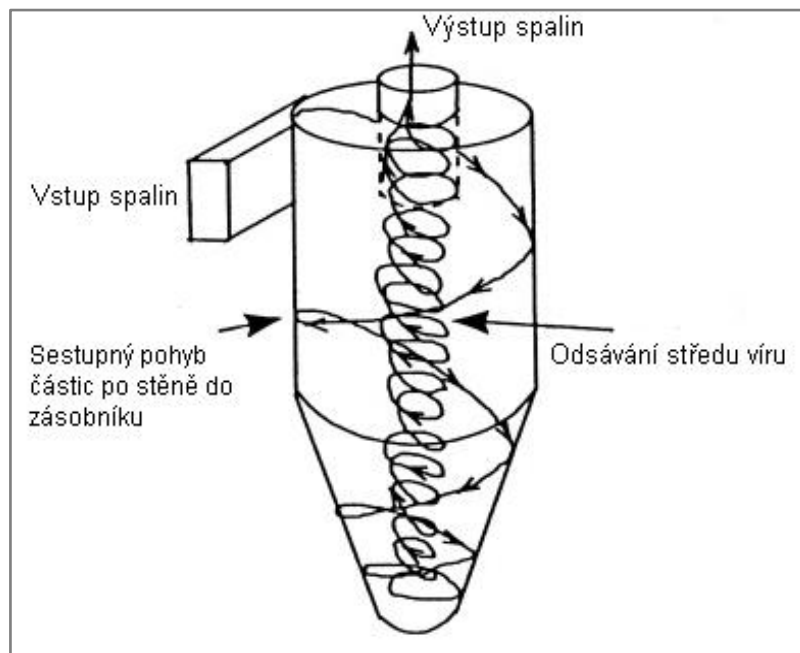
Vzhľadom na usadzovanie častíc narastá v kontinuálnej prevádzke tlaková strata filtračného média. Pri použití suchých sorpčných systémov pomáha tvorba koláča na médiu odstraňovať kyseliny [2].



Obr. 4.8 Znáznornenie princípu fungovania tkaninového filtra

4.1.4 Odstredivé odlučovače (cyklóny a multicyklóny)

Cyklóny a multicyklóny využívajú na oddelenie materiálu kombináciu gravitačných a odstredivých síl. Multicyklóny sa od samostatných cyklónov líšia tým, že pozostávajú z veľkého počtu malých cyklónových jednotiek. Tento typ jednotiek môže upravovať všetky typy dymových plynov za suchých podmienok. Prúd plynu vstupuje kolmo do separátoru a unášané tuhé látky sú odstredivou silou dopravované na steny cyklónu, odkiaľ sa žnú ku dnu aparatury a padajú do výsyvky, ako vidno na obr. 4.9. Z každého cyklónu odchádza vyčistený vzduch horným otvorom centrálnym potrubím, zachytáva sa vo výstupnej komore a potom prúdi prepravným potrubím [2],[26].



Obr. 4.9 Cyklón

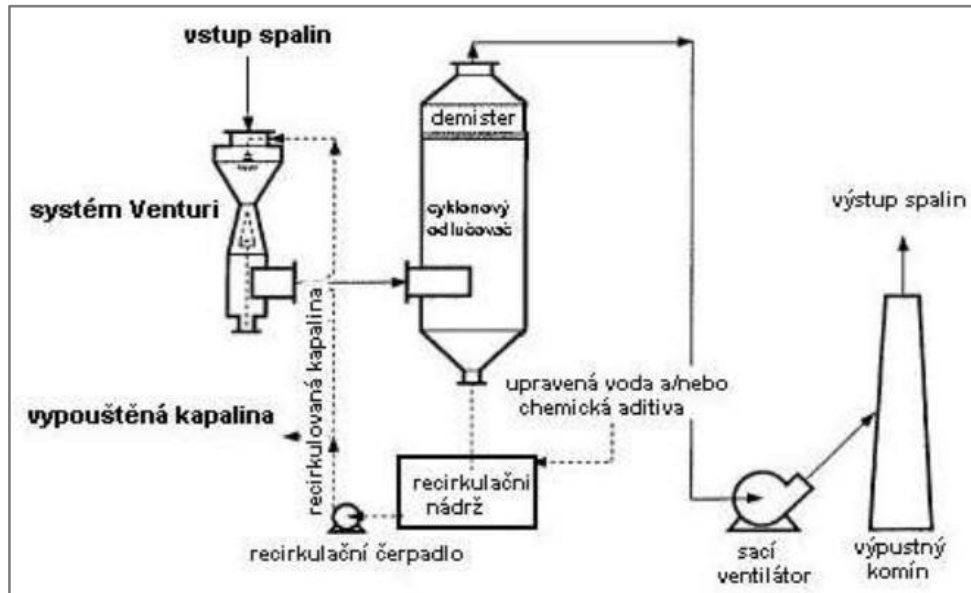
Cyklóny sami o sebe nedosahujú vysokú účinnosť odstraňovania prachových častíc menších ako $1\mu\text{m}$, avšak v prípade častíc väčších ako $10\mu\text{m}$ dosahujú účinnosť čistenia až 95 % a teda môžu byť dôležitou súčasťou celkového systému ako predbežný stupeň čistenia spalín pred vstupom do ostatných stupňov čistenia spalín (elektrostatickým čistením, tkaninovým filtrom) [2].

Výhodou cyklónov je, že môžu byť prevádzkované v širokom rozpätí teplôt a v masívnych konštrukciách. Ich nevýhodou môže byť erózia v mieste nárazu častíc do stien cyklónu, obzvlášť v zariadenia s fluidným ložom, kedy materiál lože opúšťa zariadenie [2].

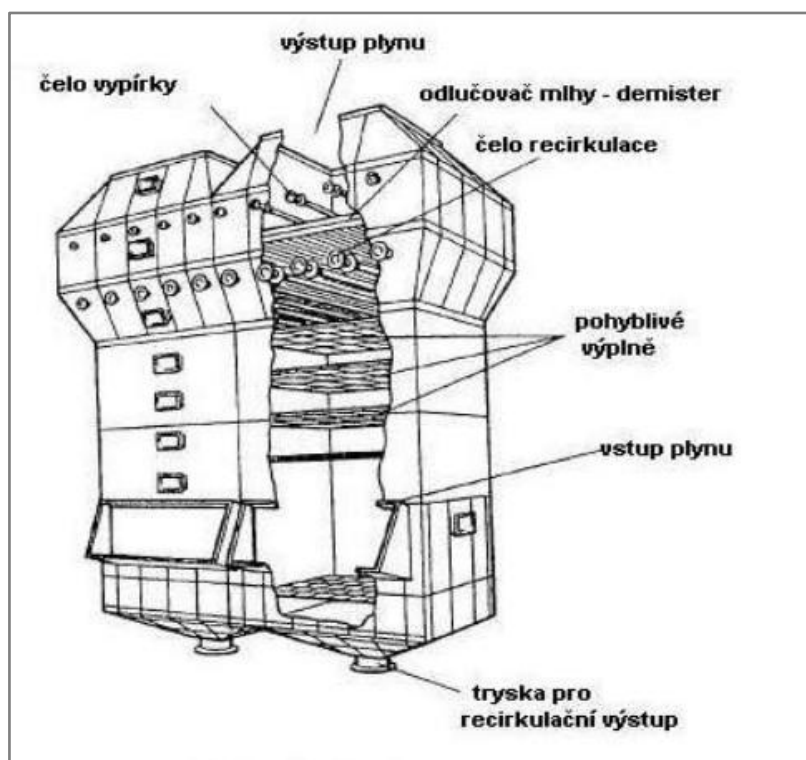
4.1.5 Mokrý absorbér (mokrú pračka)

Mokrý absorbér takisto slúži na redukcii TZL z prúdu spalín, ktorý na zachytávanie častíc využíva kvapalinu. Väčšina obvyklých aparatur sa zakladá na princípe Venturiho pračky (obr. 4.10) a absorbéru s náplňovou komorou (obr. 4.11). Znečistený plyn sa do pračky zavedie na hornú časť stredovej časti Venturiho systému. Plyn znečistený prachom vstupuje do systému spolu s vypieracou kvapalinou hrdlom pračky [26].

Kvapalina sa vstrekuje do odlučovača v najužšom mieste. Odlučovače tohto typu sú schopné pracovať zároveň ako absorbéry, ale aj ako mokré odlučovače prachu a kondenzátory pár. Venturiho pračky sa používajú v chemickom priemysle a spaľovniach komunálneho, priemyselného aj nebezpečného odpadu. Charakter znečisťujúcich látok určuje druh použitej vypieracej kvapaliny. Používajú sa roztoky minerálnych kyselín s nízkou tenziou pár (napr. kyselina fosforečná) na vypieranie alebo vodné alkalické roztoky (napr. NaOH, Na₂CO₃).



Obr. 4.10 Princíp mokrého prania [26]



Obr. 4.11 Absorbér s náplňovou komorou [26]

Vďaka zvlhčeniu plynu sa tuhé častice zhlukujú do väčších ťažších kvapiek, ktoré sa ľahšie zachytávajú v odlučovači. Vysokou počiatočnou rýchlosťou medzi kvapkami a tuhými časticami sa zabezpečí, že častice ostanú zachytené na kvapkách. V nasledujúcom rozvetvenom systéme dochádza k ďalším zrážkam kvapiek a častíc a ich zhlukovaniu [26].

4.2 Chemické a fyzikálno-chemické čistenie plynov

4.2.1 Technológie na znižovanie emisií kyslých zložiek (SO_x, HCl, HF)

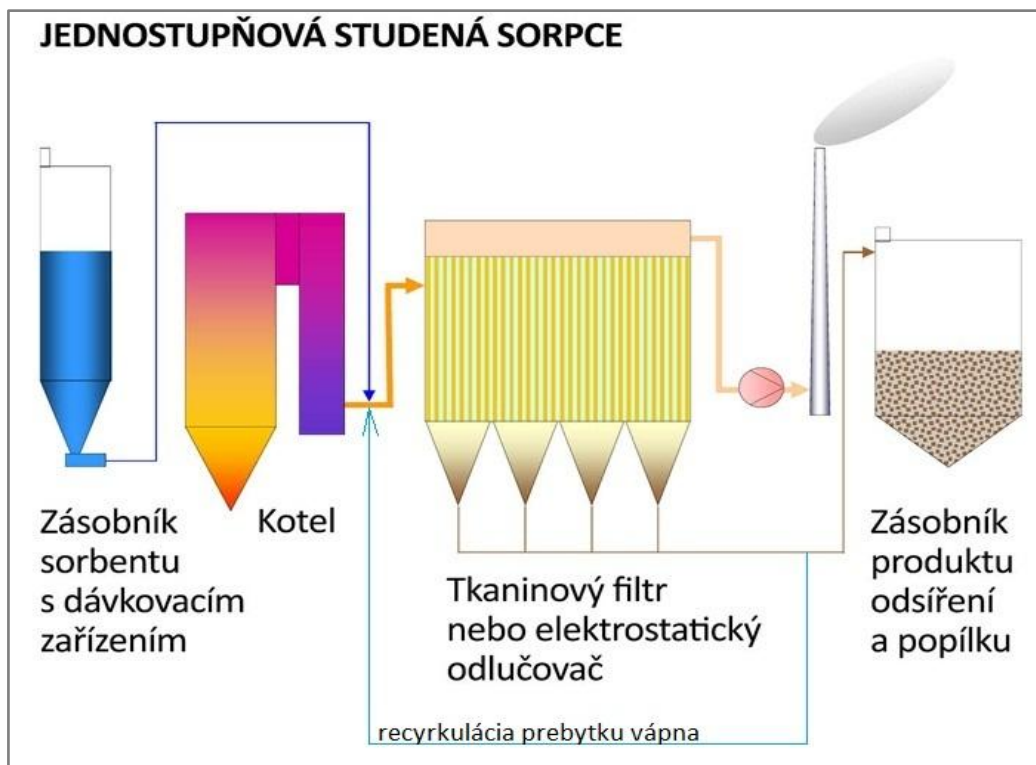
Spaľovaním sa SO₂ mení na SO₃ a reakciou s vodnou parou na kyselinu sírovú, ktorá má tendenciu kondenzovať na stenách zariadenia. Kondenzáciou kyselín klesá teplota spalín pod teplotu rosného bodu a dochádza tak v mnohých energetických celkoch k problémom s koróziou. Značné korozívne napadnutia poškodzujú hlavne ohrievače vzduchu, ekonomizéry, vedenie spalinovodov ale aj komín [29].

Kyslé zložky sa zo spalín odstraňujú obvykle pomocou alkalických činidiel, na čo slúžia nasledujúce postupy čistenia [2]:

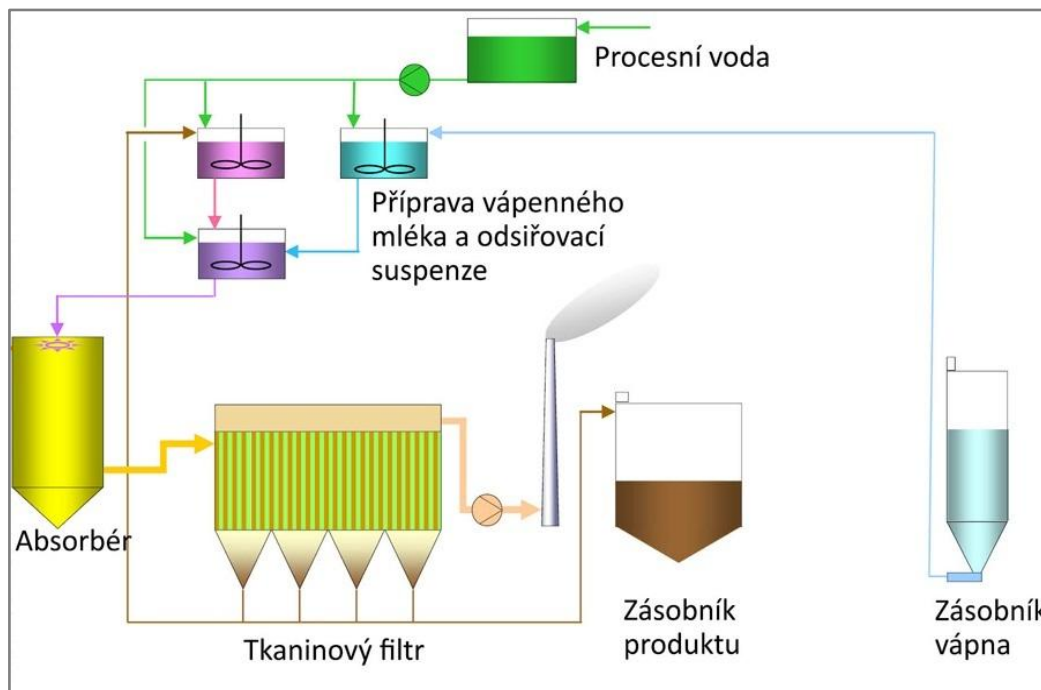
- **Suché procesy:** suché sa nazývajú preto, lebo do spalín sa pridáva suchý sorpčný prostriedok (napr. vápno alebo uhličitan sodný) a reakčný produkt je tiež suchý. Schéma suchého procesu je na obr. 4.12.
- **Polomokrý/polosuchý procesy:** do prúdu spalín sa pridáva sorbent vo vodnom roztoku (vápenné mlieko) alebo v suspenzii (ako kal). Voda sa z roztoku odparí a reakčný produkt vychádza v suchej forme. Tento proces znázorňuje obr. 4.13.
- **Mokrý procesy:** do prúdu spalín sa čerpá voda, peroxid vodíka alebo prací roztok obsahujúci časť reakčného činidla (napr. roztok hydroxidu sodného). Reakčný produkt je taktiež kvapalný. Schéma procesu je znázornená na obr. 4.14.

V procesoch **suchej sorpcie** sa do reaktoru privádza činidlo v podobe suchého prášku. Pomer dávkovaného činidla závisí na teplote a na druhu činidla. Tuhé produkty sa zvyčajne odstraňujú v podobe popola na rukávových filtroch. Prebytok vápna sa využije v recyklácii [2].

Pri **polosuchom procese** sa absorpčné činidlo rozprašuje buď v suspenzii alebo ako roztok do prúdu horúcich spalín v rozprašovacom reaktore. V tomto type procesu sa využíva teplo zo spalín na odparenie rozpúšťadla. Po reakcii vzniknú tuhé produkty, ktoré je nutné odstrániť v podobe prachu v nasledujúcom stupni a to napr. na rukávovom filtri [2].



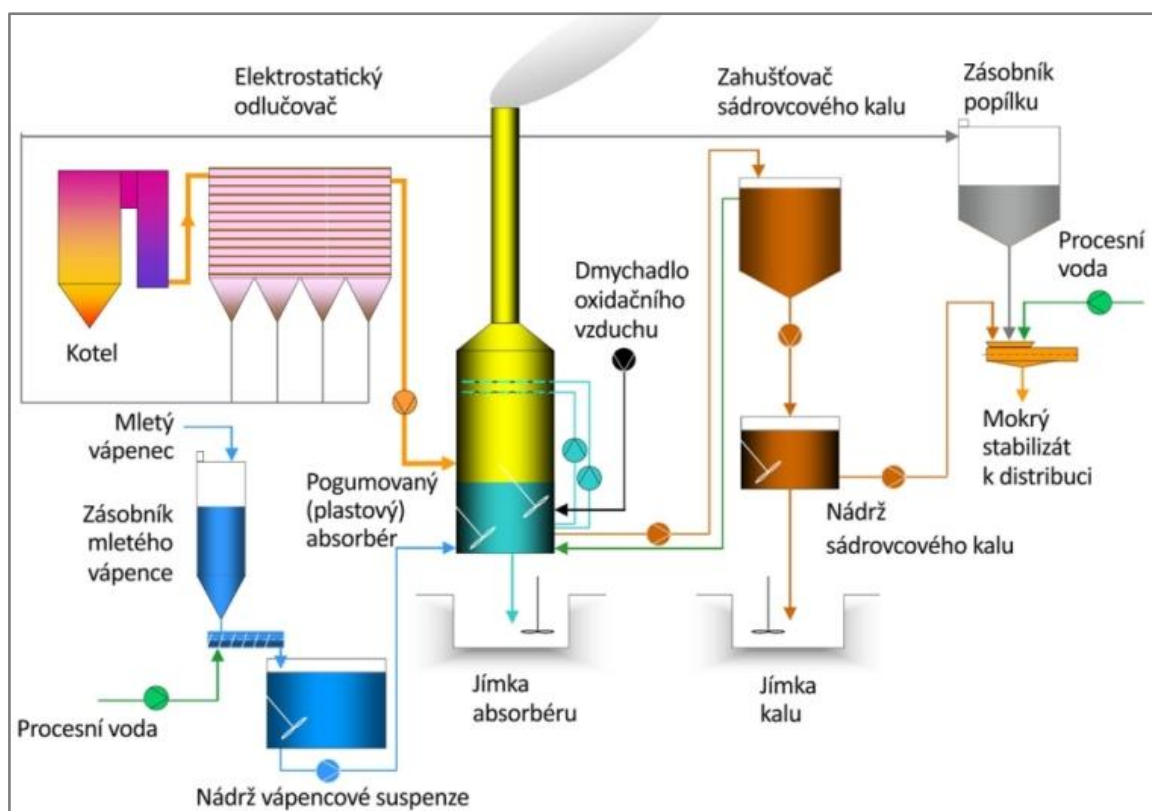
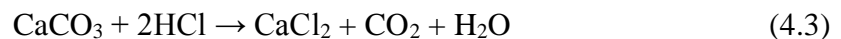
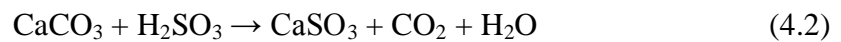
Obr. 4.12 Schéma suchého odsírenia spalín [30]



Obr. 4.13 Schéma polosuchého odsírenia spalín [30]

Prevažujúcimi technológiami na odsírovanie spalín sú **mokrú vypieracie metódy**, najmä pochody na báze **vápenec-sadrovec**. Zaujímajú najväčší podiel na trhu, čo je dôsledkom ich vysokej účinnosti odstránenia SO₂ a ich vysokej spoľahlivosti. Ako činidlo sa vo väčšine prípadov používa vápenec, pretože je v mnohých krajinách dostupný vo veľkom množstve [26].

Mokrú procesy prebiehajú podľa nasledujúcich reakcií:



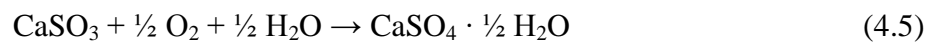
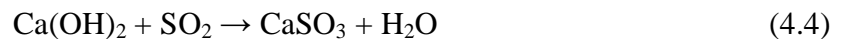
Obr. 4.14 Schéma mokrého odsírenia [30]

Spaliny, ktoré opúšťajú systém odlučovania pevných častíc, prechádzajú zvyčajne cez výmenník tepla a vstupujú do absorbéru s odsírovacím činidlom. V absorbéri sa odstráni SO₂ priamym kontaktom s vodnou suspenziou jemne mletého vápenca, ktorý má mať viac ako 95 % uhličitanu vápenatého (CaCO₃). Čerstvá vápencová suspenzia sa púšťa do absorbéru nepretržite.

Vyprané spaliny sa vypúšťajú do ovzdušia komínom alebo cez chladiace veže a reakčné produkty sa odťahujú z absorbéru a posielajú sa na odvodnenie a ďalšie spracovanie. Po odvodnení konečný produkt obsahuje okolo 90 % pevnej fázy, ľahko sa s ním manipuluje a je predajný hlavne ako sadra pre omietky, do cementu, obkladových dosiek, nahrádza prírodný sadrovec, alebo sa ukladá na skládku [26].

Druhým najvyužívanejším procesom na odsírenie spalín je **suchá rozprašovací metóda**. Na odstránenie SO₂ zo spalín sa využíva vápenný prášok. Zvyškom po reakcii je bežne zmes síranu a siričitanu vápenatého a popolčeku, čo je komerčne menej využiteľné. Proces je tvorený hlavne absorbérom so suchým rozstrekcom, zariadením na odlučovanie tuhých častíc (ako je ESP alebo tkaninový filter) a zariadenie na recykláciu a zneškodnenie reakčných produktov [26].

Na absorpciu SO₂ z prúdu spalín sa bežne v suchej metóde používa vápno alebo oxid vápenatý. Vápno sa mieša s vodou, alebo sa vyhasí, čím sa získa vápenná suspenzia, tiež nazývaná vápenné mlieko. Vápenná suspenzia sa rozprašuje v podobe jemných kvapiek do absorbéru, kde sa odstraňuje SO₂. Počas odparovania vody z vápennej suspenzie reagujú kyslé zložky (hlavne SO₂, SO₃ a HCl) s hydrátom vápenatým na siričitan a síran vápenatý a chlorid vápenatý ako uvádzajú reakcie nižšie [26].



4.2.2 Technológie na znižovanie emisií oxidov dusíku

Primárnym opatrením na zníženie tvorby NO_x je kontrola procesu v peci., tzn.:

- zníženie prebytku vzduchu,
- odstupňovanie dodávok vzduchu,
- recyklácia spalín,
- obmedzenie vysokých teplôt v peci,
- odstupňovanie dodávok paliva [2],[26].

Prebytok vzduchu sa pri spaľovaní používa na dokonalé spálenie všetkých zložiek odpadu a to vďaka vyššiemu obsahu kyslíku. Dusík obsiahnutý v palive reaguje s kyslíkom so spaľovacieho vzduchu za vzniku oxidov dusíku, čo znamená, že sa ich tvorba zvýši pri prebytku vzduchu. Preto je nutné znížiť množstvo kyslíku na minimálne množstvo, ktoré je nevyhnutne potrebné na dokonalé spálenie odpadu [26].

Široko používaným primárnym opatrením na znižovanie produkcie NO_x je dobré rozdelenie dodávok primárneho a sekundárneho vzduchu. Týmto spôsobom sa zabráni nerovnomernému rozloženiu teplôt a teda aj vytváraniu miest s príliš vysokou teplotou [2].

Recykláciou spalín sa dosiahne zníženie obsahu kyslíku, ktorý je k dispozícii v spaľovacej zóne. To znamená, že sa obmedzí reakcia dusíku viazaného v palive aj tvorba tepelných NO_x [26].

Obmedzenie vysokých teplôt v peci znamená, že sa zníži tvorba tepelného NO. Tento spôsob sa uplatňuje hlavne v zariadeniach spaľujúcich plyn a olej. V prípade spaľovania uhlia je zníženie teploty neadekvátne a taktiež môže zvýšiť spotrebu paliva [26].

Postupné dávkovanie paliva sa tiež označuje ako opätovné spaľovanie. Je založené na rozdelení spaľovacích zón v ohnisku pri postupnom privádzaní paliva a vzduchu. Cieľom tohto spôsobu je redukovať oxidy dusíku, ktoré sa už vytvorili späť na dusík. V primárnych reakčných zónach sa znižuje dodávka kyslíku a následne sa zvýši dodávka vzduchu (a tým aj kyslíku) v neskorších spaľovacích zónach [2],[26].

Sekundárne opatrenia na zníženie emisií NO_x sú technikami koncového čistenia oxidov, ktoré už vznikli. Sú to chemické reakcie oxidov s amoniakom, močovinou alebo ďalšími zlúčeninami, ktoré redukujú oxidy na molekulárny dusík [26]. Rozlišujú sa dva spôsoby:

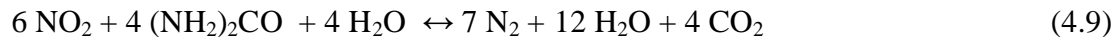
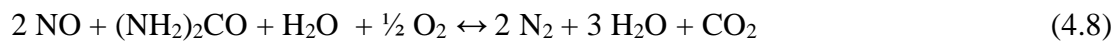
- selektívna nekatalytická redukcia (SNCR)
- selektívna katalytická redukcia (SCR)

Pri oboch spôsoboch sa uplatňujú nasledujúce reakcie:

1. s amoniakom



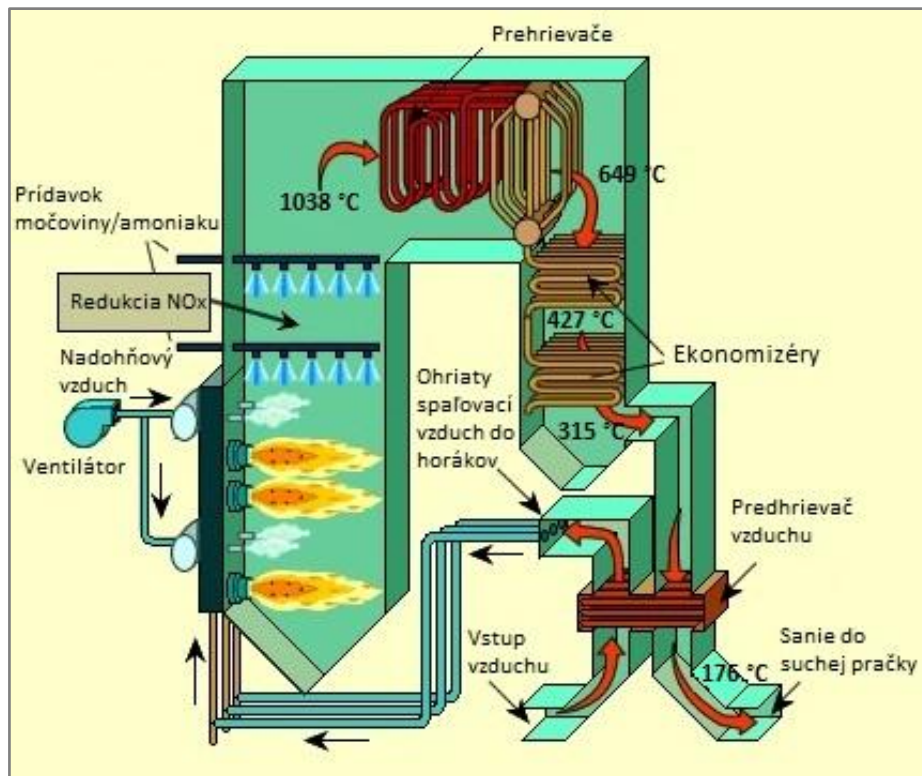
2. s močovinou



Selektívna nekatalytická redukcia

V procese **SNCR** sa na redukciu oxidov dusíku (NO + NO₂) používa redukčné činidlo (obvykle amoniak alebo močovina), ktoré sa vstrekuje do pece, ako je znázornené na obr. 4.15. Reakcia prebieha pri teplotách medzi 850 °C a 1000 °C. Teplotné rozmedzie je dôležité, pretože pri teplote nad 1000 °C sa oxiduje amoniak a tak vzniká viac NO_x a pod teplotou 850 °C je konverzia nízka a môže sa tvoriť amoniak. Redukcia dusíku pomocou SNCR vyžaduje vo väčšine prípadov vyššie množstvo redukčného činidla, čo spôsobuje emisie amoniaku. Použitím močoviny sa znížia emisie amoniaku, ale tvorí sa viac N₂O [2],[26].

Vysoká redukcia NO_x a nízky čpavkový sklz sa dosahuje dostatočným premiesením reakčného činidla so spalinami. Ďalším dôležitým parametrom je veľkosť kvapiek reakčného činidla (malé kvapky sa odparia príliš rýchlo, čo spôsobí zvýšenie obsahu NO_x; veľké kvapky sa odparia pomaly, čo spôsobí zvýšenie obsahu amoniaku v emisiách). Redukčné činidlo je do procesu privádzané nosným médiom, ktorým môže byť stlačený vzduch, para alebo voda [26].

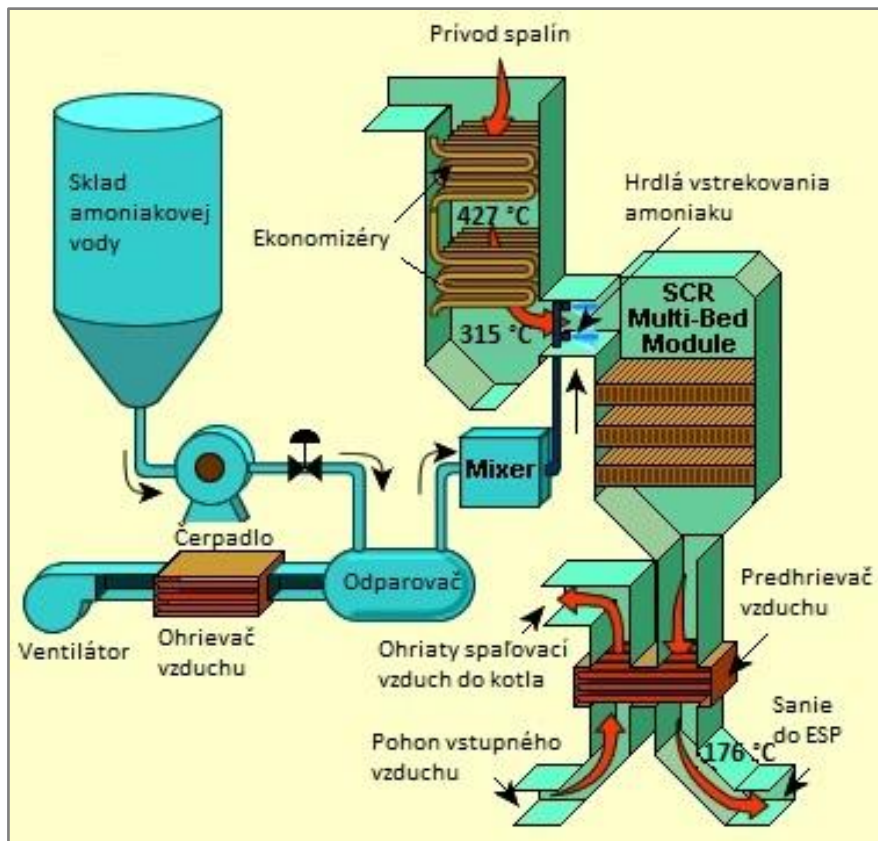


Obr. 4.15 Technologická schéma metódy SNCR [31]

Selektívna katalytická redukcia

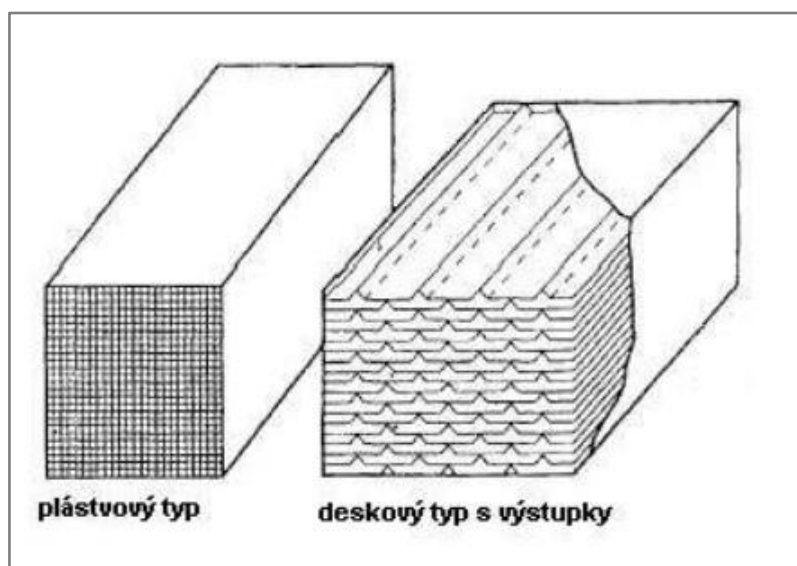
Využívaným spôsobom redukcie emisií NO_x je metóda **SCR**. Je to katalytický proces, ktorý na redukcii oxidov dusíku taktiež využíva amoniak alebo močovinu, avšak za prítomnosti katalyzátorov (oxidy Ti, V, W). Tieto katalyzátory sú účinné aj na rozklad dioxínov, takže zároveň s redukcii oxidov dusíku sa znižuje aj množstvo dioxínov.

Amoniak sa bežne skladuje ako vodný roztok. Pred použitím sa musí kvapalnú amoniak odpariť na plynný v odparkách a následne sa riedi vzduchom. Potom sa rozstrekuje do vypúšťaného plynu pomocou trysiek, čím sa dosiahne homogénne premiešanie amoniaku so spalinami. Tento proces je znázornený na obr. 4.16. Dôležitým aspektom premiešania je dosiahnutie vhodného stechiometrického pomeru NH_3/NO_x , čo zabezpečí vysokú účinnosť odstránenia NO_x a minimalizuje sa tým strhávanie amoniaku [26].



Obr. 4.16 Technologická schéma metódy SCR [31]

Katalyzátory používané na SCR majú kovovú konštrukciu a môžu mať rozličnú štruktúru, a to plástovú alebo doskovú, ako ukazuje obr. 4.17. Štruktúrovaným katalyzátorom sú pelety (najmä aktívne uhlie). Účinok katalyzátoru sa prejaví pri teplotách 230-300 °C. Metóda SCR sa niekedy umiestňuje priamo za ESP za účelom zníženia alebo vylúčenia potreby opätovného zahriatia spalín. Pri tejto variante treba počítať s ďalším rizikom tvorby PCDD/F v ESP. Na odstránenie PCDD/F v procese SCR sa používajú viacvrstvé systémy SCR [2],[26].



Obr. 4.17 Katalyzátory typu plástov alebo doskové [26]

4.2.3 Technológie na znižovanie emisií ortuti

Tak ako u ostatných typov emisií aj pri znižovaní emisií ortuti sa uplatňujú **primárne opatrenia**, ktoré zahŕňajú triedenie odpadu pred spálením. Najúčinnnejšou metódou zníženia emisií ortuti je ich prevencia, ktorá zahŕňa:

- informovanie pôvodcov odpadov o potrebe oddeliť ortuť a následný účinný oddelený zber odpadu, ktorý môže obsahovať ťažké kovy (batériové články, baterky, dentálny amalgám atď.)
- určenie alebo obmedzenie prijímaného odpadu, ktorý je potenciálne kontaminovaný ortuťou,
- ak sú takéto prijímané odpady známe – kontrola vsádzky s cieľom vyhnúť sa preťaženiu systému so zreteľom na kapacitu v odstraňovaní odpadov [2].

Ortuť sa v spalinách objavuje v dvoch konfiguráciách a to buď ako anorganická dvojmocná v podobe chloridu alebo elementárna. Voľba **sekundárneho procesu** odstránenia ortuti závisí na veľkosti vsádzky a na obsahu chlóru v odpade. Ak je obsah chlóru vyšší, ortuť sa vyskytuje vo väčšej miere v iónovej podobe a môže sa usadzovať v mokrých pračkách. Pri nižšom obsahu chlóru sa zvyšuje obsah elementárnej ortuti [2].

Kovová ortuť sa zo spalín môže odstrániť pomocou:

- oxidačných činidiel, ktoré premenia kovovú ortuť na dvojmocnú a následne sa môže odstrániť v mokrých pračkách,
- priameho odstraňovania na aktívnom uhlí obohatenom sírou (vznikne stabilná zlúčenina HgS), na kokse z nístejovej pece alebo na zeolitoch [2].

4.2.4 Technológie na znižovanie emisií ťažkých kovov

Systémy na zachytávanie ťažkých kovov z prúdu spalín zahŕňajú selénové filtre, filtre aktívneho uhlia a rozličné sorbenty. Boli vyvinuté systémy aktívneho uhlia alebo koksových filtrov, ktoré sú účinné na odstraňovanie Cd, Hg a Pb zo spalín [26].

Na odstránenie ťažkých kovov zo spalín sa tiež využíva ich konverzia na neprchavé oxidy, ktoré sa odstraňujú spolu s popolčekom – technológie uplatňujúce sa pri odprašovaní [2].

4.2.5 Technológie na znižovanie emisií CO a nespálených uhl'ovodíkov

Emisie CO a nespálených uhl'ovodíkov vznikajú v dôsledku nedokonalého spaľovania a môžu sa objaviť tiež z dôvodu príliš nízkych teplôt pri spaľovaní, príliš krátkej doby zdržania v spaľovacej komore alebo nesprávnym zmiešaním paliva a spaľovacieho vzduchu. Oxid uhoľnatý je aj za vysokých teplôt bez prítomnosti kyslíku stabilnou zlúčeninou. Oproti tomu sa môžu uhl'ovodíky rozložiť a pri vysokých teplotách tvoriť v atmosfére chudobnej na kyslík sadze [26]. Z uvedeného možno usúdiť, že pre zníženie emisií je potrebná kontrola spaľovacej teploty a dobré premiešanie paliva s privádzaným vzduchom.

4.2.6 Technológie na znižovanie emisií zlúčenín organického uhlíku

Prvým krokom k znižovaniu emisií zlúčenín organického uhlíku je efektívne spaľovanie. Spaliny môžu obsahovať stopové množstvo širokého rozsahu druhov organických látok, a to:

- halogenované aromatické uhľovodíky,
- polycyklické aromatické uhľovodíky (PAH),
- benzén, toluén a xylén (BTX),
- polychlorované dibenzo-*p*-dioxíny a dibenzofurány (PCDD/F) [2].

PCDD a PCDF vznikajú za pecou zo zlúčenín polychlorovaných bifenilov, polychlorovaných difenylmetánov (PCDM), chlorbenzénov atď. (súhrnne sa nazývajú prekurzory). Môžu tiež vznikáť katalytickou reakciou medzi uhlíkom a uhlíkatými zlúčeninami a zlúčeninami anorganického chlóru, pri ktorej sú katalyzátormi oxidy kovov (napr. medi). Tieto reakcie prebiehajú hlavne v popolčeku alebo vo filtračnom prachu pri teplotách 200 °C až 450 °C. Dioxíny sa v spalinách môžu vyskytnúť aj v dôsledku ich neúplnej deštrukcie v odpade [2].

Emisie zlúčenín organických uhľovodíkov sa účinne odstraňujú pomocou adsorpčných procesov, oxidačných katalyzátorov, ďalším odstraňovaním popola a aerosólov a pomocou silného chladenia spalín. Pri adsorpcii sa využíva vstrekovanie aktívneho uhlia do prúdu spalín a následné odlúčenie pevných častíc na rukávovom filtri. Odstraňovanie plynných PCDD/F na katalytickom filtri (filter impregnovaný katalyzátorom) je účinnejšie ako adsorpčné čistenie [2].

5 TECHNOLOGIA SPAĽOVNE SAKO BRNO, A.S.

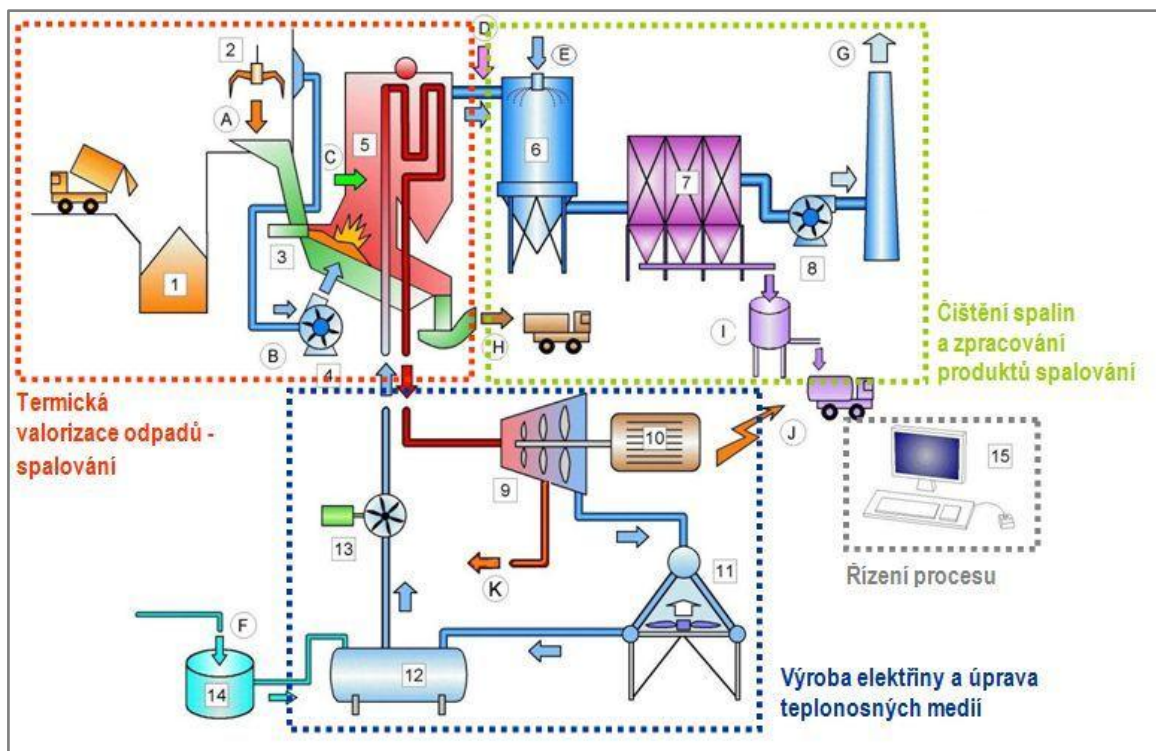
V roku 1905 bola v Brne po prvýkrát uvedená do prevádzky spaľovňa odpadov, a to ako prvá na území Českej republiky. Už v tomto čase vyrábala elektrickú energiu z odpadu. V hlavnej budove bola umiestnená spaľovacia pec so siedmimi spaľovacími komorami, ktorá denne spálila 27,45 ton odpadu. Spaľovňa pracovala bez systému čistenia spalín a fungovala do roku 1941 [1].

Obnova prevádzky nastala v roku 1989, kedy bol do technológie zaradený aj prvý stupeň čistenia spalín na elektrostatických odlučovačoch. Kotolňa bola vybavená tromi kotlami s valcovými roštami. Druhý stupeň čistenia spalín na báze polosuhej vápennej metódy bol dobudovaný v roku 1994 a bol rozšírený o dávkovanie aktívneho uhlia do prúdu spalín. V októbri 2004 bola inštalovaná technológia SNCR na zníženie obsahu oxidov dusíku [1].

V súčasnosti spaľovňa funguje ako komplex triedenia, recyklácie a energetického využitia komunálneho odpadu s kogeneráciou, tzn. kombinovanou výrobou tepelnej a elektrickej energie, pričom spĺňa emisné limity a stanovené technické podmienky prevádzky [1]. Spĺňať emisné limity sa spaľovni darí vďaka päťstupňovému čisteniu spalín popísanému nižšie. Technologický proces spaľovania SAKO Brno, a.s. je znázornená na obr. 5.1.

Výhody zariadenia na energetické využívanie odpadu sú nasledovné:

- využitie uvoľnenej tepelnej energie zo spaľovacieho procesu na výrobu tepelnej a elektrickej energie,
- úspora primárnych neobnoviteľných zdrojov surovín (fosílnych palív) a energie,
- redukcia hmotnosti odpadu na 28 % pôvodných hodnôt,
- redukcia objemu o 90 % pôvodných hodnôt, čo znamená desaťnásobné predĺženie životnosti skládky,
- jednoduché a účinné riadenie spaľovacieho procesu,
- dokonalé vyhorenie odpadu až na anorganický inertný materiál – škvary,
- škvara obsahuje minimálny podiel organických zvyškov (1-5 %),
- účinné odlúčenie sledovaných škodlivín zo spalín na hodnoty spĺňajúce zákonné normy,
- odseparovanie feromagnetických a neferomagnetických kovov zo škvary,
- využitie škvary na stavebné účely [1].



Obr. 5.1 Znáozornenie technologického postupu spaľovne SAKO Brno, a.s. [32]

A	komunálny odpad	1	zásobník odpadov	12	napájacia nádrž
B	spaľovací vzduch	2	žeriav s polypovým drapákom	13	napájacie čerpadlá
C	močovina (DeNO _x)	3	spaľovacie zariadenie – rošt	14	nádrž demineralizovanej vody
D	aktívne uhlie	4	ventilátor spaľovacieho vzduchu	15	riadiaci systém
E	vápenné mlieko	5	parný kotol		
F	demineralizovaná voda	6	absorbér		
G	vyčistené spaliny	7	tkaninový filter		
H	škvara	8	spalinový ventilátor		
I	end-produkt	9	parná turbína		
J	elektrina	10	generátor		
K	teplo do Centrálného zásobovania teplom (CZT)	11	vzduchový kondenzátor		

5.1 Transport odpadu – radiačná ochrana a váženie

Odpad sa do spaľovne zväža nákladnými vozidlami, kde nemáme prehľad o jeho zložení. Tento odpad môže byť nebezpečný z hľadiska rádioaktívneho gama žiarenia, a preto vozidlá s odpadom prechádzajú detekčným systémom. Detektor odhalí aj také predmety, ktoré sú uzavreté v prepravnom olovenom tienení. Detekčný systém tak má za úlohu zabrániť úniku rádioaktívnych látok do životného prostredia [1].

Pred samotnou manipuláciou s odpadom je potrebné ho zvážiť vo váhovni. Skladá sa z budovy a dvoch vážiacich mostov určených pre vjazd a výjazd. Sú tu nainštalované dve váhy s maximálnou váženou hmotnosťou 60 ton, s rozsahom 0,4 - 60 ton. Váženie prebieha automaticky a dáta sa spracovávajú pomocou špeciálneho softwaru, ktorý eviduje vstup a výstup do zariadenia, pričom sa tieto dáta delia na dve skupiny a to zvlášť pre odpad určený pre energetické využitie a pre zbieraný odpad určený na dotriedenie na dotriedovacej linke [1].

5.2 Transport spáľiteľného odpadu

5.2.1 Zásobník odpadu

Po zvážení sa nákladný voz pristaví pri vsypových vrátach, kde obsluha po kontrole povolí vysypanie odpadu do zásobníku. Objemný odpad sa ešte drví pred tým, ako sa umiestni do zásobníku. Kapacita zásobníku je 5000 ton odpadu, čo pokryje päťdennú prevádzku dvoch kotlov. Potom sa odpad premiestňuje pomocou žeriavu do násypiek. Odpad z násypky je pomocou podávacieho stolu postupne vysypaný na rošt kotla. Množstvo vysypaného odpadu je riadené automaticky a závisí na požadovanom výkone kotla a výhrevnosti spaľovaného odpadu [1]. Ochrana proti požiaru, havárii a priechodu zápachu je zabezpečená možnosťou uzavrieť vsypové vráta a tým utesniť priestor [2].

5.2.2 Kotly

Použité kotle sú päťhlavové s vratisuvnými roštmi typu MARTIN. Ich parametre zaistia optimálne prevádzkové podmienky procesu spaľovania odpadu [1].

Odpad v kotle horí sám bez prídavného paliva pri teplote vyššej ako 1000 °C a na rošte prechádza postupne fázou zahrievania, vysušania, splyňovania, horenia a dohorenia. Škvara po spálení odpadu padá do mokrého vynášača, kde je uhasená a schladená. Využitie energetického potenciálu odpadu zaisťujú robustné parné dvojbubnové kotly s päť ťahovým riešením. V týchto kotloch sa maximum uvoľnenej energie predáva varnému systému kotla. Voda pre kotlový systém sa chemicky upravuje na demineralizovanú vodu. Výstupným produktom vychádzajúcim z kotla je para s teplotou 400 °C a tlakom 4,1 MPa. Táto prehriata para sa následne privádza na turbínu [1].

5.2.3 Turbína

Prehriata para prechádza parnou viacstupňovou odbernou kondenzačnou turbínou typu SST 300 s nominálnym výkonom 22,7 MW. Turbína má nízkotlakový a vysokotlakový diel, pričom para sa odoberá vo vysokotlakovej časti, kde dochádza k expanzii prehriatej pary a tepelná a tlaková energia sa menia na mechanickú – koná sa mechanická práca pohonom lopatkového rotoru. Rotor v spojení s prevodovkou a generátorom elektrickej energie transformuje mechanickú prácu na elektrickú energiu [1].

5.2.4 Chemická úprava vody

Dostatočné množstvo napájacej vody je zaistené vďaka chemickej úpravni vody. Napájacia voda je tvorená vratným kondenzátom zo siete CZT, čistým kondenzátom so vzduchom chladeného kondenzátoru a vodu z chemickej úpravne vody, kde sa na úpravu používa hlavne pitná voda. Surová voda obsahuje vysoké množstvo solí a bez jej úpravy by došlo k zaneseniu varného systému kotla minerálnymi usadeninami a následnému poškodeniu turbíny. Kyslík rozpustený vo vode by sa významnou mierou podieľal na korózii varného systému [1].

5.3 Čistenie spalín

Legislatíva zakazuje priame vypúšťanie spalín do ovzdušia, kvôli ochrane životného prostredia. Preto je v SAKO Brno zavedený päťstupňový systém čistenia spalín [1].

Prvý stupeň čistenia je stupňom odstránenia oxidov dusíku, tzv. DeNO_x systém. Je inštalovaný priamo v spaľovacej komore. Oxidy dusíku sa výrazne redukovávajú reakciou s čpavkom [1].

V **druhom stupni čistenia** sa absorbujú ťažké kovy a perzistentné organické polutanty typu dioxínov (PCDD/F) a polycyklické aromatické uhľovodíky (PAH) [1].

Tretím stupňom čistenia je nástrek jemne rozprášenej vápennej suspenzie do prúdu spalín, čím sa odstránia kyslé zložky, ako HCl, HF a SO_x. Tento stupeň prebieha tak, že prúd plyných spalín z kotlov je vedený dymovodmi do absorbérov, kde prebieha čistenie spalín pomocou nástreku suspenzie [1].

Štvrtý stupeň čistenia je zaradený medzi absorbéry a textilné filtre. Je založený na suchej vápennej metóde, kedy sa do prúdu spalín pridáva suché hasené vápno. Systém sa spúšťa automaticky v prípade, že sa zvýšia koncentrácie kyslých zložiek v spalinách, ktoré neboli dostatočne zachytené v predchádzajúcom stupni [1].

Piatym a posledným stupňom čistenia sú textilné filtre, na ktorých sa odlučujú všetky mechanické nečistoty a pevné reakčné produkty zo spalín. Produkt čistenia spalín obsahuje vápenné soli, popolček, aktívne uhlie a prebytok reagentov. Celý proces čistenia spalín je automaticky riadený a to tak, aby na výstupe zo systému čistenia bol obsah zvyšných škodlivín nižší ako sú prípustné emisné limity. Účinnosť čistenia je pritom na úrovni 99 % [1].

5.4 Nakladanie so škvarou

Koncovým technologickým zariadením v spaľovni SAKO Brno, a.s. je škvarové hospodárstvo, ktoré ďalej upravuje škvaru. Škvara je odpadný inertný produkt spaľovacieho procesu (spečené kusy popola). Technológia je uspořobená na manipuláciu a separáciu škvary, čo znamená, že škvara po priechode spaľovacou komorou prechádza cez mokrý vynášač a následne je dopravená pomocou dopravníku do betónového zásobníku. V tejto technológii je možné vytriediť železo a hliník, ktoré sa ako druhotné suroviny dajú ďalej využiť. Škvara putuje na skládky, ako zabezpečovací prvok. Spoločnosť sa snaží o dosiahnutie takých kvalitatívnych prvkov škvary, aby bolo možné ju použiť ako stavebný materiál (zásypy, podsypy) a minimalizovať tak produkciu odpadu [1].

5.5 Monitoring a kontrola emisií

Účinnosť čistenia spalín sa spoľahlivo zistí na základe analýzy priebežne odoberaných vzoriek emisií a teda stanovenia obsahu znečisťujúcich látok v emisiách. Presné postupy a spôsoby odberu vzoriek ťažkých kovov uvádzajú normy [33] a [34].

Meranie prevádzkových parametrov a hmotnostných koncentrácií znečisťujúcich látok vypúšťaných do ovzdušia prebiehajú podľa platnej legislatívy, ktorou sa stanovujú emisné limity a ďalšie podmienky pre spaľovanie odpadov [32].

Analyzátory a meracie príruby sú umiestnené v dymovode za stupňom čistenia spalín a v prípade sledovania SO_2 a HCl sú sondy umiestnené aj pred vstupom do systému čistenia spalín. Hodnoty emisií sa odoberajú kontinuálne, automaticky každú sekundu, z ktorých sa urobí minútový priemer a následne polhodinový a denný priemer. Denný priemer sa potom porovnáva s emisnými limitami danými legislatívou. Okrem kontinuálneho merania sa uskutočňuje aj autorizované jednorazové meranie hmotnostných koncentrácií a hmotnostných tokov sledovaných znečisťujúcich látok v súlade s legislatívou a to jedenkrát ročne. V prípade sledovania PCDD/F a ťažkých kovov sa meranie robí dvakrát ročne. Každá zložka spalín má vlastný systém čistenia, merania emisií a vlastnú komínovú vložku [32].

Výsledky kontinuálneho merania a vyhodnocovania zloženia vyčistených dymových plynov (získovanie obsahu HCl) ovplyvňujú dávkovanie čerstvého vápenného mlieka do nástrekovej suspenzie na absorpciu a prípadne spúšťa dávkovanie suchého vápenného hydrátu priamo do dymovodu pred tkaninovými filtermi [32].

Analyzátory dymových plynov sú umiestnené v temperovanom a odvetrávanom priestore, ktorý sa nachádza v samostatnom objekte alebo priamo v dymovodoch medzi tkaninovým filterom a spalinovým ventilátorom. Monitorovaním jednotlivých znečisťujúcich látok vo vyčistených plynach sa sleduje správna funkcia čistiaceho systému a tým účinnosť celého technologického procesu čistenia a upravujú sa následné automatické zásahy do riadenia tohto procesu [32].

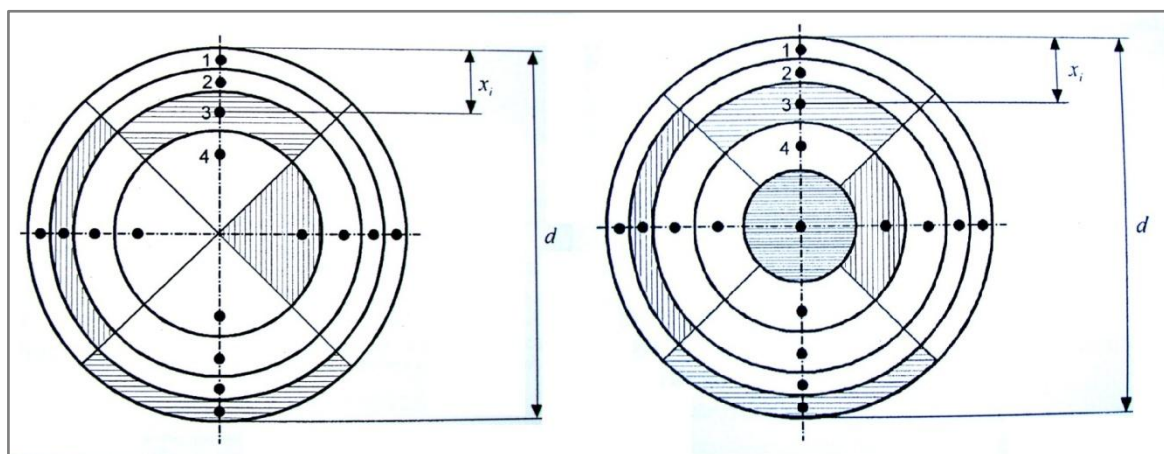
5.5.1 Stanovenie meracích bodov v meracom priereze potrubia

Počet a umiestnenie meracích bodov v meracom priereze je nutné určiť pre meranie rýchlostného poľa a následný výpočet strednej prierezovej rýchlosti v meracom priereze. Minimálny počet meracích bodov je daný rozmermi meracieho prierezu. Vo všeobecnosti tento počet rastie so zväčšujúcou sa plochou prierezu potrubia [35]. Najmenší počet bodov je daný tab. 5.1.

Tab. 5.1 Najmenší počet meracích bodov pre potrubie kruhového prierezu [35]

<i>Prierez vzorkovacieho prierezu (plochy) [m²]</i>	<i>Priemer potrubia [m]</i>	<i>Najmenší počet vzorkovacích priamok (priemerov)</i>	<i>Najmenší počet vzorkovacích bodov v priereze (ploche)</i>
<0,1	<0,35	-	1
0,1 až 1,0	0,35 až 1,1	2	4
1,0 až 2,0	1,1 až 1,6	2	8
>2,0	>1,6	2	najmenej 12 a 4 na 1 m ²

Plocha meracieho prierezu sa delí na časti s rovnakou veľkosťou plochy a rýchlosťou prúdenia sa meria v geometrickom strede každej časti ako je zobrazené na obr. 5.2. Pri tomto meraní platí podmienka, že žiadny bod nesmie ležať vo vzdialenosti od steny potrubia menšej než 20 mm [35].



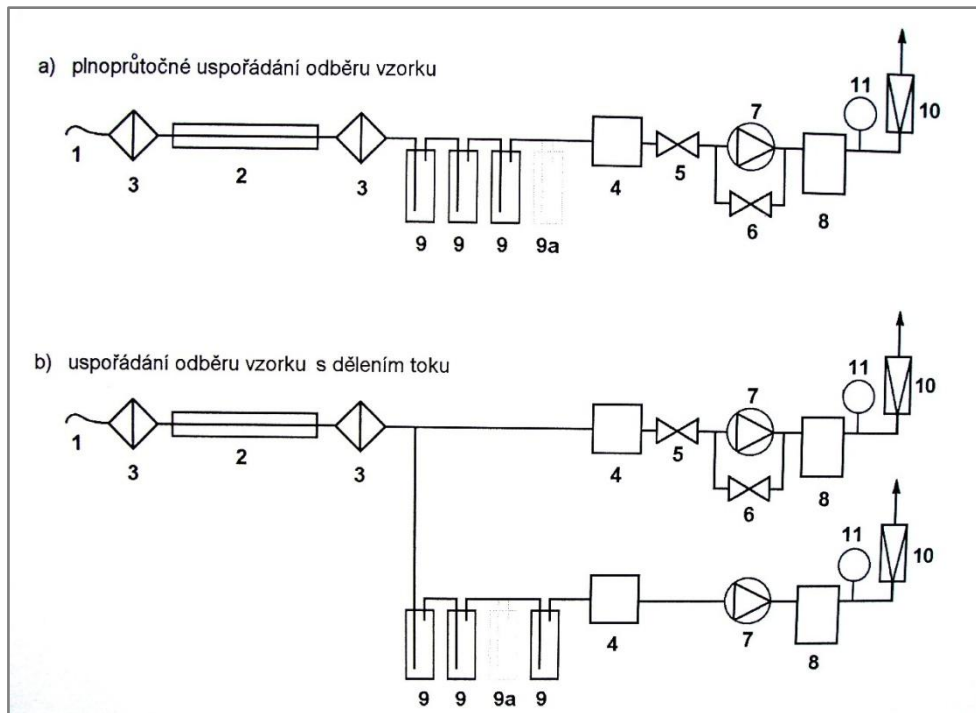
Obr. 5.2 Rozdelenie prierezu na čiastkové plochy [35]

Prierez sa volí v úseku dlhého rovného potrubia, kde možno predpokladať ustálené a rovnomerné prúdenie .

5.6 Stanovenie celkových emisií As, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl a V

Podstatou metódy je odber vzoriek plynu z potrubia alebo z komína v určitom časovom intervale. Odber prebieha v určitom časovom intervale a izokineticky, čo znamená, že prúd plynu odoberanej vzorky má rovnakú rýchlosť ako hlavný prúd plynu v potrubí. Prachové častice sa zachytávajú na filtri a plyn ďalej prechádza sériou absorbentov, ktoré obsahujú absorpčné roztoky. Na analýzu sa využíva filter, absorpčný roztok a oplachový roztok. Výsledky analýzy sa vyjadrujú ako celková hmotnostná koncentrácia pre každý určený prvok, pričom sa nerozlišuje podiel zachytený na filtri a v absorpčnom roztoku [33].

Vzorkovacie zariadenie pozostáva z častí uvedených na obr. 5.3:



Obr. 5.3 Príklad vzorkovacej trate pre izokinetický odber vzoriek [33]

- | | |
|--|------------------------------|
| 1 – hubica sondy | 7 – čerpadlo |
| 2 – sonda | 8 – plynomer |
| 3 – filter (pred sondou alebo za sondou) | 9 – absorbér |
| 4 – odlučovač vodnej pary | 9a – poistná fľaša |
| 5 – uzatvárací ventil hlavnej vetvy | 10 – prietokomer |
| 6 – obtokový ventil | 11 – meranie teploty a tlaku |

Vyjadrovanie výsledkov podľa normy ČSN EN 14385

Objem plynu za normálnych podmienok

$$V_0 = V_{meas} \cdot \frac{T_0}{T_{meas}} \cdot \frac{p_{meas}}{p_0} \quad (5.1)$$

V_0 – objem suchého plynu s obsahom kyslíku za normálnych podmienok v [m³] alebo [l]

V_{meas} - objem suchého plynu za meranej teploty a tlaku v [m³] alebo [l]

T_0 – teplota plynu s obsahom kyslíku za normálnych podmienok v [K]

T_{meas} – meraná teplota za meraného tlaku v [K]

p_{meas} – meraný tlak plynu za meranej teploty v [kPa]

p_0 – tlak plynu s obsahom kyslíku za normálnych podmienok v [kPa]

Celkový obsah prvku

1) pre plnoprietočné usporiadanie zobrazené na obr. 5.3a

$$\beta_{El} = \frac{m_{El,sol} + m_{El,gas}}{V_{main}} \quad (5.2)$$

$m_{El,gas}$ – celkový obsah určeného prvku v oplachu vzorkovacej trate a v absorbéroch v [mg]

2) pre usporiadanie s delením toku vzorky plynu podľa obr. 5.3b

$$\beta_{El} = \frac{m_{El,sol}}{V_{main} + V_{side}} + \frac{m_{El,gas}}{V_{side}} \quad (5.3)$$

β_{El} – hmotnostná koncentrácia určeného prvku v [mg/m^3]

$m_{El,sol}$ – celkový obsah určeného prvku v oplachu hlavnej vetvy vzorkovacej trate a vo filtri v [mg]

$m_{El,gas}$ – celkový obsah určeného prvku v oplachu vedľajšej vetvy vzorkovacej trate a v absorbéroch v [mg]

V_{main} – objem suchého plynu za normálnych podmienok v hlavnej vetve v [m^3] alebo [l]

V_{side} – objem suchého plynu za normálnych podmienok vo vedľajšej vetve v [m^3] alebo [l]

Celkový obsah prvku porovnaný s limitnými hodnotami

$$\beta_{El,nom} = \frac{21-11}{21-O_{meas}} \cdot \beta_{El} \quad (5.4)$$

$\beta_{El,nom}$ – celková hmotnostná koncentrácia prvku v [mg/m^3]

21 – obsah kyslíku v atmosfére (vyjadrený v %)

11 – vzťažný obsah kyslíku udaný v uvedenej smernici (vyjadrený v %)

O_{meas} – nameraný stredný obsah kyslíku v priebehu odberu vzorky (vyjadrený v objemovom zlomku)

5.7 Stanovenie emisií ortuti

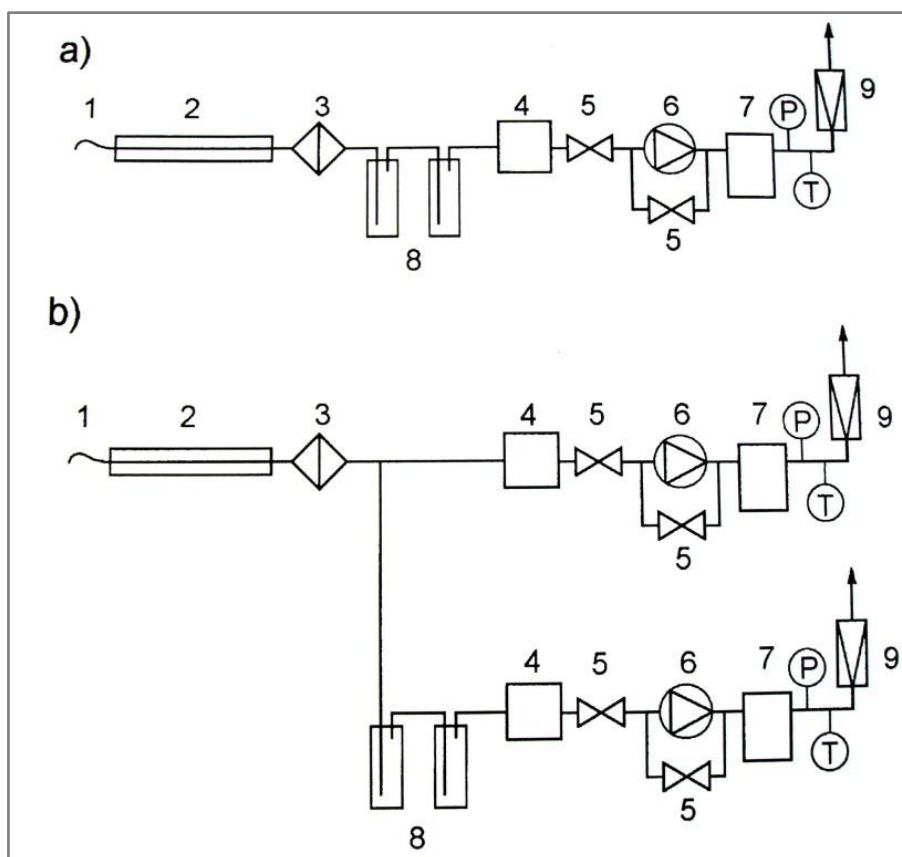
Podstatou stanovenia emisií ortuti je riadený odber reprezentatívnej vzorky z prúdu odpadného plynu v určitom časovom intervale. Pevné častice, ktoré sú unášané prúdiacim plynom sa zachytávajú na filtri a vzorka plynu ďalej prechádza absorbérmi, ktoré obsahujú vhodný absorpčný roztok na záchyt plynných zlúčenín ortuti. Analyzuje sa mineralizovaný prach z filtra a upravené absorpčné roztoky [34].

Ortuť je vo vzorkovanom plyne prítomná hlavne v plynnej fáze, avšak možno ju nájsť aj v pevnej fáze a kvapôčkach, ktoré sú súčasťou aerosólu vychádzajúceho z mokrých pračiek. V prípade izokinetického odberu musia byť prachové častice, kvapôčky aj odpadný plyn vzorkované jediným zariadením s ohľadom na nestabilitu pomeru medzi jednotlivými formami výskytu ortuti vo vzorke. Neizokineticky sa vzorkujú plynne zlúčeniny, a to v prípade, že obsah ortuti v pevnej fáze a kvapôčkach je menší ako $1\mu\text{g}/\text{m}^3$, alebo ak v odpadnom plyne nie sú prítomné kvapky aerosólu a maximálny pomer lokálnych rýchlostí prúdenia plynu v ktorýchkoľvek dvoch meracích bodoch nepresiahne veľkosť 1,2 [34].

Zariadenie pre izokinetický odber možno použiť v dvoch usporiadaniach vzorkovacej trate, tzv. plnoprietočné usporiadanie a usporiadanie s delením toku. Výber usporiadania závisí na type použitých absorbérov. V plnoprietočnom usporiadaní prechádza celá vzorka odpadného plynu cez absorbéry a v usporiadaní s delením toku prechádza absorbérmi iba časť vzorkovaného plynu [34].

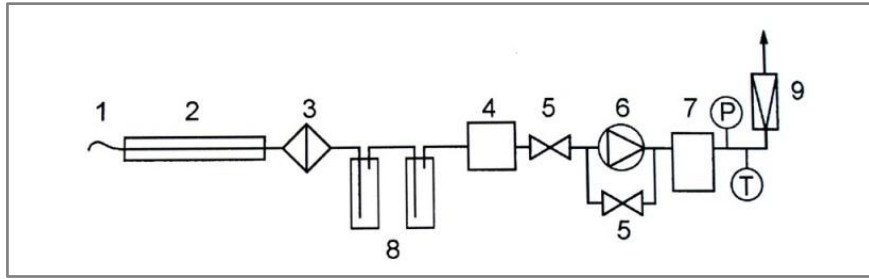
Zariadenie pre neizokinetický odber je spravidla rovnaké ako v prípade izokinetického plnoprietočného usporiadania [34].

Vzorkovacie zariadenie a jeho časti sú zobrazené na obr. 5.4 a obr. 5.5.



Obr. 5.4 Príklad vzorkovacej trate pre izokinetický odber vzorky [33]

- a) jednoduchá vzorkovacia trať – plnoprietočné usporiadanie
- b) vzorkovacia trať s delením toku



Obr. 5.5 Príklad vzorkovacej trate pre neizokinetický odber vzorky [33]

1 – hubica sondy	5 – regulačný ventil	9 – prietokomer
2 – sonda	6 – čerpadlo	P – tlakomer
3 – filter	7 – plynomer	T – teplomer
4 – odlučovač vodnej pary	8 – absorbér	

Vyjadrovanie výsledkov podľa normy ČSN EN 13211

Celkový obsah ortuti v odpadnom plyne

a) pre jednoduché usporiadanie vzorkovacej trate

$$c_{Hg} = \frac{m_{filtr} + m_{oplach} + m_{absorbér}}{V_{hlavní} \cdot 1000} \quad (5.5)$$

b) pre usporiadanie s delením toku vzorky, tzn. s hlavnou a vedľajšou vetvou vzorkovacej trate

$$c_{Hg} = \left(\frac{m_{filtr} + m_{oplach}}{V_{hlavní} + V_{vedlejší}} + \frac{m_{absorbér}}{m_{absorbér}} \right) \cdot \frac{1}{1000} \quad (5.6)$$

c_{Hg} – celková hmotnostná koncentrácia ortuti v suchom odpadnom plyne za normálnych stavových podmienok v [mg/m^3]

m_{filtr} – hmotnosť ortuti na filtri v [μg]

m_{oplach} – hmotnosť ortuti v oplachovom roztoku v [μg]

$m_{absorbér}$ – celková hmotnosť ortuti v oboch absorbéroch v [μg]

$V_{hlavní}$ – celkový objem vzorky, ktorý prešiel hlavnou vetvou vzorkovacej trate po prepočte na stav suchého plynu a normálne stavové podmienky v [m^3]

$V_{vedlejší}$ – celkový objem vzorky, ktorý prešiel vedľajšou vetvou vzorkovacej trate po prepočte na stav suchého plynu a normálne stavové podmienky v [m^3]

Celkový obsah ortuti po prepočte na vzťažný obsah kyslíku

$$C_{Hgstref} \cdot O_2\% = C_{Hg} \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_{2,meas,dry}} \quad (5.7)$$

$C_{Hgstref, O_2\%}$ - celková hmotnostná koncentrácia ortuti v suchom odpadnom plyne po prepočte na vzťažný obsah kyslíku v [mg/m^3]

$O_{2,ref}$ – vzťažný obsah kyslíku vyjadrený jeho objemovým zlomkom

$O_{2,meas,dry}$ – obsah kyslíku nameraný v spalinách vyjadrený jeho objemovým zlomkom po prepočte na stav suchého plynu

5.8 Odber tuhých znečisťujúcich látok a kovov

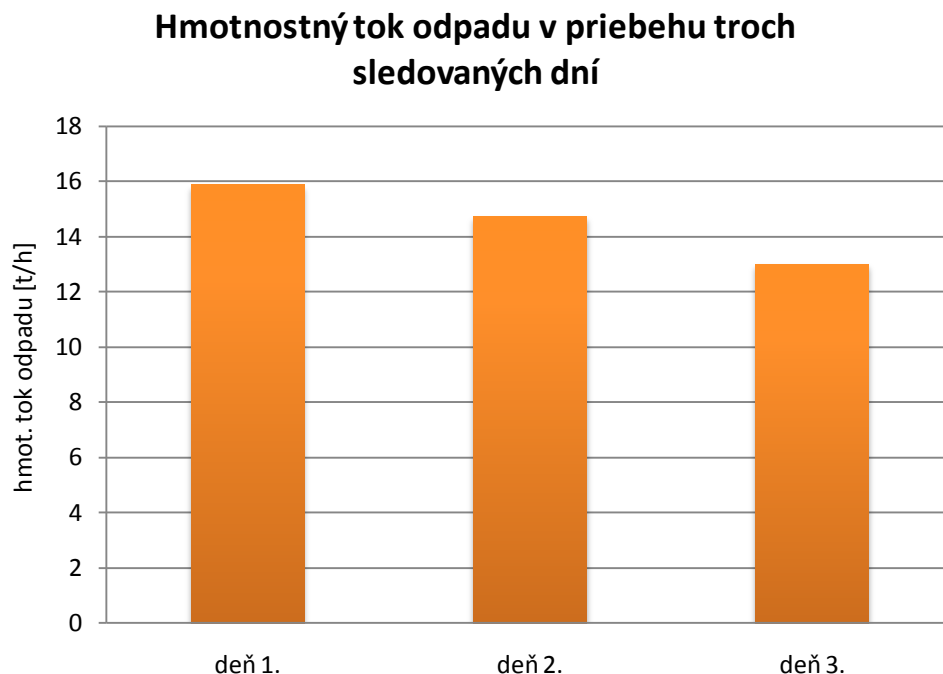
Protokol merania TESO pre spaľovňu SAKO Brno, a.s. popisuje stanovenie obsahu TZL a ťažkých kovov odberovou aparátúrou TESO GTE. Jedná sa o izokinetický odber s absorpciou do kvapaliny. Bola použitá odberová sonda s výmennou hubicou a externý vyhrievaný zachytávač. Na zachytávanie častíc sa používa rovinný filter, ktorý má účinnosť zachytenia 99,97 % pre častice veľkosti 0,5-0,3 μm . Odberovou sondou sa odoberajú vzorky TZL a ťažkých kovov, ktoré sa chladia v sklenenom prietokovom chladiči a následne kondenzujú v kondenzačnej nádobke. Kondenzát sa potom vedie do sériovo radených penových absorbérov s absorpčným roztokom, ktorý obsahuje 0,25 M $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ a 20 % $\text{KMnO}_4 + \text{HNO}_3$. Absorpčný roztok s absorbovanými znečisťujúcimi látkami sa ďalej suší v sušiackej veži. Vzorky sa odoberajú nasatím do sondy, ktoré je zabezpečené zdrojom satia – suchou lamelovou vývevou Becker s riadením výkonu. Bezpečnosť odberu vzoriek je zaistená prepojovacími hadicami s rýchlospojkami [36].

Exponovaný filter sa potom predal akreditovanému laboratóriu ALS Czech Republic s.r.o v Prahe [36].

6 BILANCIA ZNEČIŠŤUJÚCICH LÁTOK V SPALINÁCH SPAĽOVNE KOMUNÁLNEHO ODPADU

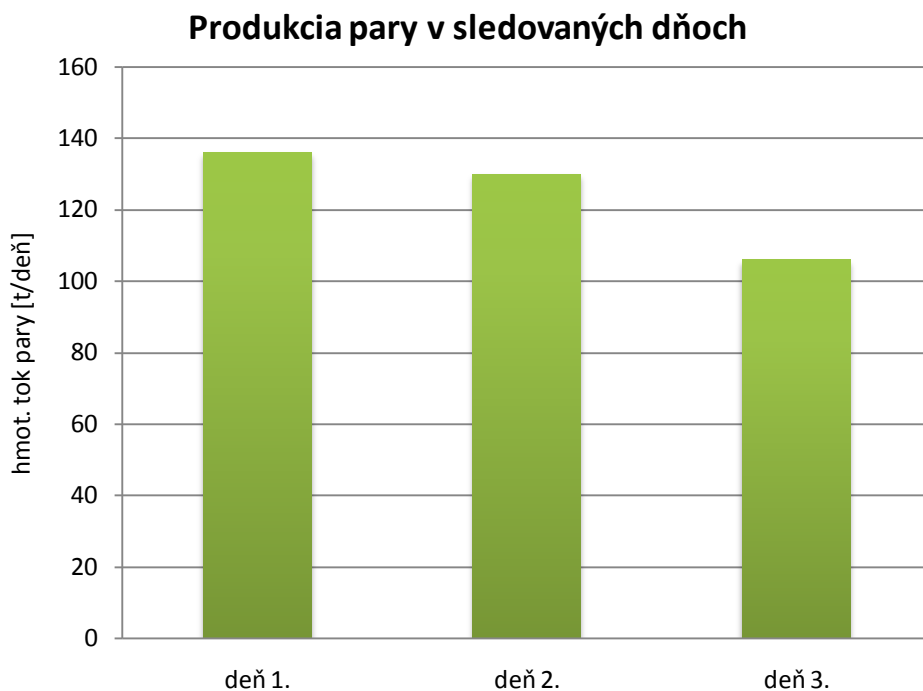
6.1 Prevádzkové podmienky merania

Meranie prevádzkových a výstupných parametrov prebiehalo počas troch dní a je spracované v protokole merania. Protokol obsahuje tabuľky hodnôt prietoku spalín, koncentrácií a hmotnostných tokov plyných a tuhých znečisťujúcich látok, kovov a halogénov v spalinách a tabuľky hodnôt obsahu kovov v tuhých zvyškoch. Prevádzkové parametre zahŕňajú grafy zaznamenávajúce množstvo spáleného odpadu a jeho výhrevnosť v 20 minútových intervaloch a tabuľky hodnôt, obsahujúce množstvo vyrobenej pary v 10 minútových intervaloch. Tieto hodnoty boli pre účel práce spravidla aritmetickým priemerom a spracované v grafoch hmotnostných tokov, graf 6.1 pre hmotnostný tok odpadu na vstupe do procesu v prúde (0) a graf 6.2 pre produkciu pary v sledovaných dňoch.



Graf 6.1 Vstupný hmotnostný tok odpadu v priebehu troch sledovaných dní

Na grafe vyššie je vidieť, že hmotnostný tok vstupujúceho odpadu v daných dňoch príliš nekolísala a jeho hodnotám odpovedá aj množstvo vyprodukovanej pary v sledovaných dňoch znázornené v grafe produkcie pary.



Graf 6.2 Produkcia pary v sledovaných dňoch

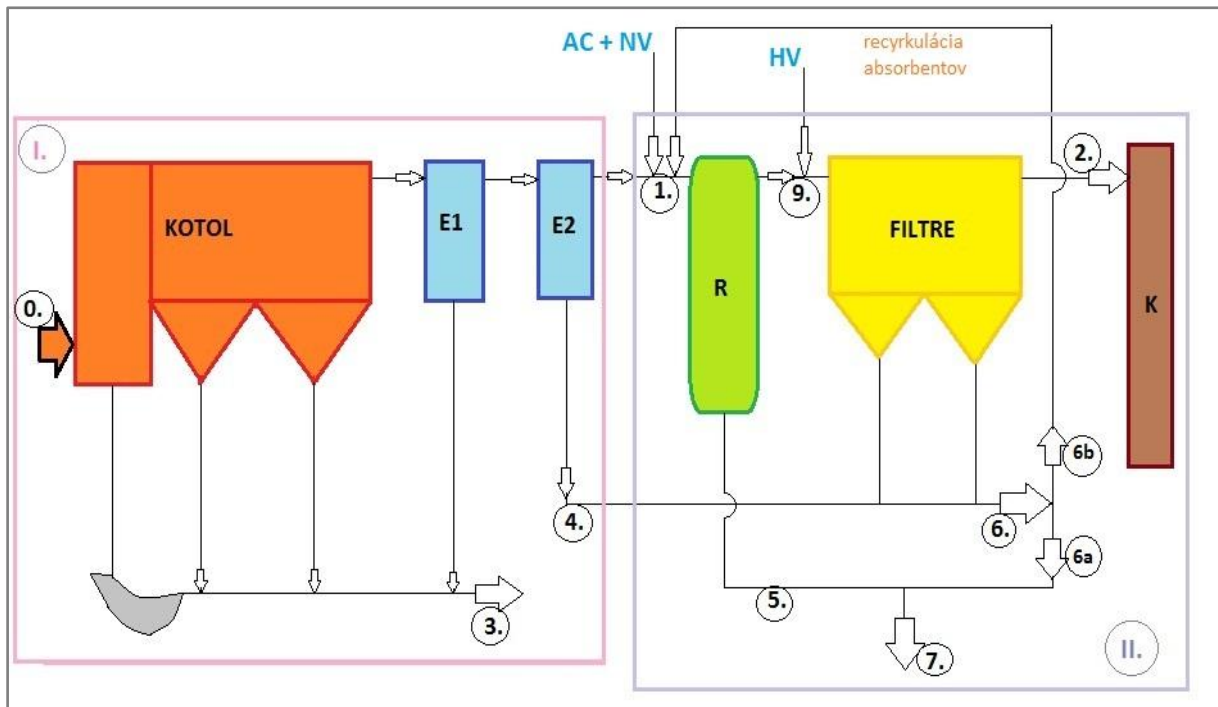
Zariadenie umožňuje spaľovanie odpadov s výhrevnosťou cez 15000 kJ/kg, pričom vyrobí prehriatu paru, ktorá má na výstupe z kotla teplotu 400 °C a tlak 4 MPa. Spaľovňa za rok vyrobila približne 34,1 GWh elektrickej energie a 909535 GJ tepelnej energie pri fonde pracovného času 8271 h/r. Prevádzkové podmienky merania sú zhrnuté v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Prevádzkové podmienky spaľovania

Množstvo spáleného odpadu [t/h]	14,737
Množstvo vyrobenej pary [t/deň]	124
Fond pracovného času jedného kotla [h/r]	8271
Vyrobená elektrická energia [GWh]	34,1
Vyrobená tepelná energia [GJ]	909535
Parametre prehriatej pary	
Teplota [°C]	400
Tlak [MPa]	4

6.2 Materiálová bilancia spaľovne

Materiálová bilancia začala definovaním kľúčových uzlov spaľovania. Tieto uzly sa vyznačili v technologickej schéme, ako zobrazuje obr. 6.1.



Obr. 6.1 Schéma materiálovej bilancie znečisťujúcich látok

- | | |
|------------------------------------|--|
| I. – okruh spaľovania | 7 – end produkt |
| II. – okruh čistenia spalín | 9 – spaliny za reaktorom |
| 0 – vstup odpadu do kotla | E1 – ekonomizér 1 |
| 1 – spaliny za kotlom | E2 – ekonomizér 2 |
| 2 – spaliny za filtrom | R – reaktor |
| 3 – škvara | K – komín |
| 4 – odpad z ekonomizéra 2 | AC + NV – prídavok aktívneho uhlia
a nehaseného vápna |
| 5 – odpad z reaktoru | HV – prídavok haseného vápna |
| 6 – odpad z filtra a ekonomizéra 2 | |

Na vstupe odpadu do kotla v prúde (0) bol jeho hmotnostný tok známy z protokolu merania [36]. Aritmetickým priemerom hodnôt z 20 minútových intervalov počas troch dní sa určil hmotnostný tok odpadu na vstupe. Spolu s ostatnými vstupnými dátami, ktoré zahŕňajú hmotnostný tok TZL v prúde za kotlom (1) a za filtrom (2), hmotnostný tok škvary v prúde (3) a hmotnostný tok end-produktu v prúde (7), je zapísaný v tab. 6.2.

Tab. 6.2 Vstupné hodnoty hmotnostných tokov pre výpočet bilancie spaľovne

Vstupné hodnoty pre výpočet	Hmotnostný tok [kg/h]
Odpad	14737,00
Za kotlom	268,00
Za filtrom	0,163
Škvara	3914,62
End-produkt	433,91

Ďalej sa zapísali hodnoty hmotnostných tokov potrebných pre výpočet bilancie spaľovne, a to hmotnostný tok prídavku haseného vápna do prúdu (9) a prídavku aktívneho uhlia a nehaseného vápna do prúdu (1). Tieto hodnoty boli získané od prevádzkovateľa spaľovne SAKO Brno, a.s. Hmotnostný tok TZL v odpade z reaktora v prúde (5) je definovaný ako 1 % z celkovej hmotnosti všetkých prúdov vstupujúcich do reaktora. Pre zjednodušenie výpočtov sa urobil predpoklad hmotnosti TZL v prúde (4). Tieto hodnoty sú zaznamenané v tab. 6.3.

Tab. 6.3 Hmotnostný tok TZL a reagentov v jednotlivých prúdoch

Číslo toku	Názov toku	Hmotnostný tok [kg/h]
0	vstup do kotla	14737,00
1	za kotlom	268,00
2	za filtrom (výstup)	0,163
3	škvara	3914,62
4	ekonomizér II (odpad)	50,00
5	reaktor (odpad)	20,44
6	ekonomizér II + filter (odpad)	2067,35
7	End produkt	433,91
9	za reaktorom (spaliny)	2034,14
AC	aktívne uhlie	2,50*
NV	nehasené vápno	120,04*
HV	hasené vápno	10,17*

* hodnoty získané od prevádzkovateľa spaľovne

Známe boli aj hmotnostné toky ŤK v prúdoch: za kotlom (1), za filtrom (2), v škvare (3), v odpade z ekonomizéra II (4), v odpade z reaktora (5) a v odpade z ekonomizéra II+filtra (6). Hodnoty hmotnostných tokov ŤK vo vyznačených prúdoch sú uvedené v tab. 6.4. Lepšiu predstavu o distribúcii ťažkých kovov dáva percentuálne zastúpenie ich hmotnostných tokov v jednotlivých prúdoch uvedené v tab. 6.5. Výpočet hmotnostného toku ŤK pre prúdy (7) a (9) je pre účel práce nepotrebný.

Tab. 6.4 Hmotnostný tok ŤK v jednotlivých prúdoch

<i>Hmotnostný tok [g/h]</i>	<i>za kotlom</i>	<i>za filtrom (výstup)</i>	<i>škvara</i>	<i>ekonomizér II (odpad)</i>	<i>reaktor (odpad)</i>	<i>ekonomizér II + filter (odpad)</i>
Antimón	153,87	0,101	80,78	13,41	3,14	663,90
Arzén	15,58	0,450	20,07	1,58	0,31	61,67
Chróm	87,42	0,772	199,45	7,18	0,9	141,22
Kadmium	43,04	0,020	4,87	2,06	0,67	145,00
Kobalt	8,00	0,036	38,13	1,33	0,11	22,83
Mangán	446,78	1,536	2057,22	69,04	6,96	1265,58
Meď	227,89	13,328	1078,78	16,90	3,83	756,68
Nikel	99,27	2,684	149,273	3,59	0,32	57,95
Olovo	722,94	0,310	403,92	29,92	14,14	2872,28
Ortuť	6,99	1,241	1,05	0,05	0,37	47,11
Tárium	1,11	0,001	1,00	0,02	0,005	0,67
Vanád	12,79	0,011	82,79	2,39	0,21	39,83

Tab. 6.5 Percentuálna bilancia ťažkých kovov v jednotlivých prúdoch

<i>[%]</i>	<i>vstup do kotla</i>	<i>za kotlom</i>	<i>za filtrom (výstup)</i>	<i>škvara</i>	<i>ekonomizér II (odpad)</i>	<i>reaktor (odpad)</i>	<i>ekonomizér II + filter (odpad)</i>
Antimón	100	62,03	0,04	32,56	5,40	1,26	60,72
Arzén	100	41,85	0,12	53,90	4,25	0,83	40,90
Chróm	100	29,73	0,26	67,83	2,44	0,30	29,16
Kadmium	100	86,13	0,04	9,74	4,13	1,33	84,75
Kobalt	100	16,85	0,08	80,35	2,80	0,24	16,53
Mangán	100	17,36	0,06	79,95	2,68	0,27	17,03
Meď	100	17,22	1,01	81,50	1,27	0,29	15,92
Nikel	100	39,37	1,06	59,20	1,42	0,12	38,18
Olovo	100	62,50	0,03	34,92	2,58	1,22	61,25
Ortuť	100	86,37	15,33	13,01	0,61	4,58	66,46
Tárium	100	52,10	0,05	46,96	0,93	0,24	51,81
Vanád	100	13,05	0,01	84,51	2,43	0,21	12,83

Prúd (6) sa delí na dve časti, kde 20 % z jeho hmotnostného toku odchádza do prúdu (7) ako end-produkt a 80 % sa recirkuluje do prúdu (1). Hodnota tohto prúdu sa počítala iteráciou z odhadnutej hodnoty. Predpokladalo sa, že 20 % hmotnostného toku TZL v prúde (6) je rozdielom hmotnostných tokov TZL v prúde (7) a v prúde (5).

Odhad hmotnostného toku TZL v prúde (6)

$$\dot{M}_{(6a)} = \dot{M}_{(7)} - \dot{M}_{(5)}, \quad (6.1)$$

kde $\dot{M}_{(6a)}$ – 20 % hmotnostného toku TZL v prúde (6),

$\dot{M}_{(7)}$ – hmotnostný tok TZL v prúde (7),

$\dot{M}_{(5)}$ – hmotnostný tok TZL v prúde (5).

Potom sa dopočítal hmotnostný tok odpovedajúci 80 % hmotnostného toku prúdu (6) podľa

$$\dot{M}_{(6b)} = \frac{\dot{M}_{(6a)} \cdot 0,8}{0,2}, \quad (6.2)$$

kde $\dot{M}_{(6b)}$ – 80 % hmotnostného toku TZL v prúde (6).

Po dosadení (6.1) do (6.2) sa získa

$$\dot{M}_{(6b)} = \frac{(\dot{M}_{(7)} - \dot{M}_{(5)}) \cdot 0,8}{0,2}. \quad (6.3)$$

Odhad hmotnostného toku TZL v prúde (6) je potom

$$\dot{M}_{(6)} = \dot{M}_{(6a)} + \dot{M}_{(6b)}, \quad (6.4)$$

kde $\dot{M}_{(6)}$ – hmotnostný tok TZL v prúde (6).

Výpočet hmotnostného toku TZL v prúde (5)

$$\dot{M}_{(5)} = 0,01 \cdot (\dot{M}_{(1)} + \dot{M}_{AC} + \dot{M}_{NV} + 0,8 \cdot \dot{M}_{(6)}), \quad (6.5)$$

kde $\dot{M}_{(5)}$ – hmotnostný tok TZL v prúde (5),

$\dot{M}_{(1)}$ – hmotnostný tok TZL v prúde (1),

\dot{M}_{AC} – hmotnostný tok prídavku aktívneho uhlia do prúdu (1),

\dot{M}_{NV} – hmotnostný tok prídavku nehaseného vápna do prúdu (1).

Výpočet hmotnostného toku TZL v prúde (9)

$$\dot{M}_{(9)} = \dot{M}_{(1)} - \dot{M}_{(5)} + 0,8 \cdot \dot{M}_{(6)} + \dot{M}_{AC} + \dot{M}_{NV} + \dot{M}_{HV}, \quad (6.6)$$

kde $\dot{M}_{(9)}$ – hmotnostný tok TZL v prúde (9)

\dot{M}_{HV} – hmotnostný tok prídavku haseného vápna do prúdu (9).

Dosadením (6.5) do (6.3) dostávame iteračnú rovnicu pre výpočet hmotnostného toku TZL v prúde (6). Počiatočnou hodnotou výpočtu bola odhadnutá hodnota hmotnostného toku TZL v prúde (6). Iterácia bola urobená v programe MS Excel funkciou „Citlivostná analýza“. Po výpočte sa získal výsledok uvedený v tab. 6.3 pre prúd (6). V závislosti na tejto hodnote sa prepočítali hmotnosti TZL v prúdoch (5) a (9).

6.3 Výsledky merania

Cieľom práce bolo zistiť zloženie vstupného odpadu (hmotnostné toky ŤK na vstupe do procesu), ukázať ako účinne sa spaliny čistia na spaľovni SAKO Brno, a.s. a popísať distribúciu jednotlivých ŤK v procese spaľovania.

Zloženie odpadu je určené hmotnostným tokom každého ťažkého kovu na vstupe do kotla. Tento hmotnostný tok vstupov, uvedený v tab. 6.6, sa vypočítal podľa vzťahu (6.7), a to na základe distribúcie prvkov v technologických uzloch, ktorá je pre každý prvok zobrazená v prílohe 1 až 12.

Tab. 6.6 Zloženie odpadu na vstupe do kotla

ŤAŽKÉ KOVY	Hmotnostný tok na vstupe [kg/h]
Antimon	0,248
Arzén	0,037
Chróm	0,294
Kadmium	0,050
Kobalt	0,047
Mangan	2,573
Meď	1,324
Nikel	0,252
Olovo	1,157
Ortuť	0,008
Tálium	0,002
Vanád	0,098
SPOLU	6,091

Hmotnostný tok prvku na vstupe do kotla v prúde (0)

$$\dot{M}_{\check{T}K,(0)} = \dot{M}_{\check{T}K,(1)} + \dot{M}_{\check{T}K,(3)} + \dot{M}_{\check{T}K,(4)}, \quad (6.7)$$

kde $\dot{M}_{\check{T}K,(0)}$ – hmotnostný tok prvku na vstupe do kotla v prúde (0),

$\dot{M}_{\check{T}K,(1)}$ – hmotnostný tok prvku na výstupe z kotla v prúde (1),

$\dot{M}_{\check{T}K,(3)}$ – hmotnostný tok prvku v škvare v prúde (3),

$\dot{M}_{\check{T}K,(4)}$ – hmotnostný tok prvku v odpade z ekonomizéra II v prúde (4).

Pre výpočet účinnosti čistenia spalín sa porovnal hmotnostný tok ťažkých kovov na výstupe z filtra s hmotnostným tokom kovov na výstupe z kotla. Bolo nutné prepočítať koncentráciu z mg/kg na mg/m³. Je to z dôvodu, že emisné limity dané legislatívou sa uvádzajú v jednotkách mg/m³. Výsledkom bola účinnosť čistenia spalín, uvedená v tab. 6.7.

Tab. 6.7 Účinnosť čistenia spalín

<i>Prvok</i>	<i>1 - za kotlom [mg/m³]</i>	<i>2 - za filtrom [mg/m³]</i>	<i>Účinnosť [%]</i>
Antimón	2,4555	0,0016	99,96
Arzén	0,2487	0,0007	99,88
Chróm	1,3951	0,0123	99,74
Kadmium	0,6869	0,0003	99,96
Kobalt	0,1276	0,0006	99,92
Mangán	7,1299	0,0245	99,94
Meď	3,6368	0,2127	98,99
Nikel	1,5842	0,0428	98,94
Olovo	11,5371	0,0049	99,97
Ortuť	0,1116	0,0198	84,67
Tálium	0,0178	0,0000	99,95
Vanád	0,2041	0,0002	99,99

Distribúcia každého ťažkého kovu v jednotlivých prúdoch je znázornená na diagramoch v prílohách 1 až 12. Na základe týchto diagramov je možné zhodnotiť, v ktorom prúde sa daný prvok odlučuje najlepšie. Niektoré kovy vytvárajú pri spaľovaní s kyslíkom oxidy (čo sú pevné látky), a preto sa odlučujú ako tuhé zvyšky v škvare. Prípadné neodlúčené častice sa zachytia na povrchu aktívneho uhlia a filtráciou sa odstránia z toku spalín. Prchavé kovy, ako je Sb, Cd, Pb a Hg sú prítomné v spalínach v plynnom skupenstve, a preto sú ľahko unášané prúdom spalín až do filtračného stupňa čistenia. Na odstránenie týchto kovov slúži koksový filter a rôzne sorbenty. Prehľad distribúcie kovov je uvedený v tab. 6.8.

Tab. 6.8 Spôsob odlúčenia ŤK v procese spaľovania

<i>Odlúčené v škvare</i>	<i>Odlúčené na filtri</i>	<i>Približne rovnaká distribúcia v škvare a na filtri</i>
Chróm	Antimón	Arzén
Kobalt	Kadmium	Nikel
Mangán	Olovo	Tálium
Meď	Ortuť	
Vanád		

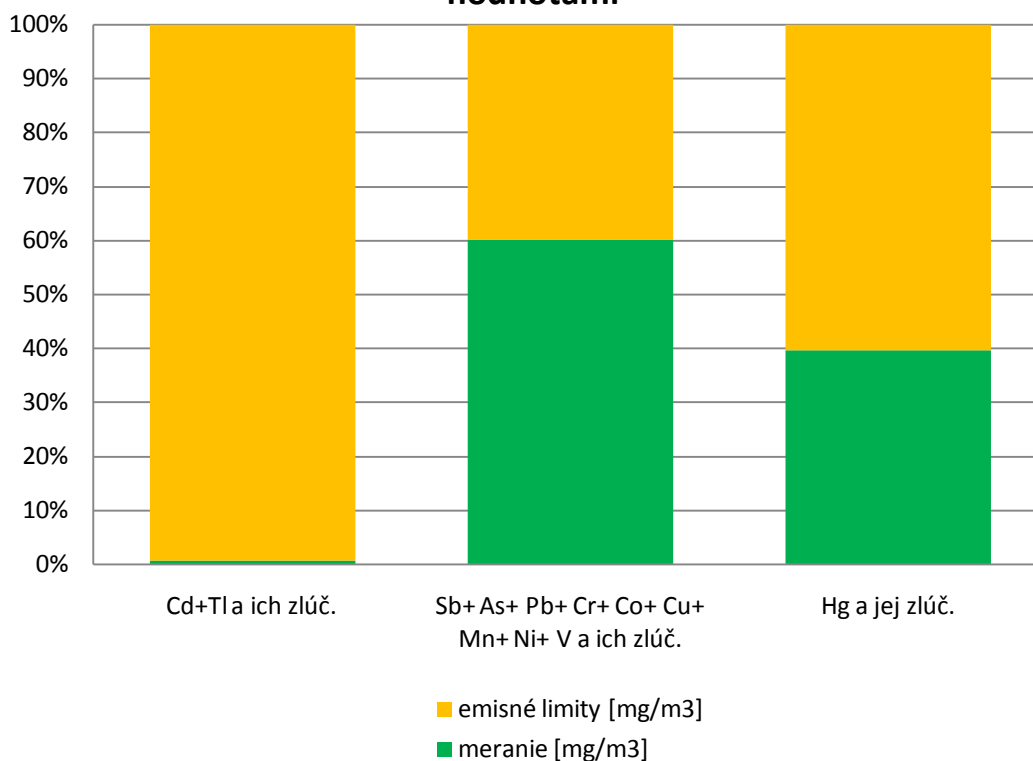
6.4 Zhodnotenie výsledkov bilancie ťažkých kovov a ostatných ZL v spalinách

V práci sa vyhodnocuje množstvo emisií na výstupe zo spaľovacieho procesu a popisuje sa distribúcia ťažkých kovov. Tab. 6.9 porovnáva výsledky nameraných hodnôt emisií ťažkých kovov s hodnotami danými legislatívou. Z tabuľky a graf 6.3 vyplýva, že emisné limity boli dodržané. Rovnako sa postupovalo aj pri vyhodnocovaní ostatných znečisťujúcich látok. Výsledky sú zaznamenané v tab. 6.10 a znázornené na graf 6.4 a graf 6.5. Aj z týchto výsledkov je zrejmé, že emisné limity boli dodržané a systém čistenia spalín v spaľovni SAKO Brno, a.s. pracuje správne.

Tab. 6.9 Porovnanie emisných limitov ZL a výsledkov merania

Znečisťujúce látky	Emisný limit [mg/m³]	Meranie za filtrom [mg/m³]
Cd+Tl a ich zlúč.	0,05	0,0003±0,00026
Sb+ As+ Pb+ Cr+ Co+ Cu+ Mn+ Ni+ V a ich zlúč.	0,5	0,3004±0,20682
Hg a jej zlúč.	0,05	0,0198±0,00954

Porovnanie emisných limitov ŤK s nameranými hodnotami

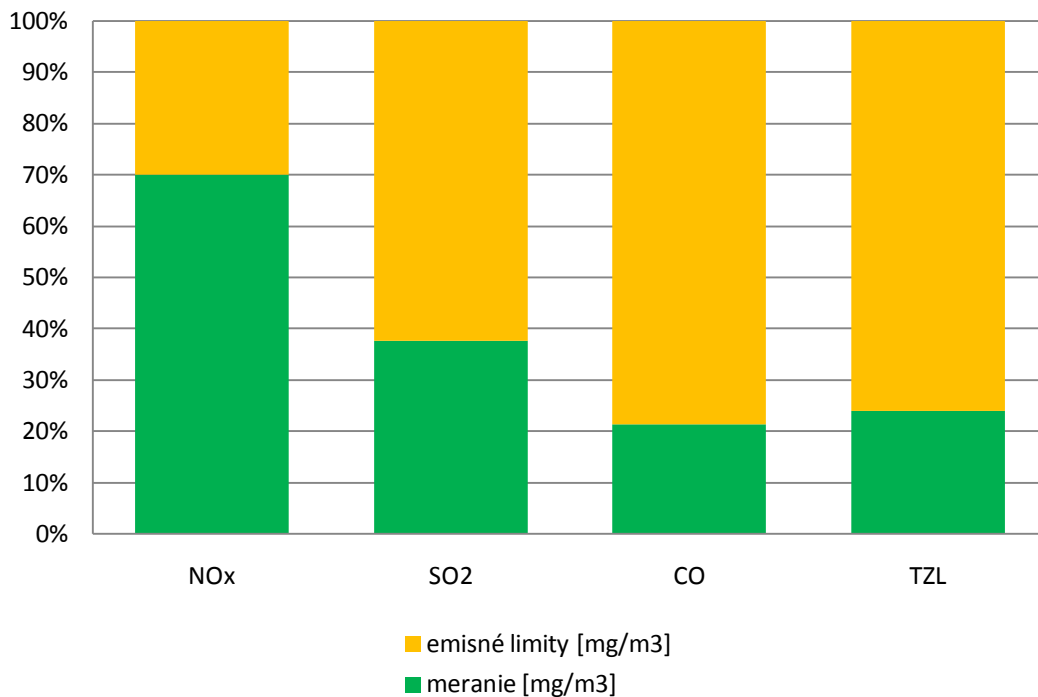


Graf 6.3 Porovnanie emisných limitov ťažkých kovov s nameranými hodnotami

Tab. 6.10 Porovnanie emisných limitov ostatných ZL a výsledkov merania

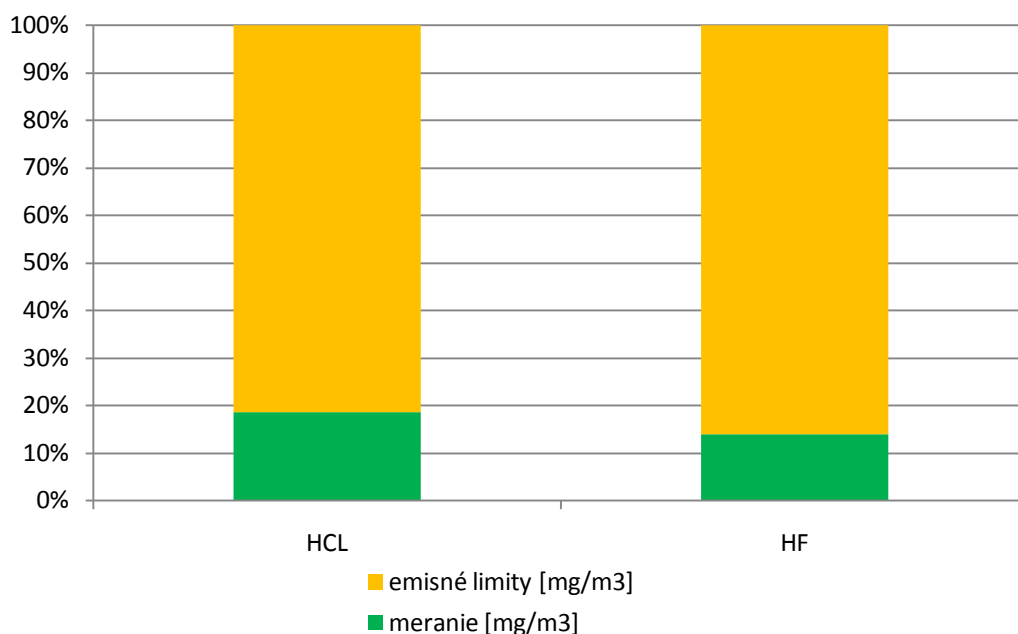
Znečisťujúce látky	Emisný limit [mg/m³]	Meranie za filtrom [mg/m³]
HCl	10	1,86±0,291
HF	1	0,14±0,01
NO_x	200	140,11±3,458
SO₂	50	18,83±3,458
CO	50	10,66±1,657
TZL	10	2,40±0,141

Porovnanie emisných limitov ostatných ZL s nameranými hodnotami



Graf 6.4 Porovnanie emisných limitov ostatných znečisťujúcich látok s nameranými hodnotami

Porovnanie emisných limitov halogénov s nameranými hodnotami



Graf 6.5 Porovnanie emisných limitov halogénov s nameranými hodnotami

6.4.1 Vplyv spaľovania odpadu na distribúciu ťažkých kovov

Ťažké kovy pri spaľovaní vytvárajú prchavé pary alebo častice, ktoré sa dostávajú do životného prostredia spolu so spalinami alebo poletujúcim/škvarovým popolom. Migrácia závisí na fyzikálnych a chemických vlastnostiach ťažkých kovov alebo ich zlúčenín vytvorených počas procesu. Hlavnou príčinou distribúcie ťažkých kovov je charakter zlúčenín a bod varu ŤK. Z toho vyplýva, že ťažké kovy s vysokou teplotou bodu varu sa vyskytujú predovšetkým v škvare, zatiaľ čo prchavé ŤK vytvárajú pary a opúšťajú spaľovaciu zónu spolu so spalinami a kondenzujú na jemné častice. Menej prchavé ŤK sa len málo zúčastňujú chemických reakcií v spaľovacom prostredí. Na druhej strane prchavé ŤK reagujú s inými materiálmi v spaľovacom systéme, pričom vytvárajú druhy s vysokou teplotou varu (napr. oxidy), ktoré taktiež ostávajú v popole [37].

Ďalšími významnými faktormi ovplyvňujúcimi distribúciu ŤK sú fyzikálne a chemické zloženie odpadu, množstvo látok obsahujúcich chlór a procesné faktory, ako sú spaľovacia teplota, tok spalín, množstvo odpadu vstupujúceho do procesu a úroveň jeho vlhkosti a techniky čistenia spalín [37].

Nárast obsahu chlóru v odpade spolu s jeho vlhkosťou spôsobuje pokles prchavosti Pb a Cu. Je to spôsobené premenou viac prchavých chloridov na menej prchavé oxidy kovov. V prípade Cd však prítomnosť chlóru podporuje jeho prchavosť. Existencia elementárnej síry alebo sulfidu zvyšuje retenciu Cd na popol, vďaka tvorbe stabilného sulfidu kademnatého (CdS) v reaktore [37].

7 ZÁVER

V úvodných kapitolách práce je stručne popísané spaľovanie odpadov a priblížený spôsob nakladania s odpadmi vo svete aj v Českej republike a na Slovensku s uvedenou legislatívou pre tieto dva štáty. Aj napriek technologickému pokroku je zjavné, že v ČR a SR prevláda skládkovanie odpadov nad ich energetickým využitím.

Spaľovne odpadov pozostávajú z niekoľkých zariadení, ktorých kombinácia sa prispôbuje typu spaľovacieho procesu tak, aby bola dosiahnutá čo najlepšia konverzia tepelnej energie a čo najnižšie emisie znečisťujúcich látok. V práci sú popísané najvýznamnejšie technologické uzly spaľovacieho procesu. Na druhu privázaného odpadu do spaľovne závisí spôsob jeho predbežného čistenia, druh použitého zariadenia na spaľovanie a v neposlednom rade spôsob čistenia spalín a nakladania s tuhými zvyškami. Účinnosť čistenia spalín sa vyhodnocuje na základe odberu vzoriek emisií na výstupe z tohto stupňa a porovnaním s emisnými limitmi, ktoré sú dané legislatívou. Postupy na odber vzoriek emisií a stanovenie obsahu ťažkých kovov sú dané normami ČSN.

Práca je zameraná na distribúciu ťažkých kovov v spaliniách, preto sa tejto téme venuje najrozsiahlejšou časťou textu. Spaliny pozostávajú z plynov a pár vzniknutých pri dokonalom alebo nedokonalom spaľovaní paliva. Ďalej obsahujú prebytočný atmosférický vzduch a zvyšky po spaľovaní palív. Tieto plyny a zvyšky sa z veľkej časti skladajú z nebezpečných a toxických látok, ako sú oxidy síry, oxidy dusíku, POP, PAH, dioxíny a tiež ťažké kovy. V práci sú popísané zdroje a spôsoby vzniku jednotlivých látok a ich účinky na zdravie ľudí.

Výskyt znečisťujúcich látok v spaliniách závisí na zložení spaľovaného odpadu. Technológia čistenia spalín je zostavená z jednotlivých zariadení tak, aby v čo najväčšej miere obmedzila únik znečisťujúcich látok do ovzdušia. Vznik emisií je možné obmedziť aj v primárnom stupni čistenia ovplyvnením dodávky paliva, prídavkom aditív na podporu úplného spálenia zložiek odpadu alebo modifikáciou spaľovacieho zariadenia (horákov, spaľovacieho vzduchu, výkonu). V sekundárnom stupni čistenia spalín sa mechanicky odlučujú TZL a látky zachytené v absorbentoch. Plynné a prchavé látky sa odstraňujú chemickými reakciami s aditívami.

V rámci tejto práce boli vykonané merania na spaľovni odpadov SAKO Brno, a.s., kedy sa sledovalo množstvo emisií na výstupe zo zariadenia. Na začiatku sa vypočítali hmotnostné a percentuálne toky odpadu a sledovaných ťažkých kovov v jednotlivých prúdoch. Počítalo sa z počiatočných hodnôt zadaných v protokole o meraní. Hmotnostné toky TK sa prepočítali na koncentrácie, vďaka čomu bolo možné namerané hodnoty porovnať s hodnotami emisných limitov. Znázornením účinnosti čistiaceho procesu spaľovne SAKO Brno, a.s. sú grafy porovnávajúce namerané hodnoty s emisnými limitmi.

Zo záverečného porovnania vyplýva, že spaľovňa SAKO Brno, a.s. dodržiava emisné limity vďaka päťstupňovému systému čistenia spalín, v ktorom sa redukujú emisie všetkých sledovaných znečisťujúcich látok.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Technologie: Technologický proces. [online]. [cit. 26.1.2014]. Dostupné z: www.sako.cz
- [2] EVROPSKÁ KOMISE, Generální ředitelství JRC společné výzkumné centrum, Institut perspektivních technologických studií (Seville). *Integrovaná prevence a omezování znečištění: Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů*. červenec 2005. 753 s.
- [3] THE INTERNATIONAL BANK OF RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT. *Decision Makers' Guide to: Municipal Solid Waste Incineration*. Washington, D.C., U.S.A., 1999, 20 s.
- [4] SANTOLERI, Joseph J., Joseph REYNOLDS a Louis THEODORE. *Introduction to hazardous waste incineration*. U.S.A.: A John Wiley & Sons, INC., 2000. ISBN 0-471-01790-6.
- [5] JANKŮ, CSC., Doc. Ing. Josef. VŠCHT PRAHA. *Analytika odpadů: učební texty - čtvrté přepracované vydání*. Praha, 2010.
- [6] European statistics. *Treatment of waste*. Dostupné z: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- [7] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Veřejná databáze: Životní prostředí* [online]. [cit. 3.3.2014]. Dostupné z: <http://vdb.czso.cz/vdbvo/uvod.jsp>
- [8] Student blog. In: [online]. [cit. 2.1.2014]. Dostupné z: <http://blog.ub.ac.id/>
- [9] CIWM: Pre-treatment of Waste. In: [online]. [cit. 8.3.2014]. Dostupné z: <http://www.ciwm.co.uk/CIWM/CIWMHome.aspx>
- [10] BALÁŠ, PH.D., Ing. Marek, Ing. Martin LISÝ, PH.D. a Ing. Jiří MOSKALÍK. *Technická zařízení budov: Kotle - 2. část*. In: *Tzbinfo* [online]. 2.4.2012 [cit. 5.3.2014]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/>
- [11] HUČKO, PH.D., Doc. Ing. Branislav. STU BRATISLAVA. *Elektrárne I: Prednášky*. Dostupné z: http://aladin.elf.stuba.sk/Katedry/KMECH/slovakversion/Predmety/ELEKTRARNE_I/
- [12] Kiln diagrams. In: *Conditions of Experience: A Variety Pack of Architectural Possibility* [online]. 2011 [cit. 8.4.2014]. Dostupné z: <http://d4avp.blogspot.cz/2011/03/kiln-diagrams.html?q=kiln>
- [13] KÓL, Ing. Přemysl. *Spalovací procesy: Spaliny*. 2011. Dostupné z: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/Spaliny.html>
- [14] Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Vyhláška č.415/2012 Sb.*
- [15] Vyhláška č. 410/2012 Z. z., Vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky, ktorou sa vykonávajú niektoré ustanovenia zákona o ovzduší. In: *Vyhláška č.410/2012 Sb.*

- [16] SLOVENSKÁ AGENTÚRA ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA. *Informačná podpora o rizikách a vlastnostiach znečisťujúcich chemických látok: Oxidy síry SO_x/SO₂*. 2005. Dostupné z: http://www.sazp.sk/slovak/struktura/COH/pchb/projekt_2004_01/informacne_listy/11.pdf
- [17] Skupiny chemických látok. *Arnika* [online]. 2010 [cit. 21.3.2014]. Dostupné z: <http://arnika.org/>
- [18] KÉRY, Mgr. G. Etické aspekty ochrany prírody. Voda je život. In: *O škole* [online]. 2012 [cit. 16.3.2014]. Dostupné z: http://www.oskole.sk/?id_cat=1&clanok=18823
- [19] Základní vědomosti o emisích: Spaliny a škodlivé látky. In: *NGK/NTK* [online]. [cit. 12.4.2014]. Dostupné z: <http://www.ngk.de/cz/technicke-detaily/lambdasondy/zakladni-vedomosti-o-emisich/spaliny-a-skodlive-latky/>
- [20] ROVNÝ, PHD., MPH, Prof. MUDr. Ivan. Dioxíny a ich účinky. In: *Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky* [online]. 2012 [cit. 2.5.2014]. Dostupné z: http://www.uvzsr.sk/index.php?option=com_content&view=article&id=1501:dioxiny-a-ich-uinky&catid=56:tlaove-spravy&Itemid=62
- [21] LEGÁTH, J. a F. LEŠNÍK. Problematika dioxínov v životnom prostredí. *Slovenský veterinárny časopis*. 2000, č. 25, s. 10
- [22] Ekologické aspekty záměny fosilních paliv za biomasu: Tuhé znečišťující látky a těžké kovy. In: *Podpora lokálního vytápění biomasou: Ekologie* [online]. [cit. 16.4.2014]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/ekotzl.htm>
- [23] OFFERTÁLEROVÁ, Monika. Tuhé znečišťujúce látky a spôsob ich odstraňovania zo životného prostredia. In: *Enviro portál: Informačný portál rezortu MŽP SR* [online]. 2013 [cit. 9.5.2014]. Dostupné z: <http://www.enviroportal.sk/clanok/tuhe-znecestujuce-latky-a-sposob-ich-odstranovania-zo-zivotneho-prostredia>
- [24] *Správy o životnom prostredí Slovenskej republiky: Správy o stave životného prostredia Slovenskej republiky* [online]. [cit. 23.2.2014]. Dostupné z: http://www.sazp.sk/slovak/periodika/sprava/skladacka/SK/2/6_emisie.pdf
- [25] EKOTOXIKOLOGICKA PROBLEMATIKA TAZKYCH KOVOV METALOIDOV A HALOGENOV U ZVIERAT. In: *Archív informácií o životnom prostredí (ISSN 1335-4175)* [online]. [cit. 28.3.2014]. Dostupné z: <http://www.seps.sk/zp/etp/knihy/26/31.htm>
- [26] EUROPEAN COMMISSION. *IPPC Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách: Velká spalovací zařízení*. 2010.
- [27] IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEA GHG), “CO₂ Capture in the Cement Industry”, 2008/3, July 2008.
- [28] *Principles of Electrostatic Precipitator*. Dostupné z: <https://www.mhi-ms.co.jp/en/products/atmosphere/precipitator/ep/contents/principle.html>
- [29] MLNAŘÍK, J. a J. HRUŠKA. SVÚM VÝZKUMNÉ A TESTOVACÍ CENTRUM MATERIÁLŮ. *Technologické zajímavosti a články z praxe: Přímé měření kyselého rosného bodu ve spalovacích zařízeních*.

- [30] Energetika: Zařízení pro čištění spalin. *Tenza, a.s.* [online]. [cit. 10.2.2014]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cistení-spalin/>
- [31] NO_x Reduction Technologies. In: *American Coal Council* [online]. [cit. 9.3.2014]. Dostupné z: <http://www.americancoalcouncil.org/?page=nox>
- [32] SAKO BRNO, a.s. *PROVOZNÍ ŘÁD: Zařízení pro materiálovou úpravu a energetické využívání odpadů ve spalovně společnosti SAKO Brno, a.s.* Brno, 2010.
- [33] ČSN EN 14385. *Kvalita ovzduší - Stacionární zdroje emisí - Stanovení celkových emisí As, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl a V.* Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [34] ČSN EN 13211. *Kvalita ovzduší – Stacionární zdroje emisí – Manuální metoda stanovení celkové hmotnostní koncentrace rtuti.* Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [35] ČSN ISO 10780. *Stacionární zdroje emisí – Měření rychlosti a objemového průtoku plynů v potrubí.* Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [36] TECHNICKÉ SLUŽBY OCHRANY OVZDUŠÍ BRNO, spol. s r.o. *Protokol o technologickém měření emisí.* Brno, 2011.
- [37] WU, Min-Hao, Chiou-Liang LIN a Wun-Yue ZENG. Effect of waste incineration and gasification processes on heavy metals distribution. *Science Direct: Fuel Processing Technology* [online]. 2014, č. 125 [cit. 20.5.2014]. Dostupné z: www.sciencedirect.com

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1 Nakladanie s komunálnym odpadom v Českej republike za rok 2010 [6]	17
Obr. 1.2 Nakladanie s komunálnym odpadom v Slovenskej republike za rok 2010 [6]	17
Obr. 1.3 Produkcia zmesového komunálneho odpadu v uvedených rokoch v prepočte na jedného obyvateľa a rok [6],[7]	18
Obr. 2.1 Schéma technologického usporiadania spaľovne [8]	19
Obr. 2.2 Pevný rošt [10]	22
Obr. 2.3 Rošty stupňové a presuvné [10]	22
Obr. 2.4 Pásový rošt [11]	23
Obr. 2.5 Rotačná pec [12]	23
Obr. 2.6 Fluidná pec (stacionárna) [2]	24
Obr. 3.1 Proces tvorby kyslých dažďov [18]	30
Obr. 4.1 Primárne opatrenia	35
Obr. 4.2 Sekundárne opatrenia	36
Obr. 4.3 Zariadenie elektrostatického odlučovača [27]	37
Obr. 4.4 Prvá fáza elektrostatického odlučovania TZL – nabíjanie elektród [28]	38
Obr. 4.5 Druhá fáza elektrostatického odlučovania TZL [28]	38
Obr. 4.6 Posledná fáza elektrostatického odlučovania TZL [28]	39
Obr. 4.7 Princíp mokrého elektrostatického odlučovača [28]	39
Obr. 4.8 Znázornenie princípu fungovania tkaninového filtra	40
Obr. 4.9 Cyklón	41
Obr. 4.10 Princíp mokrého prania [26]	42
Obr. 4.11 Absorbér s náplňovou komorou [26]	42
Obr. 4.12 Schéma suchého odsírenia spalín [30]	44
Obr. 4.13 Schéma polosuchého odsírenia spalín [30]	44
Obr. 4.14 Schéma mokrého odsírenia [30]	45
Obr. 4.15 Technologická schéma metódy SNCR [31]	48
Obr. 4.16 Technologická schéma metódy SCR [31]	49
Obr. 4.17 Katalyzátory typu plástov alebo doskové [26]	49
Obr. 5.1 Znázornenie technologického postupu spaľovne SAKO Brno, a.s. [32]	53
Obr. 5.2 Rozdelenie prierezu na čiastkové plochy [35]	57
Obr. 5.3 Príklad vzorkovacej trate pre izokinetický odber vzoriek [33]	58
Obr. 5.4 Príklad vzorkovacej trate pre izokinetický odber vzorky [33]	60
Obr. 5.5 Príklad vzorkovacej trate pre neizokinetický odber vzorky [33]	61
Obr. 6.1 Schéma materiálovej bilancie znečisťujúcich látok	65

Zoznam tabuliek

Tab. 3.1 Emisné limity ZL pre Českú republiku [14].....	28
Tab. 3.2 Emisné limity ZL pre Slovensko [15].....	29
Tab. 3.3 Vplyv reakčnej teploty na vznik oxidov dusíku	30
Tab. 5.1 Najmenší počet meracích bodov pre potrubie kruhového prierezu [35].....	57
Tab. 6.1 Prevádzkové podmienky spaľovania	64
Tab. 6.2 Vstupné hodnoty hmotnostných tokov pre výpočet bilancie spaľovne	66
Tab. 6.3 Hmotnostný tok TZL a reagentov v jednotlivých prúdoch Chyba! Záložka nie je definovaná.	
Tab. 6.4 Hmotnostný tok ŤK v jednotlivých prúdoch	67
Tab. 6.5 Percentuálna bilancia ťažkých kovov v jednotlivých prúdoch.....	67
Tab. 6.6 Zloženie odpadu na vstupe do kotla	69
Tab. 6.7 Účinnosť čistenia spalín.....	70
Tab. 6.8 Spôsob odlúčenia ŤK v procese spaľovania.....	70
Tab. 6.9 Porovnanie emisných limitov ZL a výsledkov merania	71
Tab. 6.10 Porovnanie emisných limitov ostatných ZL a výsledkov merania	72

Zoznam grafov

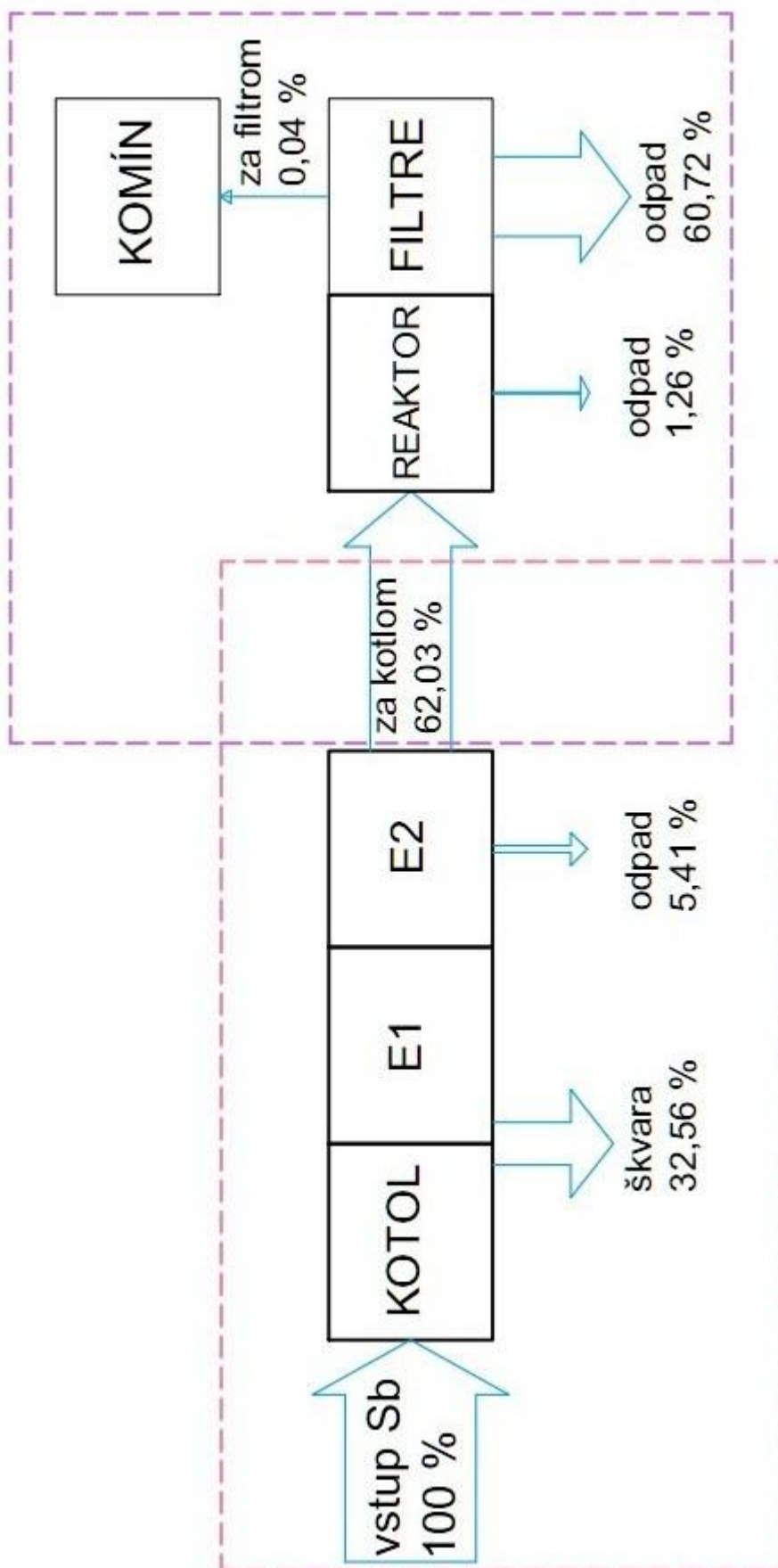
Graf 6.1 Vstupný hmotnostný tok odpadu v priebehu troch sledovaných dní	63
Graf 6.2 Produkcia pary v sledovaných dňoch	64
Graf 6.3 Porovnanie emisných limitov ťažkých kovov s nameranými hodnotami	71
Graf 6.4 Porovnanie emisných limitov ostatných znečisťujúcich látok s nameranými hodnotami	72
Graf 6.5 Porovnanie emisných limitov halogénov s nameranými hodnotami	73

Zoznam príloh

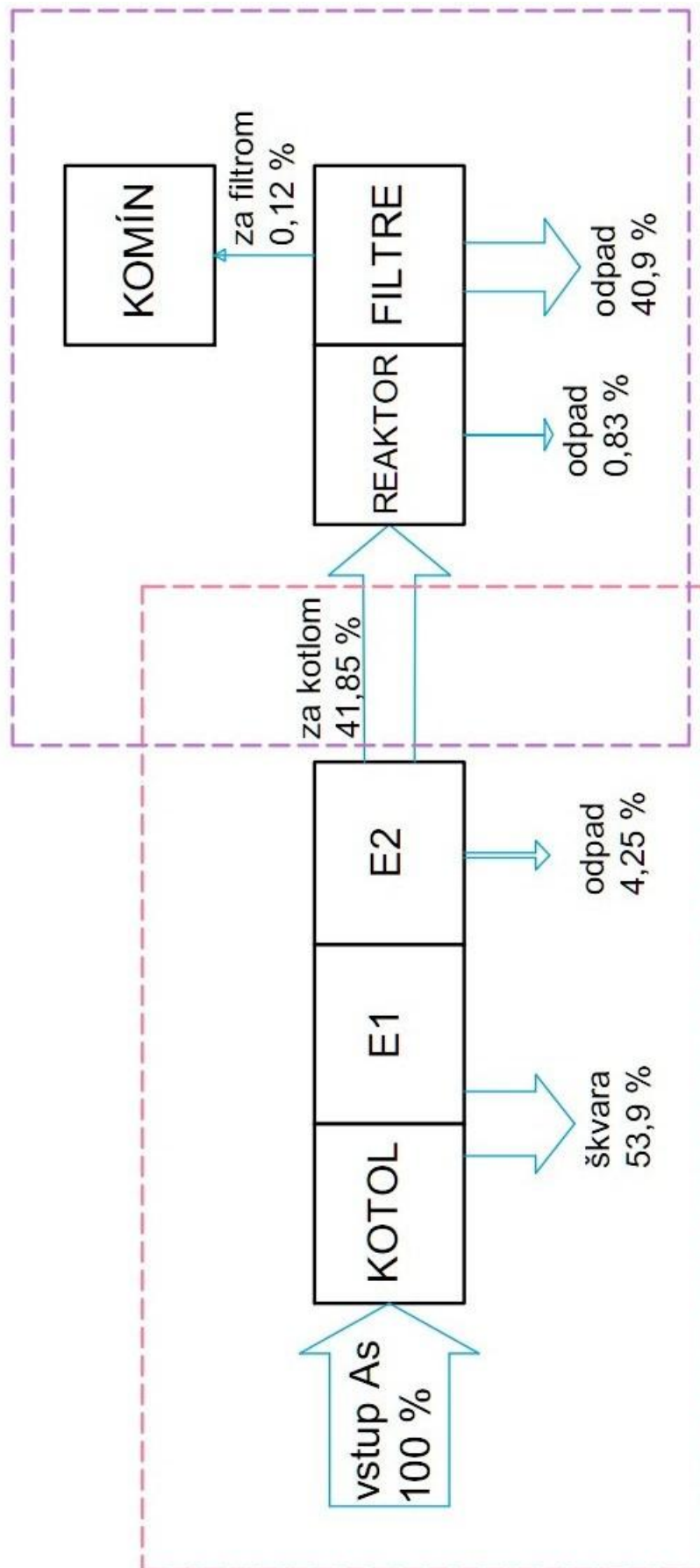
<i>Príloha 1</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku antimónu
<i>Príloha 2</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku arzénu
<i>Príloha 3</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku chrómu
<i>Príloha 4</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku kadmia
<i>Príloha 5</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku kobaltu
<i>Príloha 6</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku mangánu
<i>Príloha 7</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku medi
<i>Príloha 8</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku niklu
<i>Príloha 9</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku olova
<i>Príloha 10</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku ortuti
<i>Príloha 11</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku tália
<i>Príloha 12</i> Percentuálne rozloženie hmotnostného toku vanádu

Prílohy

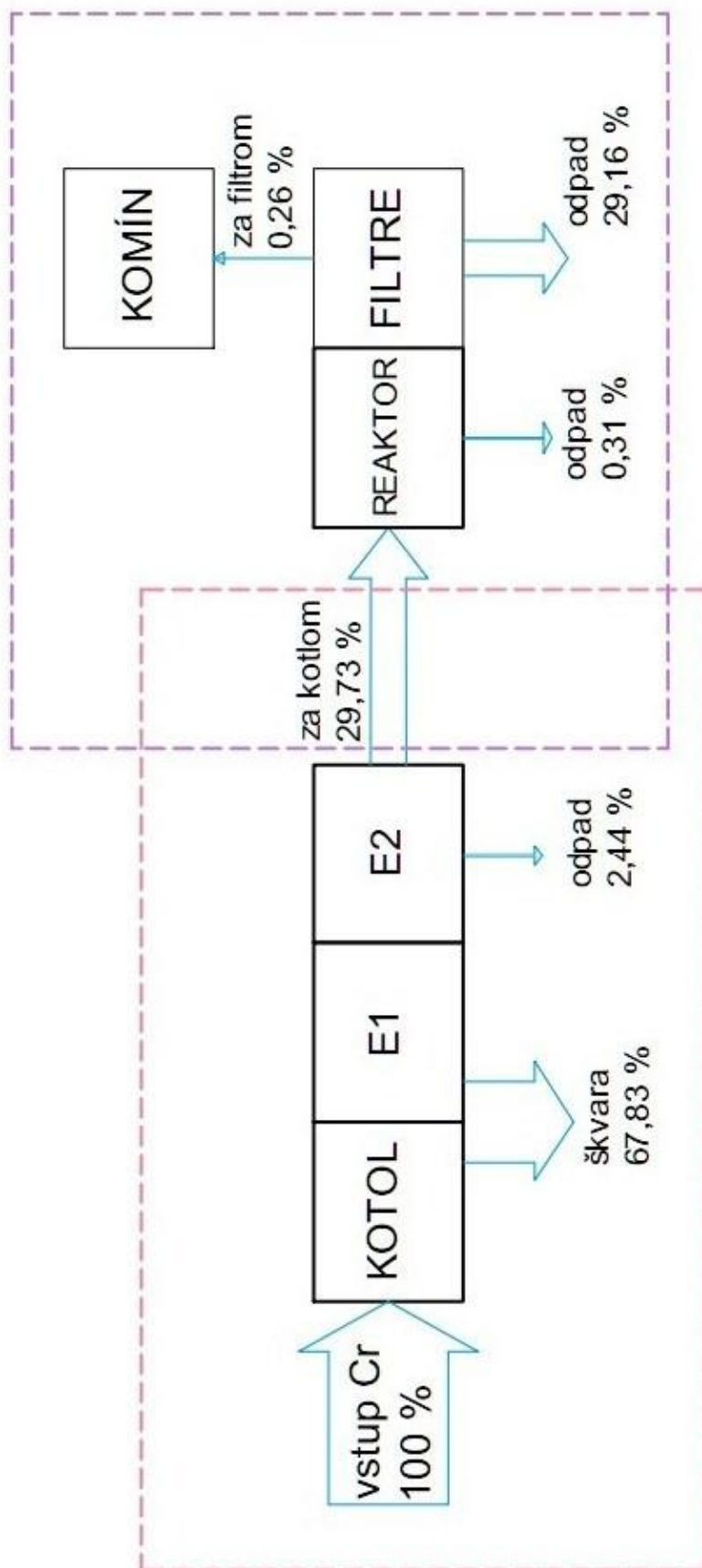
Príloha 1 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku antimónu



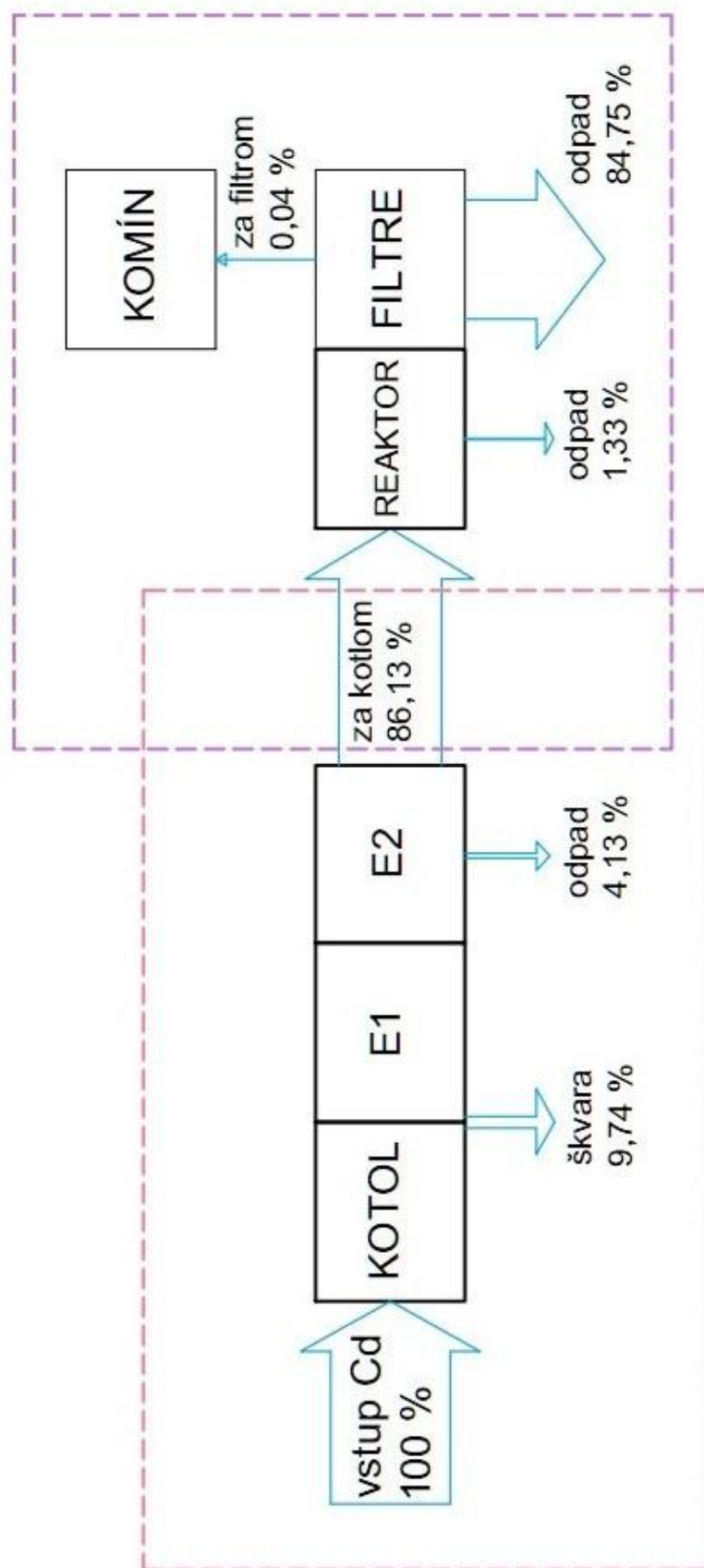
Príloha 2 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku arzénu



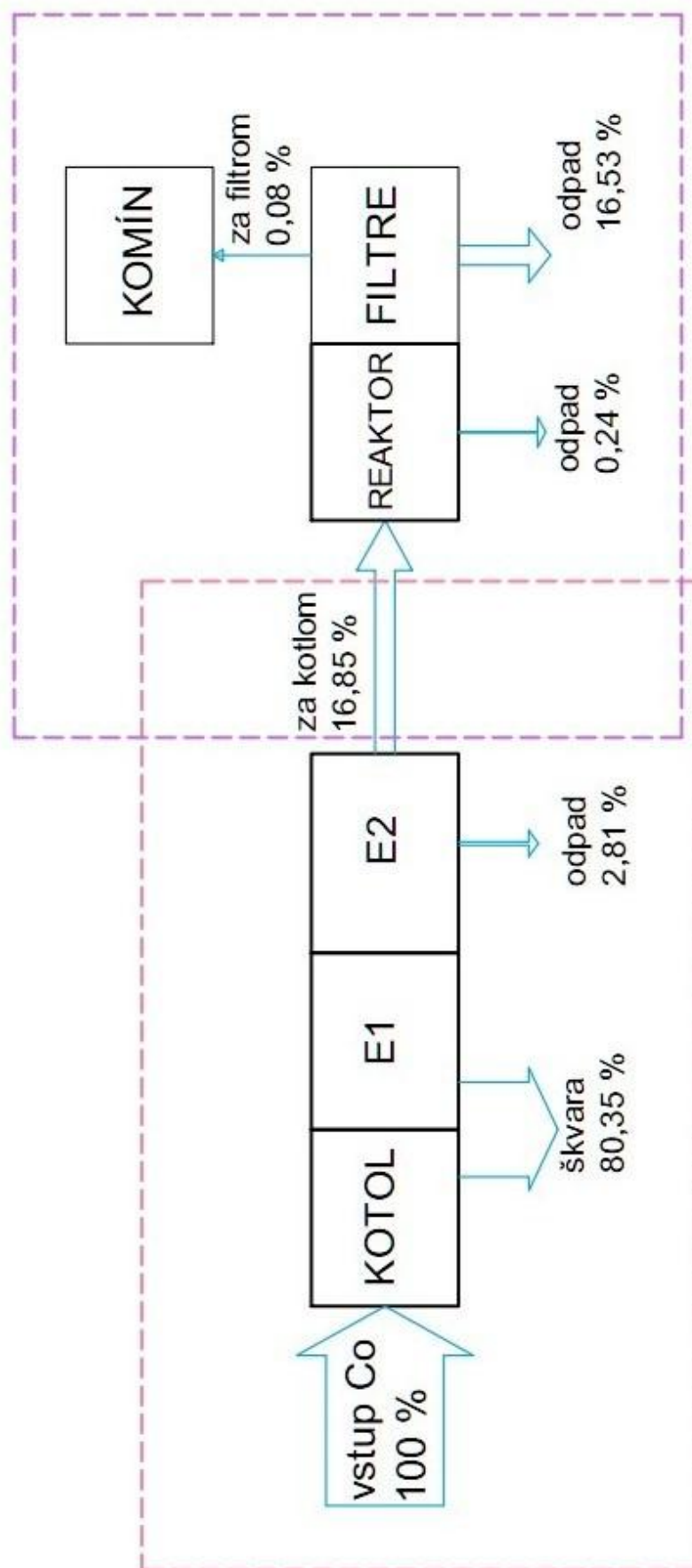
Príloha 3 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku chrómu



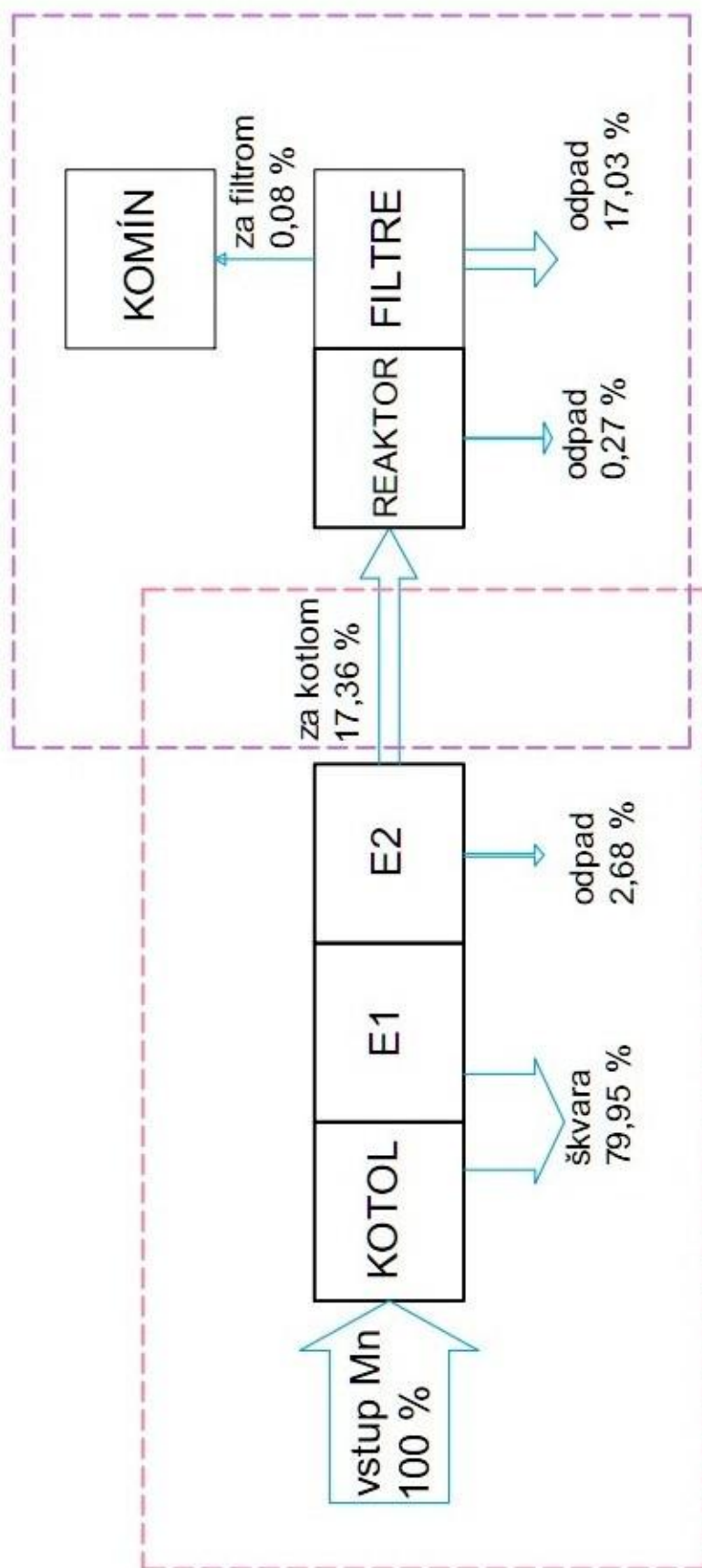
Príloha 4 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku kadmia



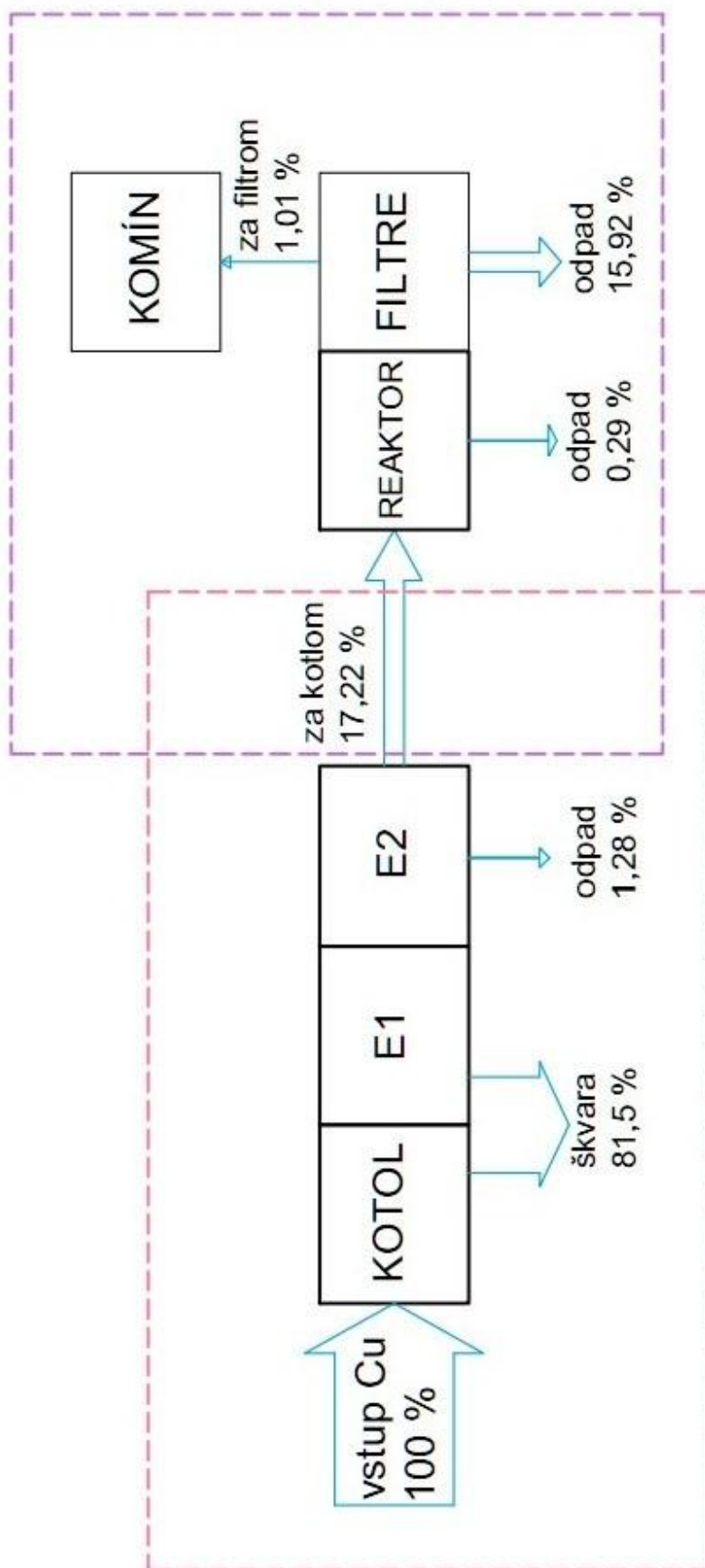
Príloha 5 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku kobaltu



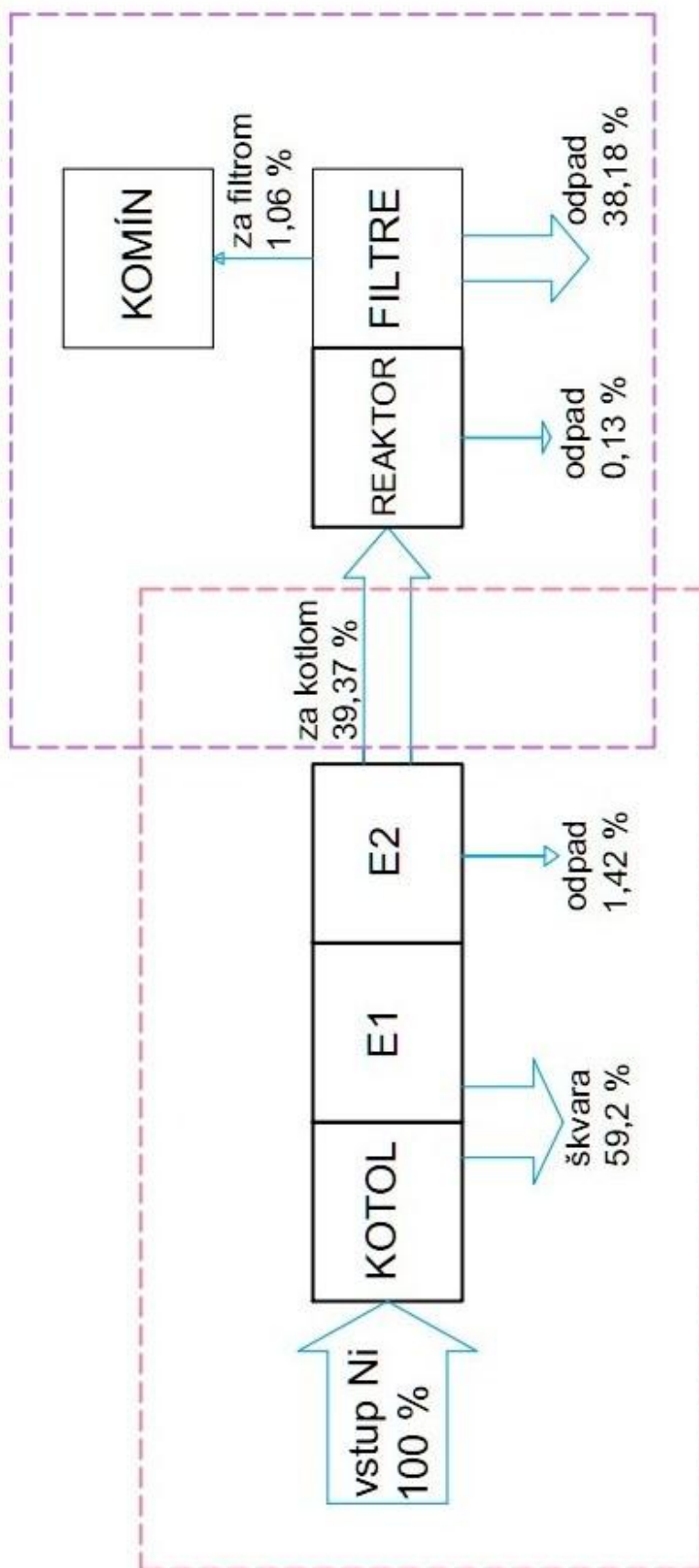
Príloha 6 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku mangánu



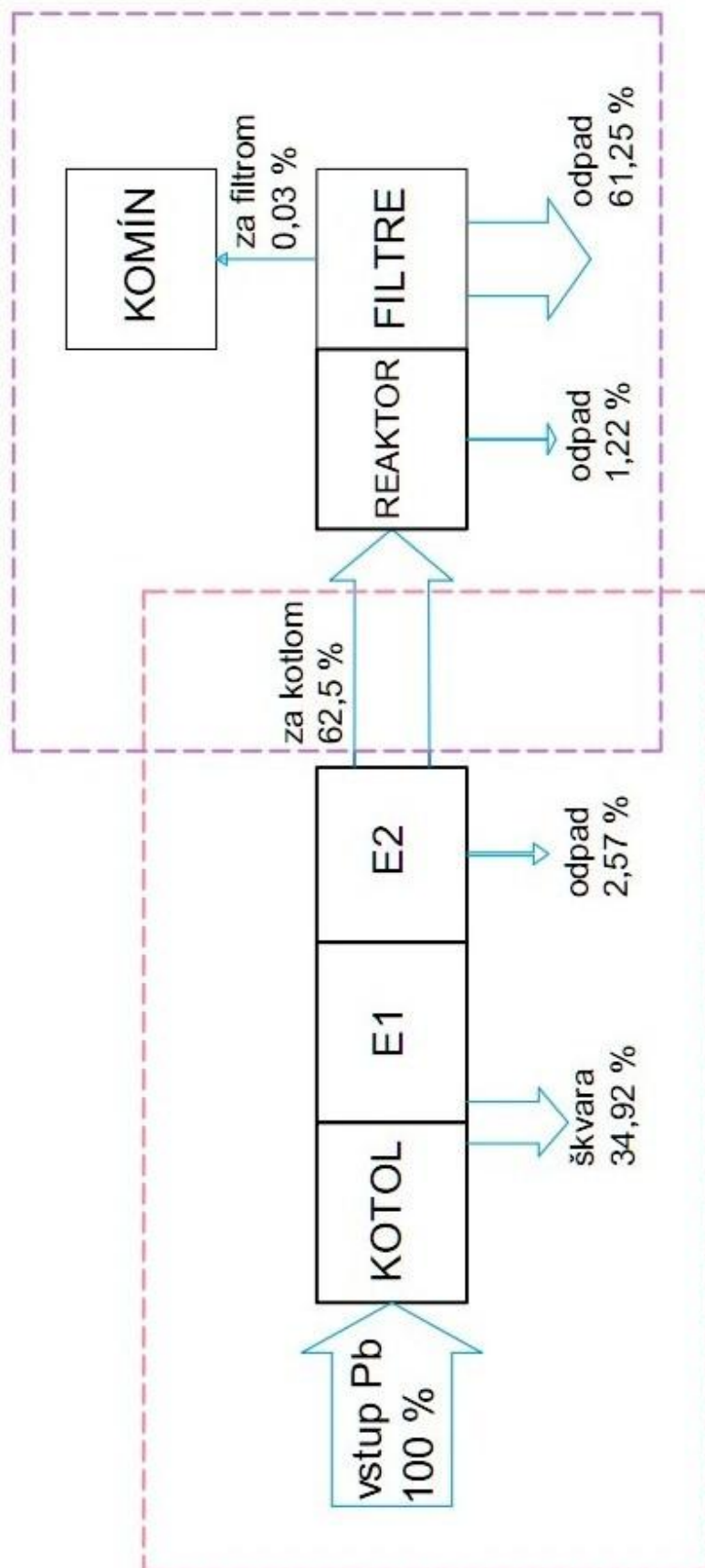
Príloha 7 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku medi



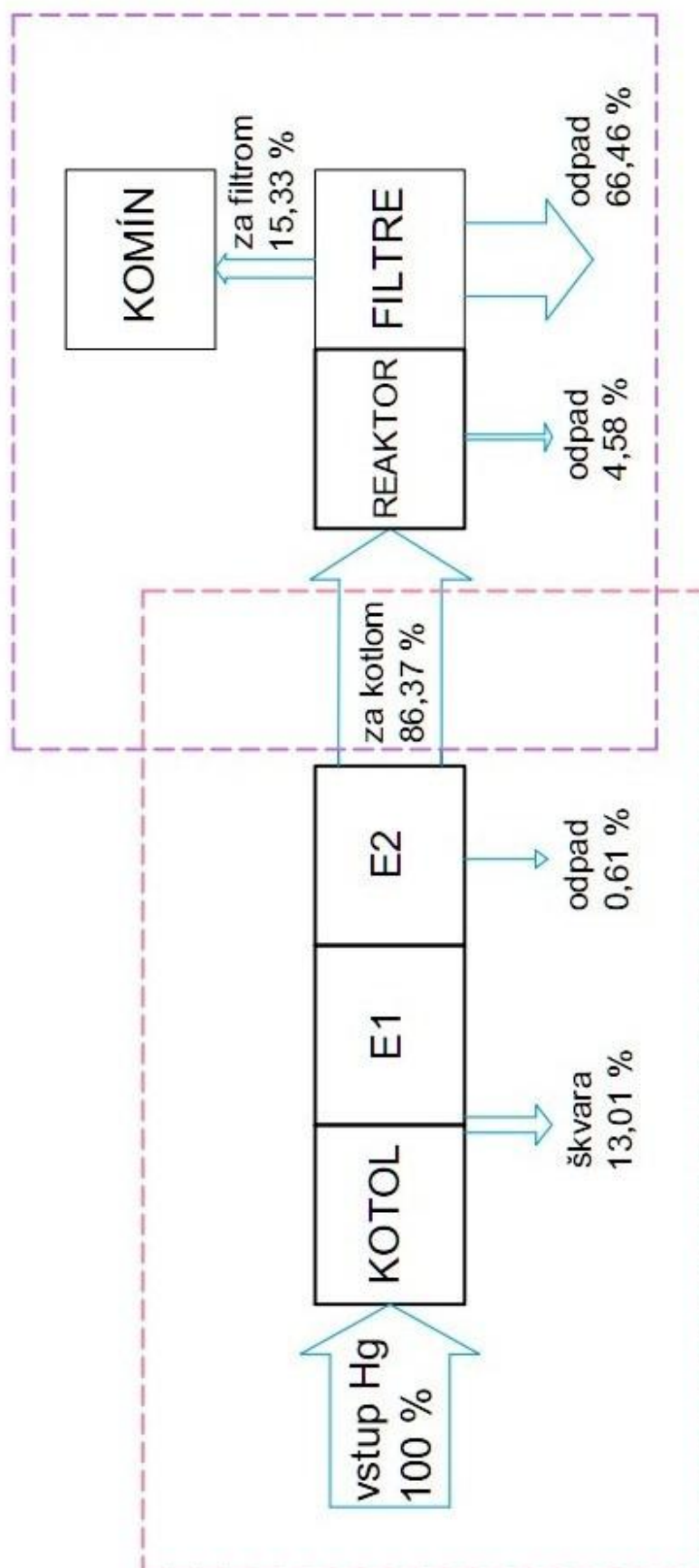
Príloha 8 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku niklu



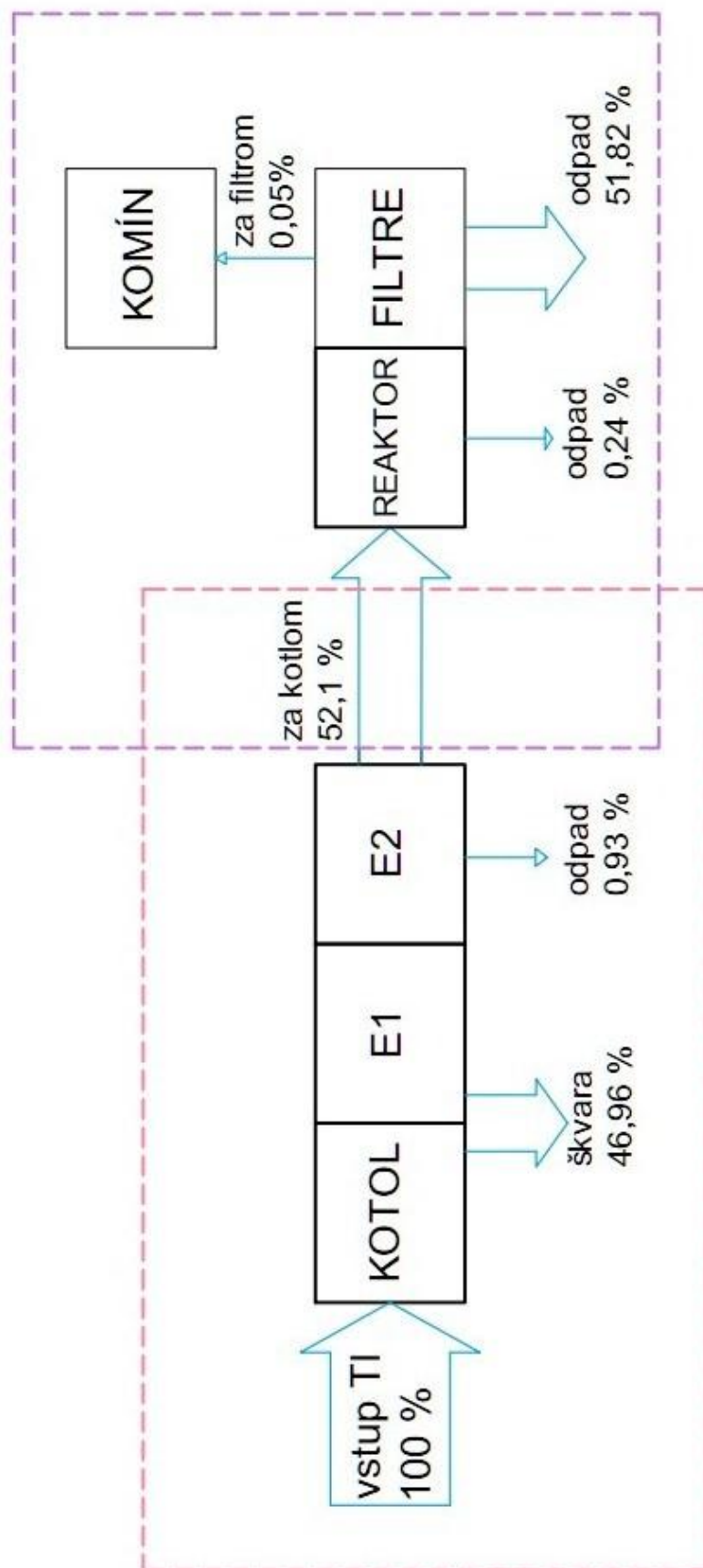
Príloha 9 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku olova



Príloha 10 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku ortuti



Príloha 11 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku tália



Príloha 12 Percentuálne rozloženie hmotnostného toku vanádu

