

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologie čištění spalin ze stacionárních zdrojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Anastasiya HALAVANAVA**
Osobní číslo: **E15B0001P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Technologie čištění spalin ze stacionárních zdrojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

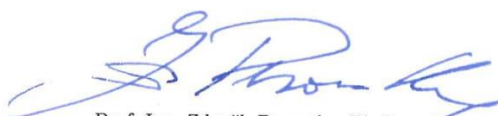
1. Uveďte přehled škodlivin obsažených ve spalinách a jejich vliv na životní prostředí.
2. Analyzujte možnosti a technologie čištění spalin.
3. Zhodnoťte možnosti a návrhy na eliminaci CO₂ ze spalin.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. Internetové zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Jan Škorpil, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku čištění spalin ze stacionárních zdrojů. V bakalářské práci se vyjmenovávají škodlivé látky podle zdroje a vlivů na životní prostředí a na lidské zdraví. Taktéž jsou uváděny technologie využitelné pro čištění spalin od tuhých znečišťujících látek, oxidů dusíku a oxidů síry, těžkých kovů, dioxinů a furanů. Dále je představen stručný popis procesů čištění spalin Plzeňské teplárenské a ZEVO Plzeň. Poté se práce zaměřuje hlavně na problematiku skleníkového plynu CO₂, na principy a technické možnosti odstranění oxidu uhličitého ze spalin a jeho případné ukládání nebo využití.

Klíčová slova

Čištění spalin, stacionární zdroj, tuhé znečišťující látky, oxidy síry, oxidy dusíku, dioxiny, furany, oxid uhličitý, zachycování CO₂, ukládání CO₂.

Abstract

This bachelor thesis is focused on flue gas cleaning from stationary sources. The gaseous pollutants and particles are listed according to the source and impacts on the environment and human health. In the work are represented the technologies used to clean flue gases of particulate matter, nitrogen oxides and sulfur oxides, heavy metals, dioxins and furans. Furthermore, a brief description of the flue gas cleaning processes of Pilsen heating power plant (Plzeňská teplárenská) and ZEVO Pilsen is presented. Then the work focuses mainly on carbon dioxide as a greenhouse gas, on the principles and technical possibilities of carbon dioxide removal from the flue gas and its further transportation, storage or utilization.

Key words

Flue gas cleaning, stationary source, particulate matter, sulfur oxides, nitrous oxides, carbon dioxide, dioxine, furan, carbon capture and storage.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 6.6.2019

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Janu Škorpilovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas při tvorbě bakalářské práce.

Dále patří dík Ing. Pavlovi Veselému a Ing. Miroslavu Křenkovi ze ZEVO Plzeň, Ing. Martinu Chochole ze společnosti Plzeňská teplotrenská za poskytnuté materiály, exkurze do provozu, odborné konsultace a další pomoc.

V neposlední řadě děkuji Ing. Petru Jindrovi za skvělé nápady, inspiraci a motivaci.

Seznam symbolů a zkratk

CCS – zachycování a ukládání oxidu uhličitého (Carbon Capture and Storage)

DEA – diethanolamin

EO – elektrostatický odlučovač

IEA – Mezinárodní energetická agentura (International Energy Agency)

MEA – monoethanolami

NO_x – oxidy dusíku

PAU – polycyklické aromatické uhlovodíky

PCB – polychlorované bifenyly

PCCD – polychlorované dibenzodioxiny

PCDF – polychlorované dibenzofurany

PSA – adsorpce výkyvem tlaku (Pressure Swing Adsorption)

SO_x – oxidy síry

THF – tetrahydrofuran

TSA – adsorpce výkyvem teploty (Temperature Swing Adsorption)

ZEVO – zařízení na energetické využití odpadu

Obsah

ÚVOD	9
1 PŘEHLED ŠKODLIVIN OBSAŽENÝCH VE SPALINÁCH A JEJICH VLIV NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	10
1.1 SLOUČENINY SÍRY	10
1.2 SLOUČENINY DUSÍKU	11
1.3 SLOUČENINY KYSLÍKU	12
1.4 SLOUČENINY UHLÍKU	13
1.5 SLOUČENINY HALOGENOVÉ	15
1.6 TĚŽKÉ KOVY	16
1.7 TUHÉ A KAPALNÉ ČÁSTICE	16
2 MOŽNOSTI A TECHNOLOGIE ČIŠTĚNÍ SPALIN	17
2.1 ODLUČOVÁNÍ TUHÝCH ZNEČIŠTJÍCÍCH LÁTEK	17
2.1.1 <i>Suché mechanické odlučovače</i>	17
2.1.2 <i>Mokrý mechanické odlučovače</i>	20
2.1.3 <i>Elektrostatické odlučovače (EO)</i>	21
2.1.4 <i>Filtry</i>	22
2.2 OXIDY SÍRY	23
2.2.1 <i>Mokrý metody</i>	24
2.2.2 <i>Polosuché metody</i>	25
2.2.3 <i>Suché metody</i>	26
2.2.4 <i>Regenerativní metody</i>	26
2.3 OXIDY DUSÍKU	28
2.3.1 <i>Katalytické procesy</i>	28
2.3.2 <i>Absorpční procesy</i>	30
2.3.3 <i>Adsorpční procesy</i>	31
2.4 PROCES ČIŠTĚNÍ SPALIN NA PLZEŇSKÉ TEPLÁRENSKÉ	31
2.5 PROCES ČIŠTĚNÍ SPALIN NA ZEVO PLZEŇ	33
2.5.1 <i>Rozprašovací sušárna</i>	34
2.5.2 <i>Suché čištění spalin</i>	34
2.5.3 <i>Mokrý čištění spalin</i>	35
2.5.4 <i>Katalytické čištění spalin</i>	36
3 TECHNOLOGIE ODSTRAŇOVÁNÍ CO₂ ZE SPALIN	38
3.1 TECHNOLOGIE ZACHYCOVÁNÍ CO ₂	39
3.1.1 <i>Po spalování</i>	39
3.1.2 <i>Před spalováním</i>	39
3.1.3 <i>Spalování kyslíkem</i>	39
3.2 SEPARACE CO ₂	40
3.2.1 <i>Absorpce</i>	40
3.2.2 <i>Adsorpce</i>	41
3.2.3 <i>Chemické spalování ve smyčce</i>	42
3.2.4 <i>Membránová separace</i>	42
3.2.5 <i>Separace na bázi hydrátu</i>	42
3.2.6 <i>Kryogenní destilace</i>	43
3.3 DOPRAVA CO ₂	44
3.4 VYUŽITÍ CO ₂	44
3.5 GEOLOGICKÉ UKLÁDÁNÍ CO ₂	45
3.6 POSOUZENÍ EMISÍ CO ₂ V ŽIVOTNÍM CYKLU	46
ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49

ÚVOD

Účelem této práce je seznámit čtenáře se stavem technologií čištění spalin ze stacionárních zdrojů v České republice a ve světě se zaměřením především na spalovací zařízení a jejich emise.

V první kapitole je uveden přehled škodlivých látek, které se dostávají do ovzduší v důsledku spalování. Každá látka je popsána s ohledem na obecné vlastnosti škodliviny, působení na životní prostředí a lidské zdraví. V některých případech jsou uvedeny chemické reakce probíhající v atmosféře, přípustné a současné koncentrace a mechanismy odbourávání. Také je důležité vzájemné působení škodlivých látek mezi sebou.

V druhé kapitole je uveden přehled technologií, které slouží k odstranění jednotlivých škodlivin z předchozí kapitoly. S přihlédnutím na několik faktorů jako velikost zdroje, složení vypouštěných škodlivých látek, účinnost, investiční a provozní náklady. Dále jsou popsány principy, využívané k odstraňování škodlivin, chemické a fyzikálně-chemické procesy, probíhající v každém stupni čištění spalin, případně výhody a nevýhody v porovnání s jinými technologiemi. Pro názornost plynulosti a návaznosti každého stupně čištění spalin na konci kapitoly jsou porovnávány dva příklady z reálných provozů: největší výrobce a dodavatel tepelné energie v Plzni Plzeňská teplárenská a špičková technologie čištění spalin v zařízení na energetické využití odpadu ZEVO Plzeň. Na závěr je porovnána účinnost čištění spalin a dodržení emisních limit stanovených zákonem.

Třetí kapitola je věnována technologiím zachycování, ukládání/využití CO₂. V kapitole je uvedena celá škála přístupů k problematice odstraňování/zachycování CO₂ ze spalin v současné době. Některé přístupy jsou těžce realizovatelné, jiné jsou dost vyspělé a slibné, ale vyžadují větší náklady a snižují účinnost spalovacích procesů, ale jsou i takové, které už našli uplatnění v řadě pilotních zařízení. Dále je naznačena problematika přepravy a ukládání CO₂, případně znovuvyužití. Specifikum této oblasti předpokládá dodatečnou pozornost nejen legislativních a tržních aspektů, ale i etické chování vůči následujícím generacím.

1 Přehled škodlivin obsažených ve spalinách a jejich vliv na životní prostředí

1.1 Sloučeniny síry

Oxid siřičitý SO_2 je bezbarvý plyn se sírovým zápachem, který má štipavý dráždivý zápach nad 3,0 ppmv. Hlavními zdroji oxidu siřičitého jsou elektrárny a teplárny, domácí topeniště a některé technologické procesy (metalurgický a chemický průmysl).

Oxid siřičitý negativně ovlivňuje zdraví živočichů a zdraví lidské. Může poškodit dýchací systém nebo oční spojky. Při dlouhodobém působení dochází ke zvýšené úmrtnosti z důvodů chronické bronchitidy a nemoci krevního systému. Zásah SO_2 intenzivně ovlivňuje metabolismus a imunitu.

Primární oxid siřičitý SO_2 se oxiduje v atmosféře na oxid sírový SO_3 , který se okamžitě hydratuje za vzniku aerosolu kyseliny sírové H_2SO_4 . Kyselina sírová H_2SO_4 může reagovat s prachovými alkalickými částicemi za vzniku síranů. Síraný se usazují na zemský povrch nebo jsou z ovzduší vymývány srážkami. Důsledkem nedostatku alkalických částic v atmosféře jsou kyselé deště. Kyselé deště uvolňují z půdy hliníkové a další kovové ionty (Cu, Pb, Cd), které dále poškozují půdní mikroorganismy, znehodnocují vodu a způsobují další problémy.

Sulfan H_2S vzniká při spalování fosilních paliv obsahujících síru, při těžbě ropy a plynu, tepelném zpracování uhlí, rafinerii ropy a v chemickém průmyslu. Je to vysoce toxický plyn, ale koncentrace v atmosféře jsou tak nízké, že nejsou nebezpečné pro lidské zdraví. Jsou přípustné velmi malé koncentrace ($8 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Má nepříjemný zápach shnilého vejce, takže hlavní úkol zařízení na čištění ovzduší je zabránění vzniku zápachu.

Karbonylsulfid COS je používán jednak jako chemický meziprodukt, jednak je vedlejším produktem při výrobě sirouhlíku CS_2 . Dalšími zdroji jsou výfukové plyny z vozidel a opotřebení pneumatik, uhelné elektrárny, spalování biomasy, tuhých odpadů, plastů atd. Celosvětové znečištění atmosféry karbonylsulfidem je kolem 3 milionů tun za rok, pouhá třetina souvisí s lidskou činností. Vysoké koncentrace karbonylsulfidu mohou způsobit náhlé zhroucení, křeče a smrt způsobenou dýchacím ochrnutím. Byly zaznamenány úmrtí prakticky bez lokálního podráždění nebo čichového varování.

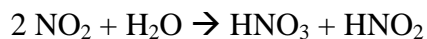
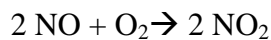
Sirouhlík CS₂ má zdroje podobné COS. Za normálních podmínek je to bezbarvá kapalina, s vůní podobnou etheru, která žlutne na světle. CS₂ je jedovatá látka, která je velmi fotochemicky reaktivní. Při vysokých koncentracích je sirouhlík nebezpečný, protože ovlivňuje nervový systém (vyvolává bolesti hlavy, psychické poruchy, zrakové halucinace, bezvědomí a nakonec až smrt). Chronické otravy snižují chuť k jídlu, typická je bledost, poruchy spánku, neurózy a celkové postižení CNS. Typickým příznakem je oslabení paměti. Nadýchání ve vysoké koncentraci způsobuje narkózu.

1.2 Sloučeniny dusíku

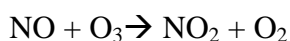
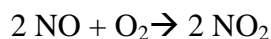
Přestože oxidy dusíku mají malé koncentrace, hrají důležitou roli v atmosférické chemii. NO_x slouží jako reaktanty pro velké množství atmosférických reakcí.

NO_x působí nepříznivě na dýchací systém. Při vyšších koncentracích se NO_x váže na hemoglobin a zhoršuje přenos kyslíku z plic do krevního oběhu. Při působení NO_x během jedné hodiny s limitní koncentrací 190 µg/m³ se může změnit dýchací funkce zdravého člověka. Denní imisní limit je 100 µg/m³. [1]

Oxid dusnatý NO je bezbarvý, relativně netoxický plyn bez zápachu, bez chuti. Zdrojem NO je zejména spalování fosilních paliv za vysokých teplot. K nejvýznamnějším zdrojům patří diesellová a benzínová motorová vozidla, elektrárny poháněné fosilními palivy, průmyslové kotle, spalovny komunálního odpadu, topení v domácnostech a chemické výroby. Emitovaný NO je v atmosféře samovolně oxidován na NO₂ s následnou tvorbou kyseliny dusičné HNO₃.



Oxid dusičitý NO₂ je dráždivý, šízravý, rezavě zbarvený plyn, mění se od žlutého do hnědého v závislosti na koncentraci. Kvůli vysoké oxidační schopnosti je relativně toxický a korozní. Vzniká v důsledku reakcí pomalé přímé oxidace, nebo rychlejší fotochemické s účastí O₃, RO₂· a jiných vodíkových sloučenin.



Oxid dusný N_2O je bezbarvý, lehce sladký, relativně netoxický plyn. Koncentrace N_2O se zvýšila z dob před průmyslovou revolucí z 280 ppbv do 330 ppbv dnes. [2] Neexistuje známý mechanismus přírodního odbourávání N_2O v atmosféře. Ve výsledku doba života N_2O v atmosféře je dlouhá, přibližně 150 let. Zvýšené koncentrace N_2O v atmosféře vyvolává dvě hlavní environmentální obavy: ochuzení ozonové vrstvy a kvůli vysoké teplotní absorpční schopnosti globální oteplování.

Kyselina dusičná HNO_3 po neutralizaci prachovými alkalickými částicemi (CaO , MgO , NH_4OH) se stává ve formě svých solí součástí aerosolových částic, které se dostávají do půdy a do vod prostřednictvím srážek, případně sedimentací. V půdě ionty NO_3^- příznivě ovlivňují růst rostlin, ve vodách dochází k nežádoucímu rozmnožení některých druhů vodních rostlin a úhynu ryb. Část vzniklého oxidu dusičitého se opět může rozkládat fotochemicky na oxid dusnatý a kyslík, v jehož důsledku se zvyšuje oxidační potenciál atmosféry.

Amoniak NH_3 je bezbarvý plyn s výrazným zápachem, jenž při vyšších koncentracích dráždí dýchací ústrojí a může vyvolávat slzení. Emise v důsledku lidské činnosti pochází zejména z chemického průmyslu a z tepelného zpracování uhlí (koksovny, plynárny). Pro reaktivitu má amoniak v ovzduší krátkou průměrnou dobu setrvání (několik dnů). Škodlivé účinky na lidské zdraví se projevují již při koncentracích, při nichž je cítit (přibližně 55 ppm), toxický je až při koncentracích několika tisíc ppm.

1.3 Sloučeniny kyslíku

Kromě dvouatomových molekul O_2 existuje v atmosféře v menších množstvích atomární kyslík O , ozon O_3 a ionty O_2^+ a O^+ . Atomární kyslík a ozon jsou charakteristické výraznými oxidačními schopnostmi a možností reagovat s dalšími sloučeninami v atmosféře za vzniku celé řady radikálů a oxiradikálů. Atomární kyslík sám o sobě je velmi nestabilní a často reaguje s dalšími atomy kyslíku. Výsledkem těchto reakcí jsou stálejší atomy O_2 .

Ozon O_3 je běžnou součástí ovzduší, avšak má velmi proměnlivou koncentraci. V důsledku lidské činnosti ozon vytváří dva hlavní environmentální problémy: v stratosféře je to ochuzení ozonové vrstvy, a v troposféře značné zvýšení přípustné koncentrace.

Ozon je vysoce chemicky agresivní a jedovatý plyn. Ozon je považován za významnou vzdušnou škodlivinu přízemních vrstev atmosféry, bývá základní toxickou složkou fotochemického smogu, má toxické účinky od koncentrace okolo 1 ppm.

Fyziologické účinky a působení ozonu na živé organismy jsou velmi nepříznivé. Koncentrace O_3 nad $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ způsobuje podráždění očí, nosní sliznice, vyvolává kašláni a bolesti hlavy. Při koncentraci nad $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ již po dvou hodinách dochází k poškození dýchacího systému. Za smrtelnou koncentrací je považována koncentrace nad $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ozon má rovněž škodlivé účinky na vegetaci, zpomaluje růst rostlin a jejich kořenového systému. [1]

1.4 Sloučeniny uhlíku

Uhlík se v atmosféře vyskytuje jednak jako oxid uhličitý a uhelnatý, nebo ve formě četných organických sloučenin. Jde zejména o metan a další uhlovodíky, z nichž bych upozornila především na látky, které mají značný vliv na životní prostředí, jako jsou těkavé organické látky a polycyklické aromatické uhlovodíky.

Oxid uhelnatý CO je bezbarvý plyn, bez chuti, bez zápachu, který vzniká při procesech nedokonalého spalování hořlavých látek. Mezi zdroje patří zejména spalování paliv při výrobě energie, četných technologických tepelných postupech. Významným zdrojem je také výfukové plyny z provozu motorů dopravních prostředků. V ovzduší CO přechází fotochemickou oxidací na oxid uhličitý.

Výrazné fyziologické vlastnosti oxidu uhelnatého spočívají v tom, že při vdechování se váže na krevní barvivo hemoglobin místo kyslíku a porušuje tak jeho funkci. Je silně toxický a to od koncentrací kolem 100 ppm. Koncentrace CO se liší prostorově a časově, s rozsahem koncentrace od 40 do 200 ppbv. [2]

Oxid uhličitý CO_2 je bezbarvý plyn se značnou radiační absorpcí v infračervené oblasti. Přírodní zdroje oxidu uhličitého zahrnují dýchací procesy, sopečné činnosti nebo rozklad organických látek; lidská činnost přispívá především spalováním uhlíkatých paliv (také hospodaření půdy: kácení lesů, následující spalování biomasy a využití v zemědělství). Oxid uhličitý nepodléhá žádným chemickým reakcím a má dlouhodobou existenci v atmosféře, a může trvat desítky let. Celosvětová úroveň CO_2 se zvýšila z 280 ppmv z dob před průmyslovou revolucí až do 415 ppmv dnes. [2]

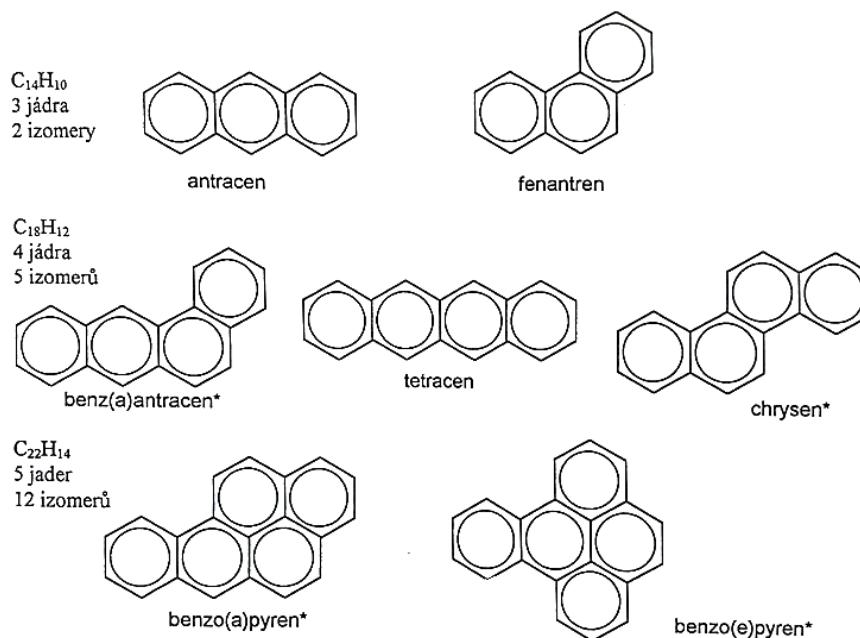
Oxid uhličitý se neřadí do znečišťujících složek ovzduší. V důsledku jeho stoupajícímu obsahu v atmosféře vzniká tzv. skleníkový efekt, který spočívá v oteplování planety tím, že absorbuje dopadající sluneční záření a zároveň brání jeho zpětnému odrazu do

prostoru.

Procesy odbourávání CO_2 z atmosféry jsou pomalé, ale velice důležité. Zahrnují absorpci oxidu uhličitého oceány, hojnými lesy severní polokoule a atmosférickými procesy.

Metan CH_4 je významný skleníkový plyn. Zdroji lidské činnosti jsou těžba uhlí a lignitu, těžba ropy a zemního plynu, rafinace ropy, únik z přenosových vedení zemního plynu a automobilový průmysl. Vzhledem k tomu, jak malou má reaktivní schopnost, přetrvává metan v ovzduší 4 až 7 let.

Polycyklické aromatické uhlovodíky PAU jsou organické látky, jež vyskytují ve znečištěném ovzduší. K jejich produkci dochází při nedokonalém spalování tuhých paliv při výrobě tepla a elektřiny nebo ve spalovacích motorech vozidel. Pokud dojde k ochlazení produktů spalování, PAU zkondenzují na sazích a prachových částicích, s nimiž unikají do atmosféry. Mezi přírodní zdroje PAU patří vulkanická činnost a lesní požáry, ale jejich podíl na celkové koncentraci je bezvýznamný. V troposféře PAU tvoří různorodou směs s rozsáhlou škálou molekulových velikostí a hmotností. K odstraňování z atmosféry dochází především sedimentací částic na zemský povrch, kde mohou kontaminovat vodní zdroje, půdu a rostliny. Rozkládají se v půdě půdními bakteriemi.



Obr. 1.1 Chemická struktura hlavních PAU (*PAU s karcinogenními účinky) [1]

1.5 Sloučeniny halogenové

Halogenové sloučeniny jsou jednou z nejzávažnějších skupin znečišťujících látek, protože jsou toxické a mají škodlivé účinky na životní prostředí. Ve volné atmosféře se nacházejí ve dvou variantách: v elementární formě jako F_2 a Cl_2 nebo ve formě anorganických a organických sloučenin. Prakticky všechny tyto látky pochází z lidské činnosti.

Fluor, fluorovodík a fluoridy jsou vytvářeny v některých průmyslových činnostech, jako je výroba hliníku, kyseliny fosforečné a fosfátů, sklářství a keramika aj. Významným zdrojem fluorovodíku je také spalování tuhých paliv, zejména hnědého uhlí. Sloučeniny fluoru mají škodlivé účinky na rostliny a ohrožují hospodářská zvířata. U lidí může fluor a jeho sloučeniny způsobit chronické otravy, poškození zubů a kostní změny.

Elementární chlor najdeme v atmosféře především z jeho výroby a jeho dalšího zpracování, a také v organickém průmyslu (farmaceutická výroba, výroba plastických hmot). Emise chlorovodíku stále rostou, a to souvisí zejména s procesy spalování stále rostoucího množství chlorovaných plastů.

Organické sloučeniny halogenů představují z hlediska toxicity jednu z nejdůležitějších skupin znečišťujících látek. Všechny tyto látky pochází z lidské činnosti. Ve většině případů mají nízkou reaktivní schopnost a v atmosféře přetrvávají mnoho let. Ochotně se rozpouští v tucích a živočišné organismy mají potíže s jejich trávením. Podle zdrojů vzniku nás zejména zajímají:

- a) Polychlorované bifenyly (PCB) jsou látky, které mají vysoké toxické účinky, kumulují se v životním prostředí i živých organismech. PCB jsou velmi stábe a odolné vůči tepelnému, chemickému i biologickému rozkladu. Jsou velmi nebezpečné pro lidské zdraví, způsobují změny kůže, zvětšení sleziny a snížení obranyschopnosti organismu; jsou jim také připisovány karcinogenní a mutagenní efekty.
- b) Polychlorované dibenzodioxiny PCDD (dioxiny) a polychlorované dibenzofurany PCDF (furany) mají podobně škodlivé vlastnosti jako PCB. Do atmosféry a půdy se dostávají zejména ze spalovacích procesů ve spalovnách komunálního a nemocničních odpadů, v krematoriích, ale i při spalování uhlí, topných olejů a dřeva a také v řadě průmyslových technologických procesů. Jsou považovány za nejtoxičtější látky vznikající v souvislosti s antropogenní činností. Jejich účinky na člověka se projevují

neurologickými a teratogenními účinky. Nebezpečí dioxinů spočívá zejména v jejich kumulativním účinku s řadou zásahů do lidského organismu.

1.6 Těžké kovy

Kovy v aerosolech jsou připisovány lidské činnosti. Zahrnují železo Fe, mangan Mn, zinek Zn, olovo Pb, vanad V, chrom Cr, nikl Ni, měď Cu, kobalt Co, rtuť Hg a kadmium Cd. Nejvýznamnějšími zdroji jsou elektrárny, tavicí pece, spalovny, cementárny, domácí topení a motorová vozidla. Hlavním zdrojem kovů z uhelných a ropných elektráren je popílek. Popílek je charakterizován vysokými koncentracemi železa, hliníků, oxidů křemíku a uhlíkatých sloučenin, které prošly různými stupni oxidace.

Znečištění způsobené kovy se postupně stává značným problémem životního prostředí a veřejného zdraví. Kovy, které jsou vypouštěné v malém množství, se akumulují během času v organismu a zúčastňují se oběhu v potravních řetězcích. Větší pozornost si vyžadují kovové složky atmosférického aerosolu kvůli jejich katalytickým schopnostem a působení na biologické funkce.

1.7 Tuhé a kapalné částice

Tuhé a kapalné částice se vyskytují od makromolekul až po viditelná zrna. Svým složením jsou různorodá a zahrnují celou škálu organických i anorganických látek. Vznik kapalných částic je buď kondenzací plynné fáze nebo rozrušením objemu tekutiny. Metody pro hodnocení kapalných částic jsou shodné s metodami pro hodnocení vlastností tuhých částic.

Nejvýznamnějšími zdroji primárního znečištění tuhými částicemi jsou doprava, spalování paliv ve stacionárních zdrojích, likvidace tuhého komunálního odpadu a různorodé zdroje jako třeba zemědělská činnost, některé průmyslové procesy a prchavé emise ze silnic. Sekundární částice vznikají i v důsledku chemických procesů v atmosféře, kterých se účastní plyny, vodní aerosoly a vodní pára. Nejvýznamnějšími složkami tuhých částic jsou sírany, dusičnany, elementární uhlík, kondenzované organické sloučeniny, organický uhlík a kovy.

2 Možnosti a technologie čištění spalin

2.1 Odlučování tuhých znečišťujících látek

Během spalování fosilních paliv přechází minerální látka do popela a částečně opouští kotel se spalinami jako polétavý popílek. Polétavý popílek tvoří primární hmotné částice, které vstupují do odlučovacího zařízení.

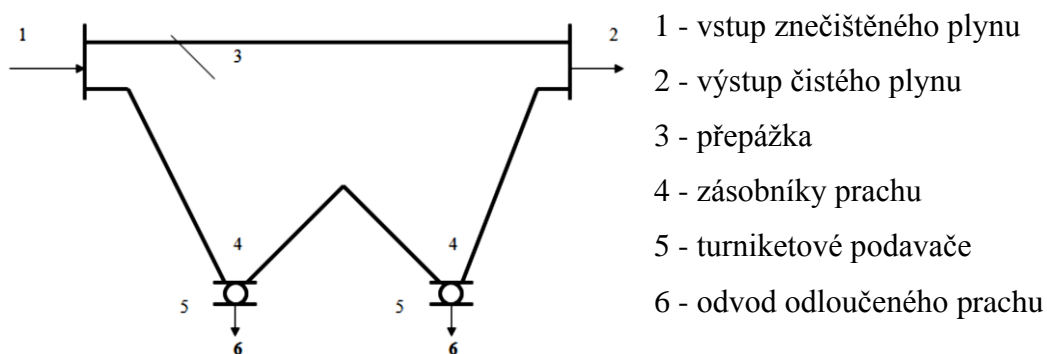
Charakteristiky a množství popílku závisí na použitém palivu. Složení uhlí a obsah nespáleného uhlíku v polétavém popílku ovlivňuje odolnost a soudržnost popílku, a tudíž i výkon zařízení k omezení částic. Jemné hmotné částice mohou obsahovat vyšší koncentrace stopových prvků než částice hrubší, protože jemné částice mají k dispozici pro kondenzaci větší celkový povrch.

K odloučení tuhých látek z plynu se v odlučovačích využívají rozdíly mezi fyzikálními a fyzikálně-chemickými vlastnostmi tuhých látek a plynu, jako jsou síly gravitace, setrvačnosti (impakce), zdánlivé odstředivé síly, elektrostatické síly, intercepce, difúze.

2.1.1 Suché mechanické odlučovače

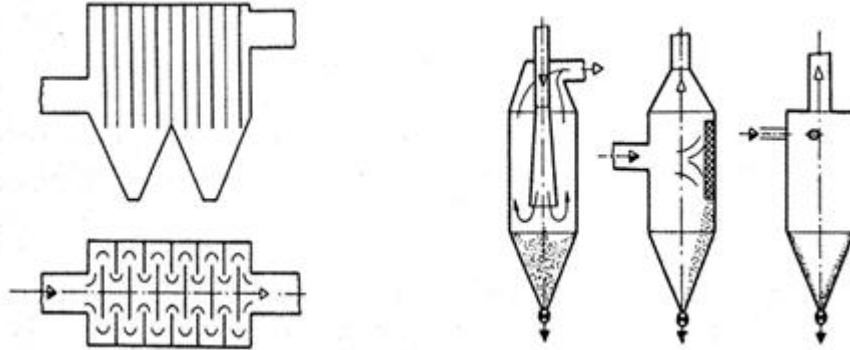
Suché mechanické odlučovače mají jednoduchou konstrukci, nízké provozní náklady a díky tomu jsou nejrozšířenější. Výhodou je taky minimální spotřeba energie, lze je použít pro vysoké teploty a vysoké koncentrace plynů. Slouží zejména jako předodlučovače hrubých částic kvůli nízké odlučitelnosti pro jemné frakce (2-100 μm).

- Usazovací komora je provedená jako potrubí, jehož průřez se značně rozšiřuje. V tomto rozšíření částice snižují rychlost, a působením gravitační síly padají do výsypek.



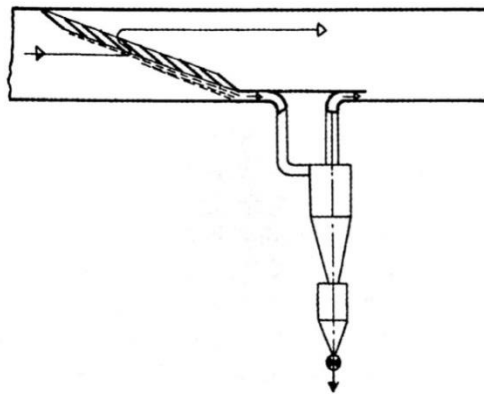
Obr. 2.1 Usazovací komora [6]

- Prašníky využívají současně gravitačního a setrvačného principu. Do usazovacích komor se umístí různé vestavby, plechové přepážky, zavěsí řetězy, které způsobí změnu směru proudu. Může být použit tečný vstup do velkoprostorové komory apod.



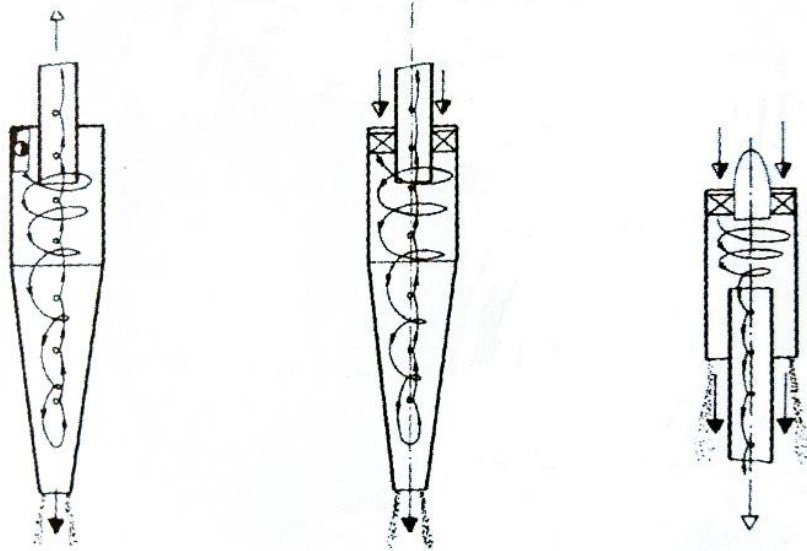
Obr. 2.2 Různá provedení prašníků [3]

- Žaluziový odlučovač také využívá setrvačných sil: přepážky žaluzie. Částice narážejí na žaluzie, mění se jejich rychlost a směr, padají do prostoru, odkud jsou odváděny. Je jednoduchý, nenáročný na prostor a na investiční a provozní náklady.



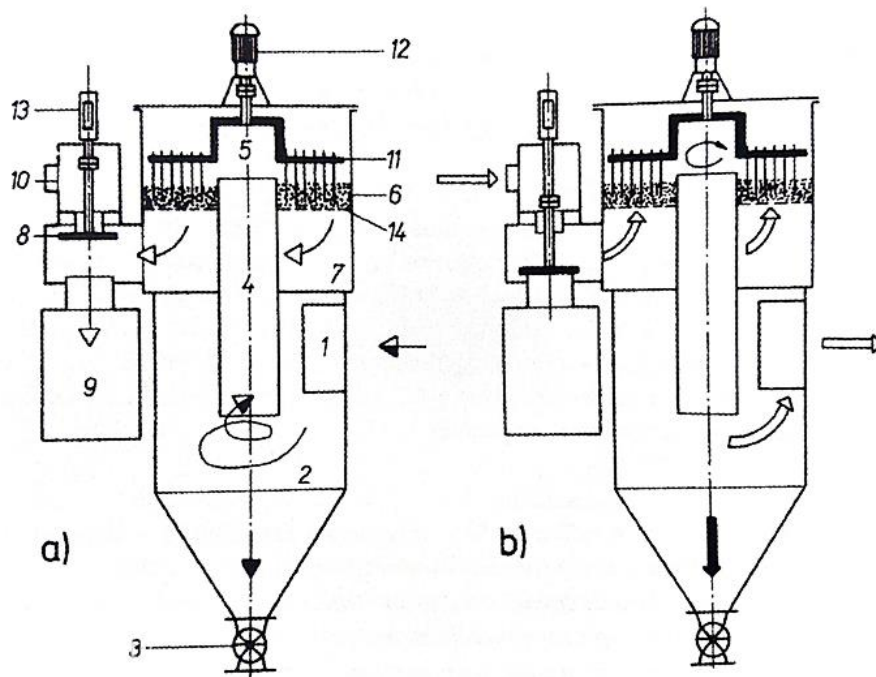
Obr. 2.3 Žaluziový odlučovač [3]

- Cyklonový odlučovač využívá odstředivou sílu, kdy se v důsledku rozdílných hustot plynu a tuhých částic jejich dráhy zakřívují různě. Tuhé částice se shromažďují na stěně komory nebo potrubí.



Obr. 2.4 Znáznornění funkce cyklonu [3]

- V rotačním odlučovači jsou částice prachu unášeny k obvodu skříně rotoru působením odstředivé síly a nárazy do lopatek rotoru, odkud padají do výsypu.



Obr. 2.5 Vřový odlučovač se zrnitou vrstvou [3]

a) fáze odlučování, b) fáze čištění sytké vrstvy

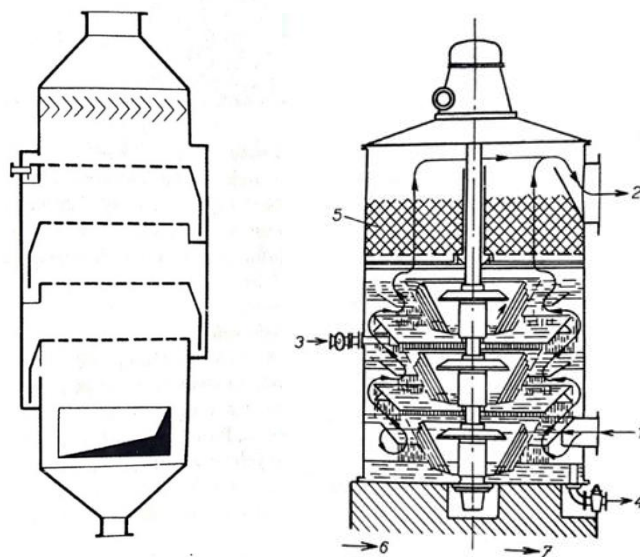
2.1.2 Mokrý mechanický odlučovač

Důvodem vývoje mokrých mechanických odlučovačů byla snaha zlepšit odlučivost jemného prachu a zlepšit funkční spolehlivost při odlučování vlhkých a lepkavých prachů. Tento typ odlučovačů využívá setrvačný a odstředivý princip odlučování částic. V minulosti docházelo k vylepšení suchých mechanických odlučovačů pouhým rozprašováním vody, z čehož se vyvinuly pračky a cyklony.

Pro zajištění největší pravděpodobnosti srážek kapiček vody s prachovými částicemi je nutno zajistit buď co nejdélší dobu zdržení vodních kapiček v čištěných plynných spalinách, nebo vysokou relativní rychlost kapiček vody a prachových částic.

Mokrý mechanický odlučovač zaručuje větší odlučivost pro jemné prachové částice, kromě toho díky styku spalin s vodními kapičkami, vodní vrstvou, clonou nebo hladinou dochází i k částečnému zachycení některých plynných škodlivin, např. oxidu siřičitého. Nevýhodou je značná agresivita kalu. Druhotným účinkem mokrých odlučovačů je jejich příspěvek k odstranění a absorpci těžkých kovů v plynné fázi. Přitom vzniká odpadní voda, která potřebuje úpravu.

Mokrý mechanický odlučovač podle použitého principu odlučování lze rozdělit na sprchové, setrvačné (náplňové, se skrápěnou pohyblivou vrstvou, hladinové), vírové (se smáčenými stěnami, vírníkové), pěnové, proudové (Venturiho) a rotační. [3]

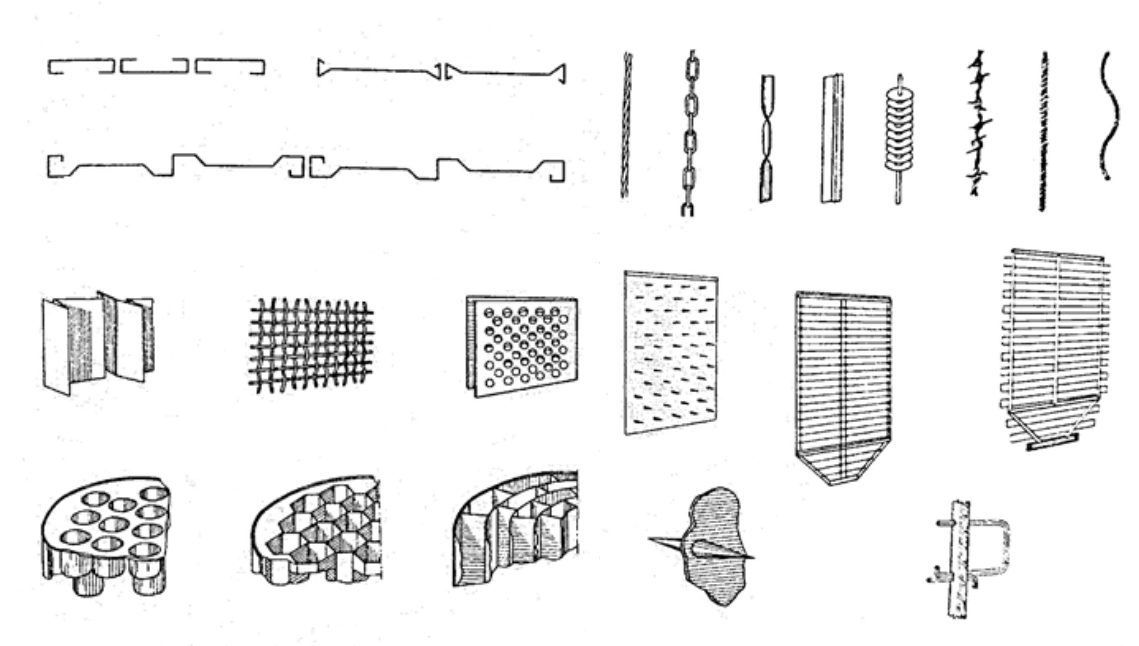


Obr. 2.6 Vícepatrový pěnový odlučovač (vlevo) a vícepatrový pěnový odlučovač se zrnitou vrstvou (vpravo) [3]

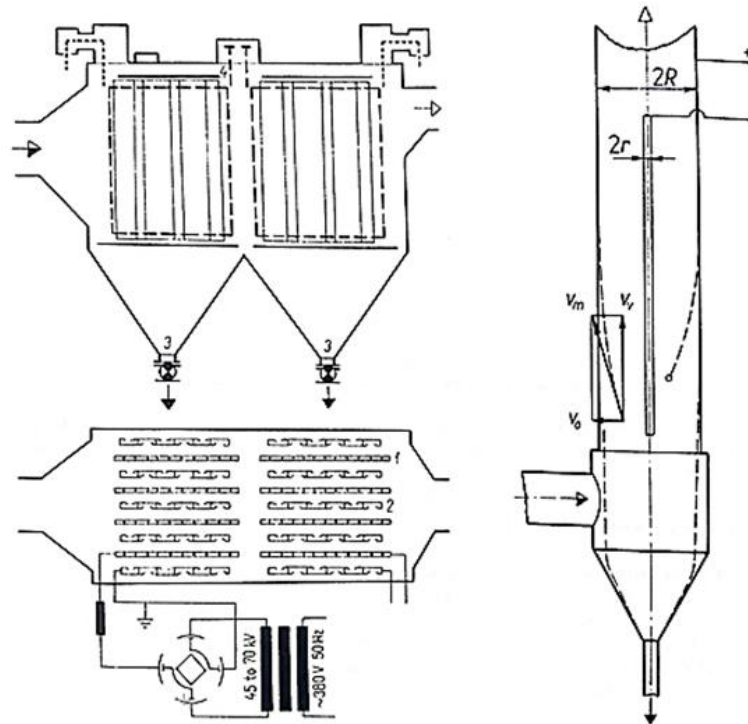
2.1.3 Elektrostatické odlučovače (EO)

Při elektrostatickém odlučování se využívá rozdílných dielektrických vlastností plynu a odlučovaných částic. Hlavní část elektrického odlučovače tvoří soustava usazovacích a vysokonapěťových elektrod. Usazovací elektrody jsou uzemněny a mají kladný náboj. Na vysokonapěťové elektrody je přivedeno velmi vysoké stejnosměrné záporné napětí kolem 30 – 100 kV. Přivedením napětí vzniká mezi usazovacími elektrodami a vysokonapěťovými elektrodami silné elektrické pole. Okolo vysokonapěťových elektrod se vytvoří velké množství záporných iontů, tzv. korónový výboj. Částice prachu ve spalinách, které prochází aktivním prostorem mezi vysokonapěťovými a usazovacími elektrodami jsou bombardovány těmito zápornými ionty a získávají záporný náboj. Záporně nabitě částice prachu jsou vlivem elektrického pole přitahovány na povrch usazovacích elektrod, kde se usazují. Poté se usazený prach uvolňuje mechanickým oklepáváním. Prach padá do výsypek elektrického odlučovače, odkud je odváděn k dalšímu využití nebo uložení.

EO mají specifické možnosti odlučovat i velmi malé částice prachu. Díky nízké spotřebě elektrické energie a malé průtočné rychlosti, která se pohybuje okolo 0,5 až 2 m/s, lze je využít pro značné objemy spalin s nízkou tlakovou ztrátou (50 až 100 Pa). Další výhodou jsou nízké provozní náklady. Nevýhodou je prostorová náročnost a velké počáteční náklady. Jejich použití je především v zařízeních s vyššími nároky na odlučivost. [3]



Obr. 2.7 Příklady typů nabíjecích (vlevo) a usazovacích (vpravo) elektrod [3]



Obr. 2.8 Schéma suchého horizontálního elektrického odlučovače (vlevo) a schéma jednoduchého trubkového vertikálního elektrického odlučovače (vpravo) [3]

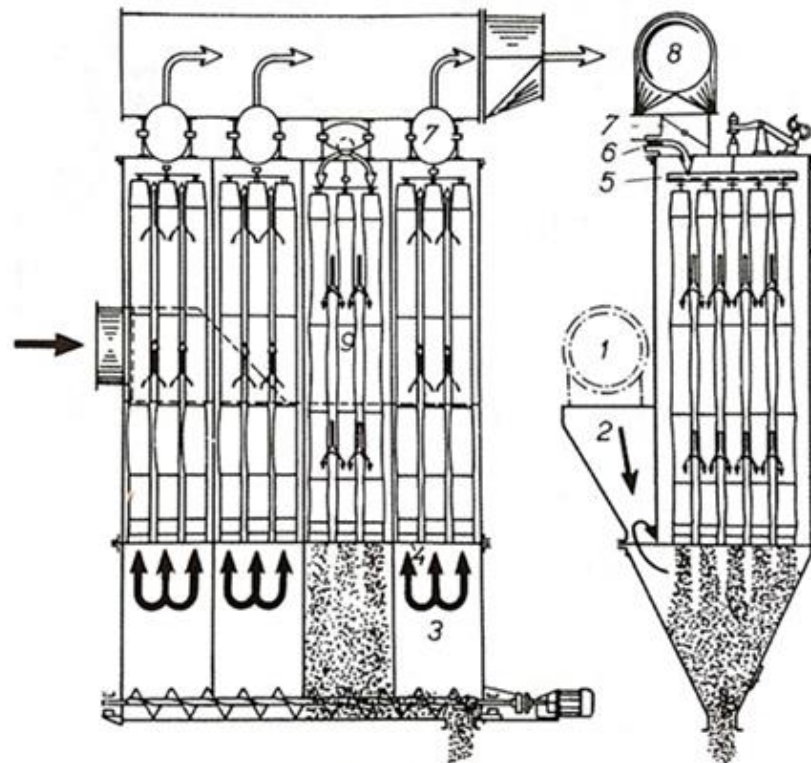
2.1.4 Filtry

V lákových filtrech prach z plynu je zachycen na vláknité vrstvě. Princip funkce filtrů využívá setrvačných sil, přímého zachycení, difuze, a někdy i sil elektrostatických v souhrnném působení.

Odlučivost lákových filtrů je velmi vysoká, dosahuje i více než 99,5 % pro jemné částice a jsou vymezeny zejména druhem látky a provozními podmínkami. Je potřeba zajistit velké filtrační plochy, vzhledem k nízkým průtočným rychlostem čištěného plynu (řadově cm/s). Hodnota tlakové ztráty se pohybuje v rozmezí od 1 do 1,5 kPa.

Tkaninové filtry jsou konstruovány jako skříně, ve kterých je různým způsobem uložena látka. Podle způsobu skládání textilie jsou rozlišovány filtry hadicové a kapsové. Základní způsob práce je střídavý, dochází ke střídání ucpávání a čištění filtrační látky. Filtrační látku lze čistit buď za krátkodobého odstavení odlučovače, nebo jeho části z provozu, anebo za provozu. Ucpaná filtrační tkanina se může čistit různými způsoby, např. oklepáváním jako u elektrických odlučovačů, prolamováním látky nebo zpětným profukem.

Komplikace mohou vzniknout při volbě vhodné látky, jejím naskládáním s ohledem na úsporu místa a čištění filtru za provozu. Pro filtry mohou být použité tkané, pletené, vrstvené nebo vpichované látky. Vlastnosti látky značně ovlivňují odlučovací proces i jeho hospodárnost. Je to především odolnost proti opotřebení, teple i rázům při znečištění, což dohromady charakterizuje životnost látky. Další důležité vlastnosti jsou dány odlučovací schopností, provozní tlakovou ztrátou a odolností proti ucpání. [3]



Obr. 2.9 Schéma látkového hadicového filtru ze zpětným profukem

2.2 Oxidy síry

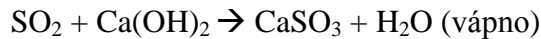
Primární opatření se vyznačují snížením obsahu síry v palivu nebo zvýšením elektrického výkonu elektrárny (relativní snížení emisí na jednotku produkce). Používané postupy dělíme na mechanické, chemické či fyzikální. Mezi užívané metody patří například přechod na palivo s nízkým obsahem síry, využití adsorbentů v systému spalování ve fluidním loži (běžně používaný adsorbent CaO , Ca(OH)_2 nebo CaCO_3 , omezení teploty spalování na přibližně $850\text{ }^\circ\text{C}$).

Přehled sekundárních opatření je uveden níže.

2.2.1 Mokré metody

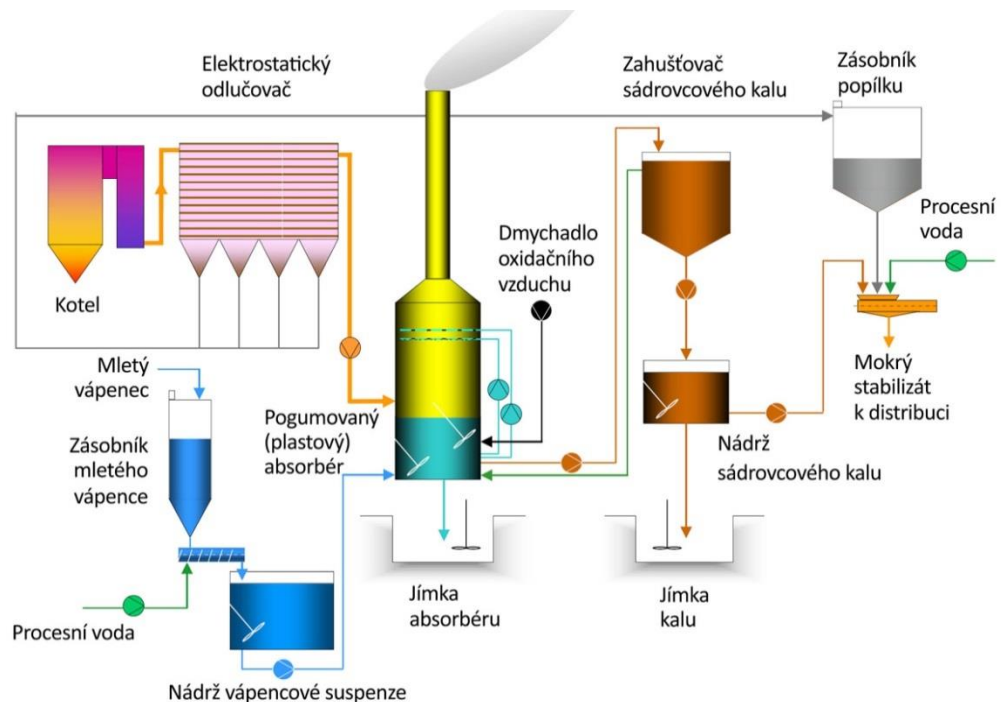
Mokrá vápencová (vápnová) vypírka

Na vstupu do vápencové vypírky je užíván mletý vápenec, příp. vápno ve vodné suspenzi. Výstupem produktem je dihydrát síranu vápenatého, který se dále využívá ve stavebnictví (výroba sádrových stavebních materiálů na bázi sádrovce nebo přísada do cementu).



Proces probíhá při teplotě 50-80 °C v bezvýplňovém absorbéru. Účinnost absorpce je tím větší, čím větší je rychlost rozpouštění absorbentu. Investiční náklady jsou velké, ale na druhou stranu je poskytována vysoká úroveň účinnosti (SO_2 pod 200 mg/m³). Provozní náklady jsou nízké při použití vápence jako sorbentu. Počítá se s vyššími náklady na čištění odpadních vod.

Při použití metody mokré vápencové vypírky dochází k tvorbě nánosů a úsad v absorbérech, odlučovačích kapek, nádržích, čerpadlech a v potrubí. Další významný problém může vzniknout při krystalizaci z roztoku.



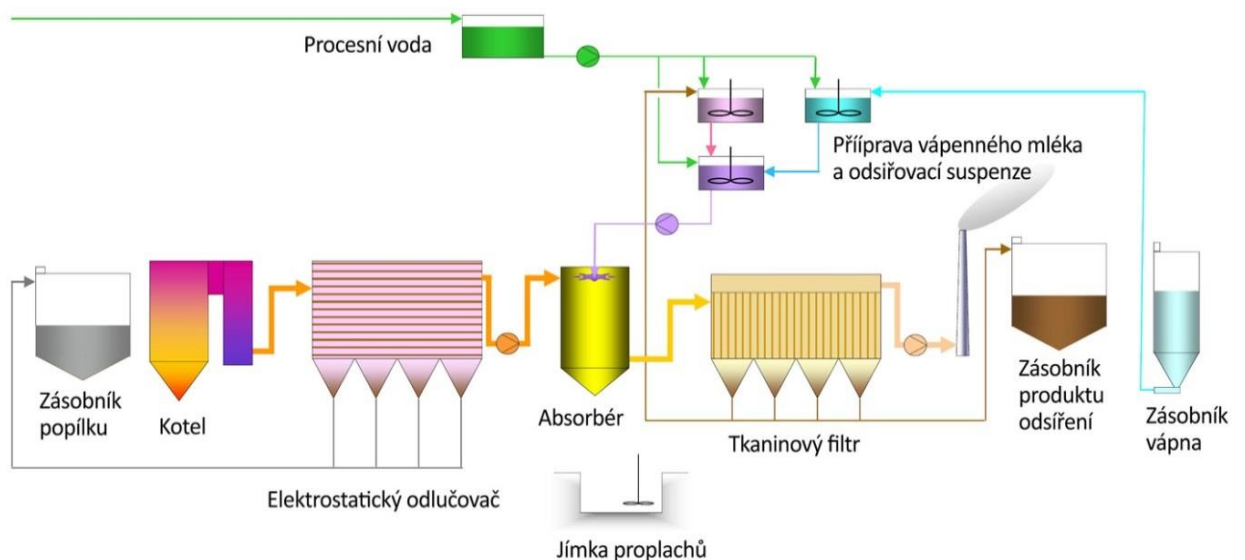
Obr. 2.10. Mokrá vápencová vypírka [7]

2.2.2 Polosuché metody

Při polosuché metodě odsíření spalin se v rozprašovací sušárně rozstříkuje vápenná suspenze. Při reakci vápenné suspenze se spalinami vznikají siřičitany a síran vápenatý. Po rozprašovací sušárně jsou instalované elektroodlučovače nebo látkové filtry na zachycování suchého produktu. Převážná část rtuti Hg obsažené ve spalinách je při tomto odstraněna.

Za účelem lepšího využití absorbentu je část produktu recyklována. Aby měl proces co nejvyšší účinnost odsíření, musí být spaliny ochlazeny na teplotu asi o 10 °C vyšší, než je rosný bod spalin, tj. 60-65 °C. Pokud se nesplní tyto podmínky, účinnost metody je srovnatelná s aditivní metodou, tj. asi 40-70 %. Aby se dosáhlo maximální účinnosti musí být dodrženy zvláštní požadavky na kvalitu vápna (měkce pálené, požadovaná velikost částic). Suchý produkt odsíření se ukládá, může být využit ve stavebnictví.

Realizace polosuché metody pomocí rozprašovací sušárny má nízké investiční náklady. Dosažitelné výstupní koncentrace SO₂ jsou vysoké a pohybují se v rozmezí 800 až 1200 mg/m³. Technologie je provozně poměrně drahá vzhledem k nutnosti použití vápna jako sorbentu.



Obr. 2.11 Polosuchá metoda odsíření spalin [8]

2.2.3 Suché metody

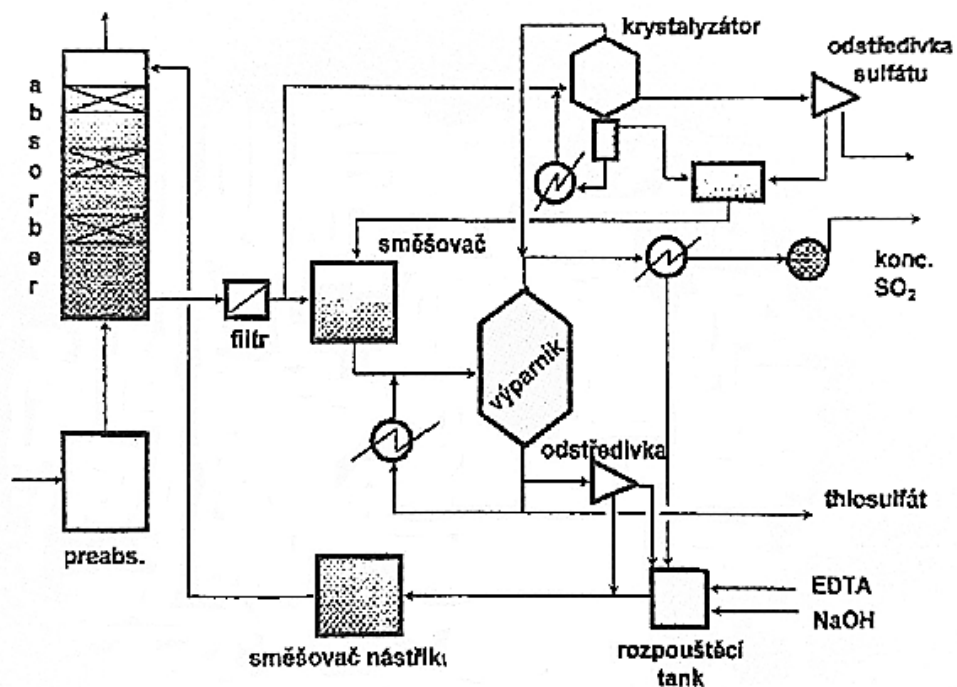
Vápenková aditivní metoda

Při této metodě je jemně rozemletý vápenec vsypáván do spalovacího prostoru. Za vysokých teplot dochází k pálení vápence a reakci oxidu vápenatého s oxidem siřičitým. Produktem odsíření je síran vápenatý s vápnem, který je zachycován ve filtrech. Účinnost odsíření je poměrně nízká, pohybuje se v rozmezí 40-70 %, při dodržení vhodné velikosti částic CaCO_3 . Mezi nevýhody se řadí vysoká spotřeba vápna, tvoření povlaků na teplosměnných plochách, potíže při hydraulické dopravě popílku či deponování popelu.

2.2.4 Regenerativní metody

Technologie Welman-Lard

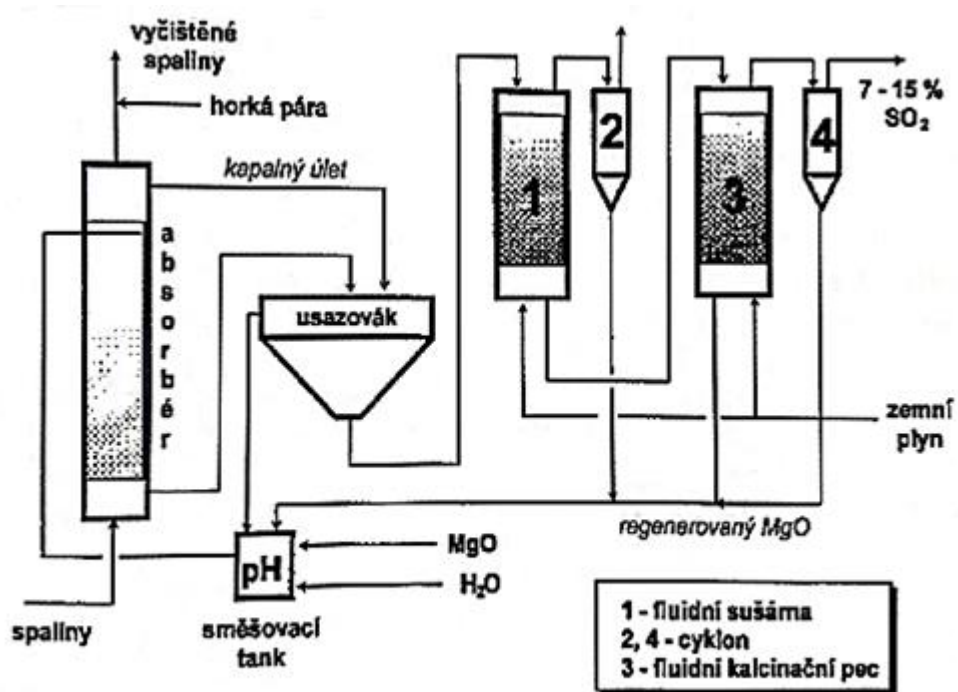
Využívá jevu absorpce SO_2 v roztoku siřičitanu sodného, vzniklý hydrogensířičitan se tepelně rozkládá přímým ohřevem vodní parou. Ve výsledku reakce se vytvoří síran sodný a thionany. Jako produkt odsíření zůstává koncentrovaný SO_2 , který se dále přeměňuje na elementární síru a kyselinu sírovou.



Obr. 2.12 Schéma technologie Welman-Lard [3]

Magnezitový proces

Při magnezitovém procesu dochází k absorpci SO_2 ve vodní suspenzi měkce páleného magnezitu, přičemž vzniká hydrogensířičitan hořečnatý. Neutralizací posledně uvedeného oxidu hořečnatého ve směšovací nádobě vzniká částečně rozpustný sířičitan, který se krystalizuje za určité teploty a pH suspenze. Vzniklé krystaly jsou separované, sušené a pomocí procesu kalcinací ve fluidní (resp. rotační) peci je regenerován MgO . Výslednými produkty jsou koncentrovaný SO_2 a MgSO_4 - vedlejší produkt, který může být využit nebo rozkládán kalcinací. Tato technologie zajišťuje velkou účinnost pro odstranění SO_2 ze spalin i za velmi nevýhodných poměrů absorpce. [3]



Obr. 2.13 Schéma odsiřovacího zařízení s magnezitovým procesem [3]

Citrátový proces

Citrátový proces je absorpce SO_2 v roztoku citranu sodného $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ za nízkého pH okolo 3. Výsledkem je elementární síra, která se tvoří při zavádění H_2S do pufrovaného roztoku. [3]

Karbonátový proces

Do rozprašovací sušárny je vstřikována soda rozpouštěná ve vodě. Suchý výstupní

produkt je složen ze síranu a siřičitanu sodného. Ten je následně zachycován v elektroodlučovači nebo v látkovém filtru. Pomocí tavení s koksem probíhá regenerace. Vzniklá tavenina se dále upravuje na uhličitán a síru.

Adsorpční proces Bergbau-Forschung

Po odstranění tuhých znečišťujících látek jsou spaliny vedeny vrstvou speciálně připraveného koksu. Poté, co je koks nasycen, probíhá jeho regenerace horkým pískem či přehřátou vodní párou, tentokrát spalinami ze zemního plynu v odděleném desorbéru. Během adsorpce se oxid siřičitý oxiduje v důsledku katalytického účinku kovů přítomných v koksu na oxid sírový a v důsledku přítomnosti vodní páry se vytváří kyselina sírová. Produktem jsou zkoncentrované oxidy síry, které podléhají dalšímu zpracování. [3]

2.3 Oxidy dusíku

Primární opatření zahrnují veškeré modifikace provozu nebo projektových parametrů spalovacích zařízení za účelem snížení tvorby oxidů dusíku, případně přeměny již vytvořených NO_x ještě před jejich vypuštěním z prostoru kotle. Jako primární se uplatňují následující opatření: nízký přebytek vzduchu, odstupňování vzduchu v topeništi, recirkulace spalin, omezení ohřevu vzduchu, odstupňování paliva (dospalování), hořáky s nízkými NO_x , konstrukční prvky spalovacího zařízení.

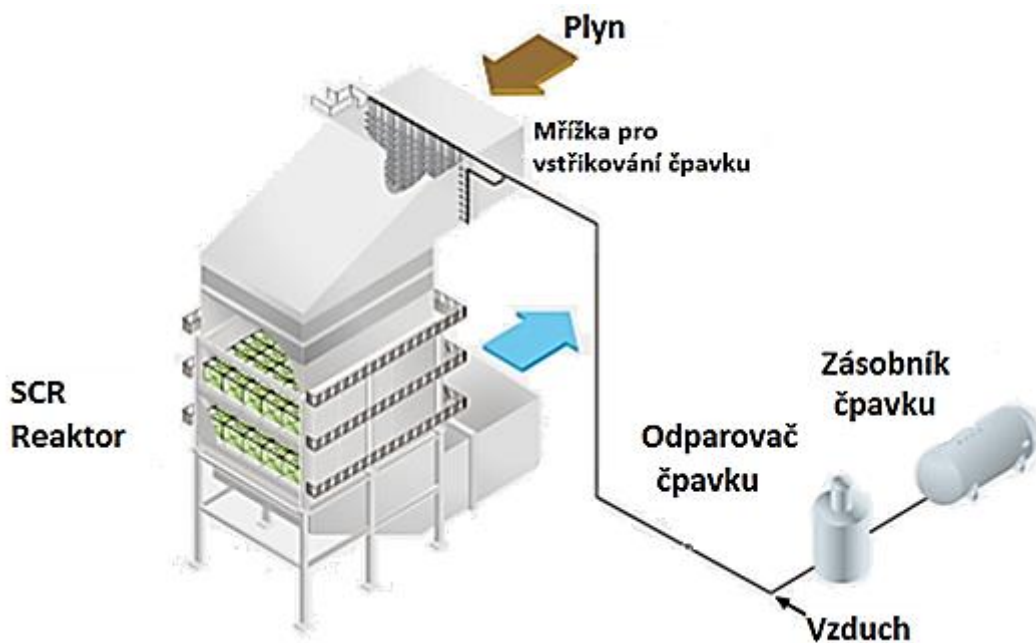
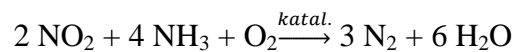
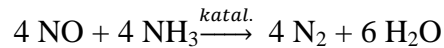
Jako sekundární opatření se využívá technika koncového čištění spalin od oxidu dusíku, které se již vytvořily. Takto je provedena většina technologií ke snížení emisí NO_x ve spalinách, základní princip spočívá hlavně v redukci oxidu dusíku na molekulární dusík. Z nejčastěji používaných technologií lze vyjmenovat selektivní katalytickou redukci (SCR) a selektivní nekatalytickou redukci (SNCR).

2.3.1 Katalytické procesy

Katalytické procesy jsou široce uplatňovány pro snižování emisí NO_x ve spalovacích zařízeních a především u zdrojů emisí s čistými spalinami na výstupu, jako je spalování olejů, plyných paliv nebo odpadní plyny chemických technologií. Hlavní výhodou je, že se jedná o bezodpadové technologie. Výslednými produkty procesu jsou plynné složky, které jsou běžnými neškodnými komponenty atmosféry - elementární dusík a vodní pára.

Selektivní katalytická redukce (SCR)

V technologii SCR jsou oxidy dusíku redukovány amoniakem. Proces je založen na faktu, že v určitých typech katalyzátorů dochází k reakci amoniaku s oxidy dusíku při stanoveném množství kyslíku, který slouží k urychlení reakce. Výhodou SCR je možnost uplatnění pro velké objemy spalin a také nepřetržitý provoz. Proces je možno popsat následujícími rovnicemi:

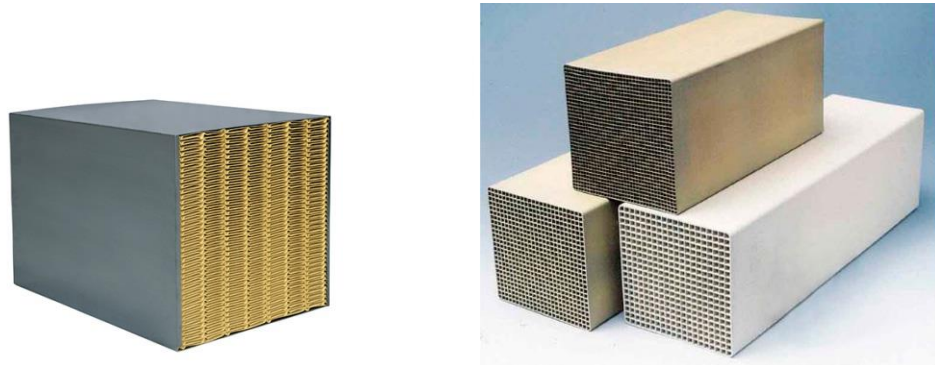


Obr. 2.14 Selektivní katalytická redukce [9]

Existuje řada modifikací SCR, kde dochází ke změně typu a uspořádání katalyzátoru. Jako katalyzátor může být použit V_2O_5 speciálním způsobem nanesený na gama-aluminu: aktivní modifikace Al_2O_3 připravena z hydroxidu hlinitého, který se vyznačuje značnou plochou vnitřního povrchu (stovky m^2/g). V současnosti je alumin nahrazen oxidem titaničitým TiO_2 , který lépe snáší působení kyselých plynů (SO_3). TiO_2 vydrží větší provozní teploty, má menší vnitřní povrch, proto se zvětšuje geometrický povrch katalyzátoru. [3]

Při denitrifikaci neodsířených spalin vzniká riziko tvorby siřičitanu amonného, který je schopen kondenzovat a ucpávat zařízení. Kromě toho je silně korozivní, což ohraničuje

spodní teplotu na 281 °C. S růstem podílu NH_3/NO_x se zvyšuje únik čpavku, což způsobuje problémy, např. v případě vysokého obsahu NH_3 v popílku. Nedokonalá reakce NH_3 s NO_x může způsobit vznik síranu amonného, který se ukládá v následujících zařízeních a zvedá se koncentrace NH_3 v popílku.



Obr. 2.15 Deskový (vlevo) a voštinový (vpravo) typy katalyzátoru [9]

Totální katalytická redukce

Jedná se o redukci oxidů dusíku oxidem uhelnatým, zemním plynem, amoniakem nebo dalšími uhlovodíky. V podstatě jde o katalytické spalování redukovadel. Během spalování se vyčerpají všechna přítomná oxidovadla obsažená v čištěných plynech, a to oxidy dusíku a kyslík. Proto název totální. Jedná se o exotermický proces, který probíhá při teplotě nad 700 °C. V této reakci má kyslík přednost před oxidy dusíku.

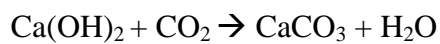
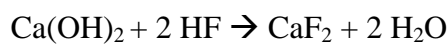
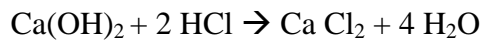
Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

Před vstupem do kotle se nastříkují do proudu horkých spalin vhodná redukční činidla za velmi vysokých teplot (800-1000 °C). Jako činidla může být použitý jak amoniak, tak jiné látky, které uvolňují amoniak při svém tepelném rozkladu. Nejčastěji to bývá močovina či kyselina kyanurová. Zařízení může být součástí kotle nebo v podobě kouřovodu za kotlem. Protože hovoříme o neodsířených spalinách, existuje riziko vzniku kyselého siřičitanu amonného, který má korozivní účinky a může se kondenzovat na částech zařízení při teplotě kolem 280 °C a nižší.

2.3.2 Absorpční procesy

Absorpce v alkalických roztocích nebo suspenzích nabývá největší účinnosti při práci

vrstvy, čímž začnou kyselé škodlivé plyny, zejména SO₂, SO₃, HCl, HF, částečně CO₂ reagovat s hydroxidem vápenatým Ca(OH)₂.



V případě nižšího množství spalin od kotlů je chybějící množství spalin přiváděno přes recirkulační kanál spalin - bypass zpět ke vstupu do absorberu. Vyčištěné spaliny jsou kouřovým ventilátorem dopravovány přes elektroodlučovač do komína. Měření emisí je prováděno za EO, nebo v bypassu dle provozu.

V horní části je absorber přes výstupní kanál a mechanický odlučovač napojen k elektroodlučovači přes vstupní spalinovou mříž.

Elektroodlučovač je složen z jednoho samostatného pole, pole má ve spodní části dva bunkry, tvořené kónickými výsypkami. Pole má svůj vlastní vysokonapěťový transformátor a řídicí jednotku. Uvnitř elektrofiltru jsou ve směru proudění spalin zavěšeny sršící elektrody a jímací elektrody. Princip elektrostatického odlučovače je v tom, že díky vysokému stejnosměrnému napětí jsou sršícími elektrodami emitovány elektrony směrem k jímacím elektrodám. Elektrony během své cesty narážejí na pevné částice ve spalinách a strhávají je sebou k jímacím elektrodám. Na nich se tyto částice shromažďují a pomocí mechanických oklepávačů jsou setřásány do zásobních bunkrů ve spodních částech jednotlivých polí.

Hybridní filtr je kombinací elektrostatického odlučovače a nízkotlakého velkoobjemového pulzního proudového textilního filtru. Kouřové plyny nasycené prachem vstupují do hybridního filtru. Odtud se kouřový plyn nasycený prachem rozvádí do celého průřezu filtru, aby byl zaručen optimální separační výkon. Kouřový plyn nejprve prochází nezávislými elektrostatickými poli v úseku elektrostatického odlučovače, aby se dosáhlo

účinného předběžného sběru prachu. V druhém kroku kouřový plyn prochází úsekem s nízkotlakým velkoobjemovým pulzním proudovým textilním filtrem. Spaliny proudí z vnější strany filtrační hadice dovnitř a čisté spaliny pak přecházejí z otevřené horní části hadice do komory na čisté spaliny. Hadice jsou uspořádány do nevyrovnaných soustředných vzorů, aby se dosáhlo maximální plochy textilie v dostupném prostoru.

Aniž by musely být izolovány od proudu spalin, filtrační hadice se jednotlivě čistí krátkými velkoobjemovými vysokotlakými pulzy vzduchu. Vzduchové pulzy směřují proti normálnímu toku spalin a způsobují náhlé a prudké nafouknutí filtračních hadic. To uvolňuje prach nashromážděný na filtračních hadicích a vyvolává jeho pád do níže umístěných násypek.

Ze sila vápna se pálené vápno dopravuje dopravním žlabem do zásobní - vážní vany. Tam je přiváděna voda dvěma vodními šnekovými čerpadly a smíchá se s páleným vápnem. Přiváděné množství vody se reguluje podle množství dávkování páleného vápna a teploty v hasícím žlabu. V hasícím žlabu reaguje vápno s vodou na vápenný hydrát. [17]

Tab. 3.1 Objemy spalin na PT

	Spaliny vlhké v %	Spaliny suché v %
N₂	cca 68,6	80,7
CO₂	cca 12	14,1
O₂	4,2	4,95
SO₂	cca 0,12	0,16
H₂O	přesně 14,6%	-
Ostatní	cca 0,08	0,09
Celkem	100	100

2.5 Proces čištění spalin na ZEVO Plzeň

Čištění spalin pro zařízení na energetické využití odpadů je provedeno takovým způsobem, aby byly bezpečně splněny smluvní požadavky a podmínky legislativy na ochranu životního prostředí.

Znečištěné spaliny jsou vedeny přívodem do výsypek pro jeden filtr, kde jsou hrubé částice popílku odděleny pomocí změny směru a rychlosti proudění. Jemnější částice jsou odděleny od spalin pomocí hlubokovrstvé filtrace v tkaninovém filtru. Tkaninový filtr je složen ze 4 filtračních komor. Celkem je nainstalováno 1040 hadic filtru s tkaninovou plochou zhruba 2818 m².

Oddělené prachové částice jsou odstraněny z tkanin filtru silným prouděním stlačeného vzduchu a padají do výsypek tkaninového filtru. Odtud jsou pevné zbytky dopravovány z výsypek tkaninového filtru šnekovými dopravníky.

Policejní filtr

Funkce policejního filtru v podstatě je opakováním funkce tkaninového filtru: snížit obsah prachu ve spalinách pomocí hlubokovrstvé filtrace na předepsanou hodnotu prachu. Těžké kovy (zejména rtuť), dioxiny, furany a chloridy jsou odděleny v policejním filtru vstřikováním nového adsorbentu (hašené vápno + aktivní uhlí) do spalinovodu před policejním filtrem. Policejní filtr je složen ze 4 filtračních komor. Celkem je nainstalováno 896 tkanin filtru s tkaninovou plochou zhruba 2652 m².

2.5.3 Mokrý čištění spalin

Vstupující surové spaliny projdou trubkami odshora dolů do pračky 1 a čistý plyn je veden příčným způsobem horizontálně kolem trubek. Surové spaliny se průchodem trubkami ochlazují, zatímco vyčištěné spaliny z druhé pračky se ohřívají.

Pračka 1 (kyselá pračka)

Úkolem hasidla je zchladit spaliny na nekritickou teplotu (méně než 75 °C), než jsou přivedeny do mycí zóny. Úkolem pračky je zejména vyprat ze surových spalin plynné znečišťující látky jako je HCl, HF a těžké kovy. Produkt reakce se akumuluje ve formě kyselého roztoku solí, který je odváděn do neutralizační nádrže.

Sloučeniny:

- chlorovodík, HCl. Rozpustnost chlorovodíku ve vodě je extrémně vysoká. Proto k absorpci dochází v první, mycí fázi. Koncentrace volné kyseliny (úroveň pH) a

koncentrace chlóru jsou omezující faktory pro množství vody v pračce, která se má vypouštět;

- fluorovodík, HF. Fluorovodík se také snadno rozpouští ve vodě; roztok vytvořený v tomto procesu se nazývá kyselina fluorovodíková a také je převážně absorbován v pračce 1;
- rtuť, Hg. Sloučeniny, které lze absorbovat v mokřích pračkách jsou HgCl_2 , Hg_2Cl_2 ; kovovou rtuť ale nelze absorbovat ani kondenzovat ve vodě (vysoký tlak výparů).

Pračka 2 (pračka SO_2)

Spaliny proudí pračkou odspodu vzhůru. SO_2 je absorbován ze spalin pomocí vápenného mléka a reaguje v pračce vytvářením siřičitanu vápenatého a síranu vápenatého (sádra). Siřičitan vápenatý oxiduje na sádru v tzv. „procesu nucené oxidace sádry“ přímo v kalové jínce pračky 2. Čím více vápenného mléka je přiváděno do pračky 2, tím lépe odsiřování pracuje. Ostatní produkty jako popel, SO_3 , HCl a HF jsou také odděleny ve stopových množstvích.

Srážení prachu v mokré pračce

Srážení prachu se provádí vlhčením částic vodou, následovaným odloučením kapek na stěnu nebo do odlučovače kapek. Hrubé částice popílku lze odloučit v pračce 1, v případě jemnějších částic relativně velké kapky přemístí částice spolu s plynem, takže nemůže dojít k oddělení (zejména u částic $< 1 \mu\text{m}$, jež se chovají téměř jako plyn).

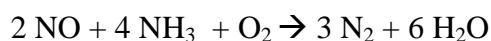
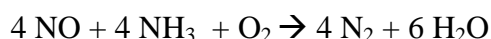
2.5.4 Katalytické čištění spalin

System DeNO_x/DeDiox je umístěn za policejním filtrem a jeho účelem je snižovat množství oxidů dusíku NO_x a dioxinů/furanů ve spalinách na minimum. Redukce koncentrace oxidů dusíku NO_x ve spalinách je prováděna po procesu selektivní katalytické redukce (SCR) se čpavkovou vodou (NH₄OH) na povrchu katalyzátoru. Katalyzátor dále rozbíjí dioxinové/furanové řetězce bez přítomnosti redukčního činidla.

Spaliny proudí skrz obě vrstvy katalytického reaktoru. Regulace množství dodávané čpavkové vody se provádí v závislosti na množství spalin a obsahu NO_x ve spalinách před a za reaktorem. V horkých spalinách se čpavková voda atomizuje a vypařuje pomocí rozprašovacích trysek vybavených dvojitými hubicemi. Atomizace se uskutečňuje s použitím

stlačeného vzduchu. Proud spalin, který je nyní obohacený čpavkem, je veden do katalytického reaktoru.

Selektivní katalytická redukce NO_x se provádí ve voštinovém katalyzátoru (materiál substrátu TiO₂ jako oxid titaničitý a přechodové kovy jako vanad V a wolfram W coby aktivní síta) se čpavkem coby redukčním činidlem vytváří neškodné produkty reakce podle následujícího mechanismu reakce:



Vyčištěné spaliny jsou vypouštěny do atmosféry prostřednictvím komína. [18]

Tab. 3.2 Porovnání emisí a emisních limit pro PT a ZEVO Plzeň

Látka	PT (naměřená hodnota)	Limity	ZEVO (garantovaná hodnota)	Limity
SO ₂ [mg/m ³]	315	1200	25	50
NO _x [mg/m ³]	185	200	70	200
CO [mg/m ³]	125	250	25	50
Tuhé částice [mg/m ³]	1,4	100	2,3	10
Rtuť a její sloučeniny[mg/m ³]	-	-	0,015	0,05
Těžké kovy (Pb, Cu, Cr atd.)[mg/m ³]	-	-	0,25	0,5
HCl [mg/m ³]	-	-	5	10
HF [mg/m ³]	-	-	0,96	1
PCDD & PCFD (dioxiny a furany) [ng/m ³]	-	-	0,05	0,1

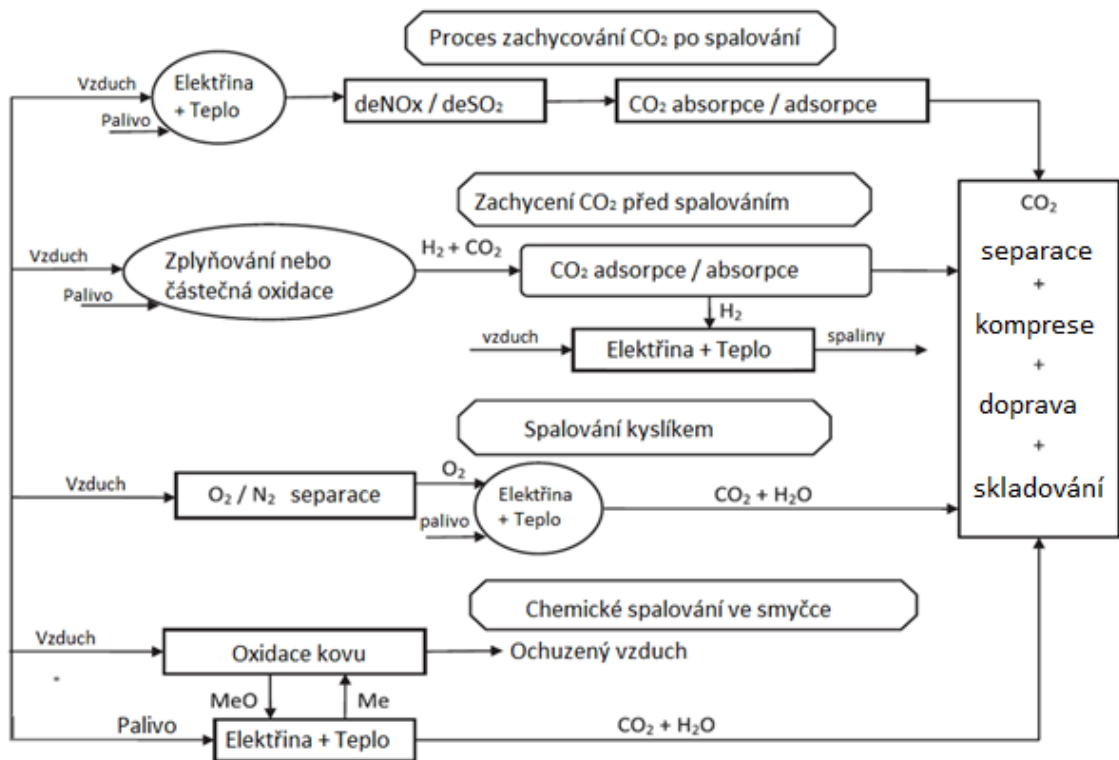
3 Technologie odstraňování CO₂ ze spalin

V této kapitole je uveden přehled různých aspektů zachycování a ukládání oxidu uhličitého CCS (Carbon Capture and Storage). Probereme také technologie na zachycování, separaci, přepravu, ukládání, únik, monitorování a analýzu životního cyklu CO₂. Výběr vhodné metody zachycování velice záleží na druhu zdroje emisí a použitého paliva.

V různých zemích je uvažováno a uplatňováno několik přístupů za účelem snížení emisí CO₂:

- zlepšení energetické účinnosti a podporování šetrného využití energie;
- zvětšení spotřeby nízkouhlíkatých paliv, včetně zemního plynu a vodíku;
- rozvoj obnovitelných zdrojů energie, např. sluneční, větrnou a vodní energie;
- uplatnění inženýrské geologie, např. opětovné zalesnění;
- zachycování a ukládání CO₂.

CCS je schopno zmenšit emisi CO₂ (typicky 85–90%) od velkých zdrojů emisí, jako energetická zařízení a energeticky náročných odvětví průmyslu. Daný přístup předpokládá v první řadě zachycení CO₂ ze spalin. Poté separaci CO₂ ze sorbentu, přepravu a následuje buď ukládání natrvalo, nebo opětovné průmyslové využití. [11]



Obr. 3.3 Technologie zachycování CO₂ [20]

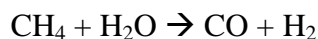
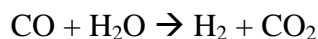
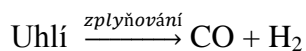
3.1 Technologie zachycování CO₂

3.1.1 Po spalování

Tento typ zachycení odstraňuje CO₂ ze spalin po spalování. Tato technologie byla uskutečněna v malém měřítku se zachycováním CO₂ až 800 t/den. Hlavní výzvou pro zachycení CO₂ po spalování je jeho velká parazitní zátěž. Vzhledem k tomu, že množství CO₂ ve spalinách je obvykle poměrně nízké (tj. 7–14% u uhelných elektráren a jen 4% u zemního plynu), zvyšují se energetické náklady a související náklady na zachycovací zařízení pro dosažení koncentrace CO₂ nad 95,5%, potřebných pro dopravu a skladování. Americká národní laboratoř pro energetické technologie odhaduje, že zachycování CO₂ po spalování by zvýšilo náklady na výrobu elektřiny o 70%. Nedávná studie uvádí, že náklady na elektrickou energii by vzrostly o 65% pro uhelné elektrárny (o 32% pro zařízení na spalování plynu). [11]

3.1.2 Před spalováním

V tomto procesu je palivo upraveno před spalováním. U uhlí předběžná úprava zahrnuje proces zplyňování, který probíhá ve zplynovací komoře za nízkého obsahu kyslíku. Ve výsledku se vytvoří syntetický plyn, který se skládá převážně z CO a H₂. Syntetický plyn pak podstoupí reakci přeměny vodního plynu s parou, která vytvoří více H₂, zatímco plyn CO bude přeměněn na CO₂. Zemní plyn, protože obsahuje hlavně CH₄, může být reformován na syntetický plyn obsahující H₂ a CO. Obsah vodíku může být zvýšen reakcí přeměny vodního plynu s parou a zbytek procesu je podobný popsanému výše procesu pro uhlí.

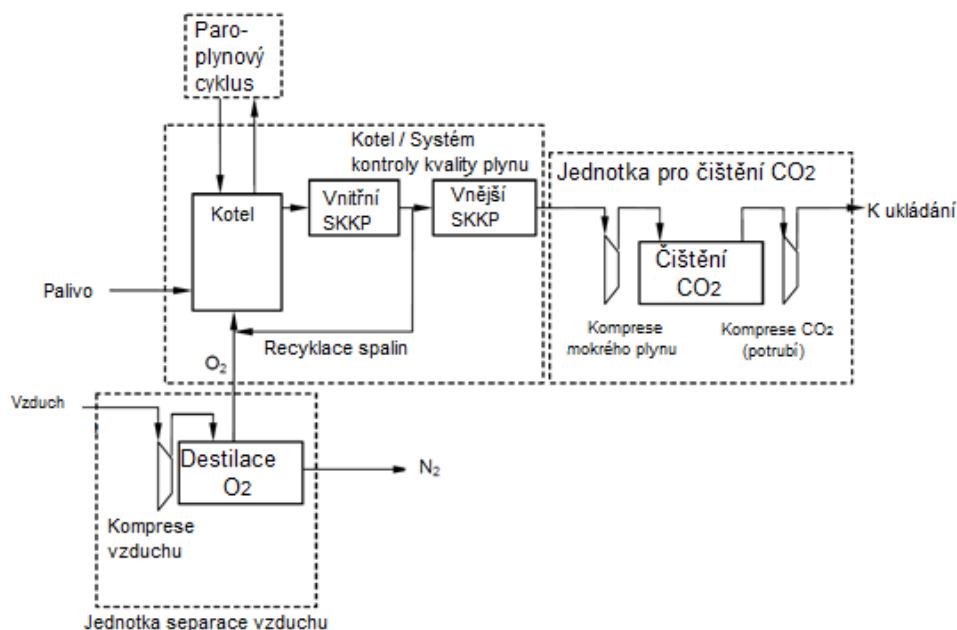


Byla provedena analýza účinnosti a nákladů na moderních zařízeních pro plynové turbíny s kombinovaným cyklem, provozovaných na zemním plynu se systémem pro zachycování emisí CO₂ před spalováním, a dosáhly účinnosti zachycování CO₂ ve výši 80%.

3.1.3 Spalování kyslíkem

Při spalování kyslíkem se místo atmosférického vzduchu používá kyslík pro spalování.

Takový přístup snižuje množství dusíku přítomného ve spalinách. Výhodou tohoto způsobu je podstatné snížení tepelných NO_x . Při použití čistého kyslíku pro spalování jsou hlavními složkami spalin CO_2 , voda, tuhé částice a SO_2 . Tuhé částice a SO_2 mohou být odstraněny klasickými elektrostatickými odlučovači a odsiřovacími metodami resp. Zbývající plyny mají vysokou koncentraci CO_2 (80–98 % v závislosti na použitém palivu), mohou být stlačovány, přepravovány a ukládány. Tento proces je technicky realizovatelný, ale je energeticky náročný, protože spotřebovává velké množství kyslíku, který vyrábí zařízení separace vzduchu. Což má za následek zvýšení nákladů a energetické spotřeby, která může dosáhnout více než 7% ve srovnání s elektrárnou bez CCS. Kromě toho, vysoká koncentrace SO_2 ve spalinách může vyvolat korozi v systému. V současné době nejsou provozovány žádné projekty na bázi spalování kyslíkem v plném rozsahu, ale existuje několik dílčích komerčních demonstračních zařízení po celém světě. [11]



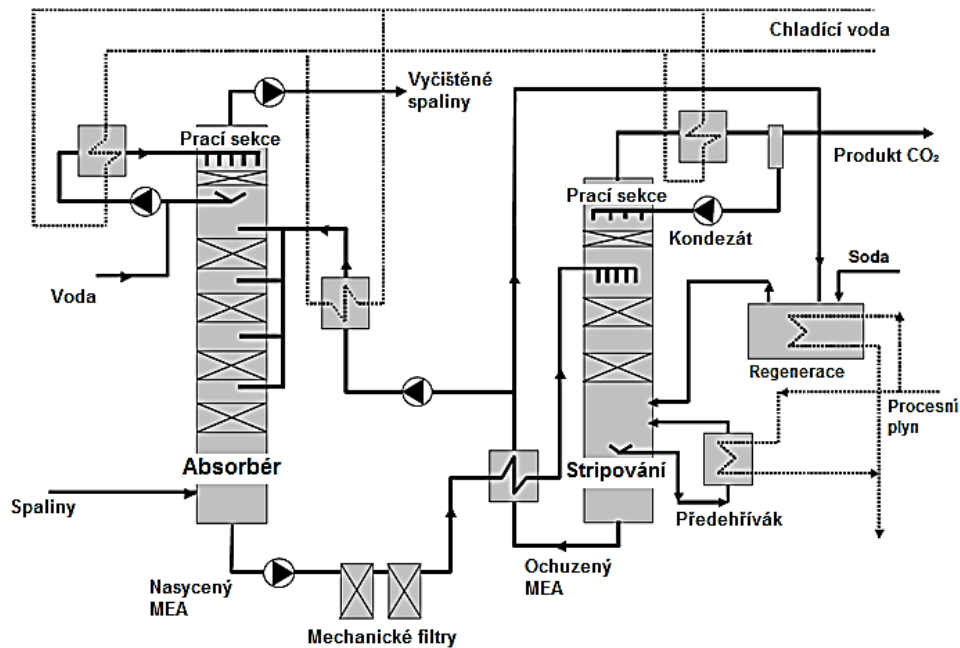
Obr. 3.4 Schéma provedení zařízení spalování kyslíkem [10]

3.2 Separace CO_2

3.2.1 Absorpce

K oddělení CO_2 od spalin se používá kapalný sorbent. Sorbent může být regenerován stripováním nebo pomocí regeneračních procesů: zahříváním a/nebo odtlakováním. Tento proces je nejvyspělejší metodou separace CO_2 . Typické sorbenty zahrnují monoethanolamin (MEA), diethanolamin (DEA) a uhličitán draselný K_2CO_3 . MEA je nejefektivnější pro

absorpci CO_2 s účinností nad 90%. Pilotní absorpční zařízení s 1t CO_2/h bylo zkonstruováno a úspěšně otestováno spolu s technologií zachycení po spalování pro uhelné elektrárny s použitím rozpouštědla obsahujícího 30% MEA: Esbjergværket v Dánsku. V posledních letech získaly pozornost některé jiné sorbenty, jako je například piperazin a iontová kapalina funkcionalizovaná anionty. [11]



Obr. 3.5 Zjednodušené schéma pilotní elektrárny Esbjerg v Dánsku [12]

Jednou z důležitých výzev pro rozsáhlé nasazení této technologie pro CCS je potenciální degradace aminů, která vede ke ztrátě rozpouštědla, korozi vybavení a tvorbě těkavých degradačních sloučenin. Kromě toho, emise aminů mohou degradovat na nitrosaminy a nitroaminy, které jsou potenciálně škodlivé pro lidské zdraví a životní prostředí.

3.2.2 Adsorpce

Na rozdíl od absorpčních procesů, které používají kapalný absorbent, se používá pevný sorbent pro vázání CO_2 na jeho povrchu. Velký specifický povrch, vysoká selektivita a vysoká schopnost regenerace jsou hlavními kritérii pro výběr sorbentu. Typické sorbenty zahrnují molekulární síta, aktivní uhlí, zeolity, oxidy vápenaté a zirkoničitan lithný.

Adsorbovaný CO_2 se může znovu získat výkyvem tlaku (PSA) nebo teploty (TSA) systému obsahujícího sorbent nasycený CO_2 . PSA je komerčně dostupná technologie pro využití CO_2 z elektráren, která může dosáhnout účinnosti až 85%. V tomto procesu se

přednostně adsorbují CO_2 na povrchu pevného adsorbentu při vysokém tlaku, který kolísá na nízký tlak (obvykle atmosférický tlak), aby desorboval adsorbent a uvolnil CO_2 pro následnou transportaci. V TSA se adsorbovaný CO_2 uvolní zvýšením teploty systému vstříkáním horkého vzduchu nebo páry. Doba regenerace je obvykle delší než PSA, ale lze dosáhnout čistoty CO_2 vyšší než 95% a regeneraci vyšší než 80%. [11]

3.2.3 Chemické spalování ve smyčce

Jako nosič kyslíku se používá oxid kovu místo přímého použití čistého kyslíku pro spalování. Během procesu se oxid kovu redukuje na kov, zatímco palivo se oxiduje na CO_2 a vodu. Kov se oxiduje v dalším stupni a recykluje se v procesu. Voda, vedlejší produkt procesu, může být snadno odstraněna kondenzací, zatímco čistý CO_2 může být získán bez spotřeby energie pro separaci. Pro tento proces existuje široká škála oxidů kovů, které jsou cenově výhodné a vhodné, například Fe_2O_3 , NiO , CuO a Mn_2O_3 .

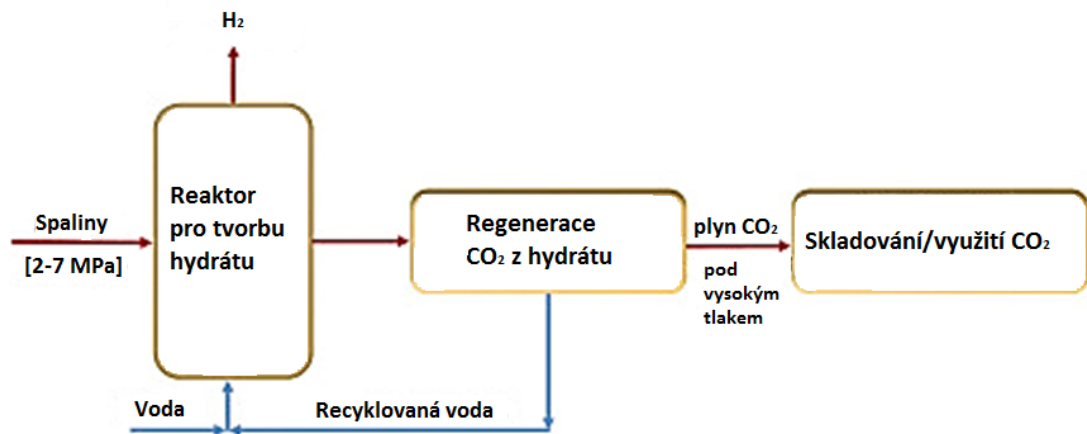
3.2.4 Membránová separace

Membrány mohou být použity pro omezení průchodu pouze na CO_2 , přičemž brání průchodu jiných složek spalin. Nejdůležitější částí tohoto zařízení je membrána, která je vyrobena z kompozitního polymeru, jehož tenká selektivní vrstva je spojena s tlustší, neselektivní a nízkonákladovou vrstvou, která poskytuje membráně mechanickou podporu. Tato metoda byla také použita k separaci jiných plynů, jako je O_2 z N_2 , a CO_2 ze zemního plynu. Vývoj keramických, kovových a polymerních membrán pro membránovou difuzi by mohl vytvořit membrány pro separaci CO_2 výrazně účinnější než jsou absorpční procesy v kapalině. Ačkoliv dochází k významnému vývoji v oblasti separace plynů membránovými systémy, jsou stále daleko od toho, aby možnosti této technologie uplatnily svůj potenciál v plné míře. [11]

3.2.5 Separace na bázi hydrátu.

Separace CO_2 na bázi hydrátu je nová technologie, pomocí které jsou výfukové plyny obsahující CO_2 vystaveny působení vody pod vysokým tlakem, ve výsledku vznikají hydráty. CO_2 ve výfukových plynech je selektivně zapojen do struktury hydrátu a je oddělen od ostatních plynů. Mechanismus je založen na rozdílech fázové rovnováhy CO_2 s jinými plyny, kde CO_2 může tvořit hydráty snáze než jiné plyny.

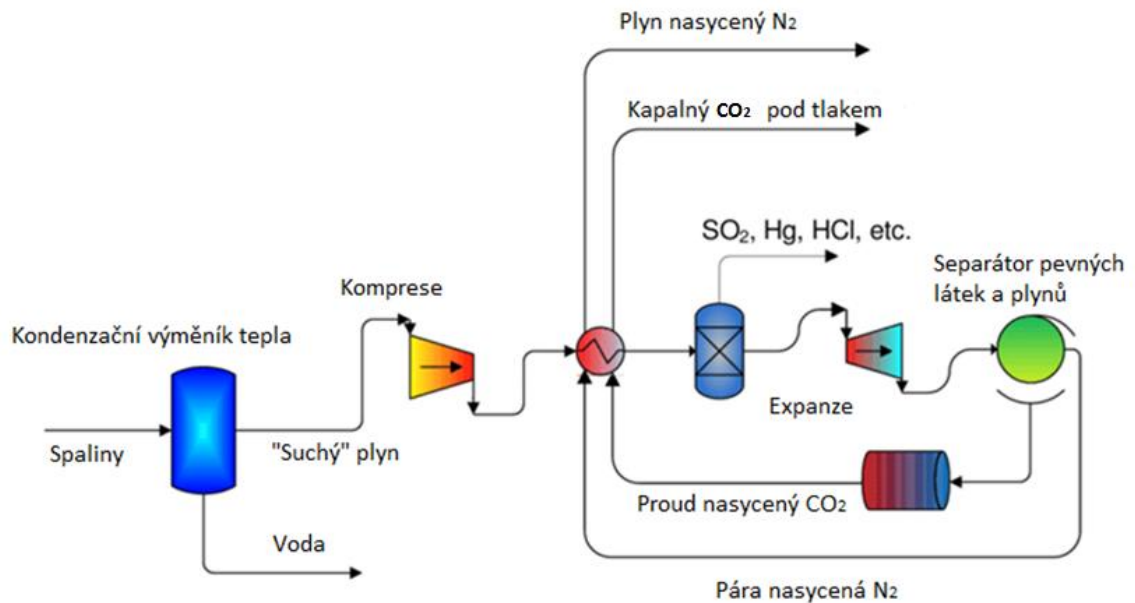
Výhodou této technologie jsou malé energetické ztráty, spotřeba energie zachytávání CO₂ pomocí hydrátu je jen 0,57 kWh/kg CO₂. Zlepšení rychlosti tvorby hydrátu a snížení tlaku hydrátu může zlepšit účinnost zachycování CO₂. Tetrahydrofuran (THF) je rozpouštědlo mísitelné s vodou, které může tvořit pevné struktury hydrátu klatrátu s vodou za nízkých teplot. Přítomnost THF usnadňuje tvorbu hydrátu a často se používá jako termodynamický promotor pro tvorbu hydrátu. Tato technologie je považována za nejslibnější dlouhodobou technologii separace CO₂, která byla nalezena dodnes a je v současné době ve fázi výzkumu a vývoje. [11]



Obr. 3.6 Technologie separace CO₂ na bázi hydrátu [13]

3.2.6 Kryogenní destilace

Kryogenní destilace je proces separace plynů s použitím procesu destilace za velmi nízké teploty a vysokého tlaku, který je podobný jiným konvenčním destilačním procesům s výjimkou toho, že se používá k oddělení složek plyné směsi (vzhledem k jejich rozdílným bodům varu) namísto kapaliny. Pro separaci CO₂ se spaliny ochladí na desublimační teplotu (100 – 135 ° C) a poté se ztuhlý CO₂ oddělí od ostatních lehkých plynů a stlačí na tlak 100–200 atmosférických tlaků. Množství získaného CO₂ může dosáhnout 90–95% spalin. Vzhledem k tomu, že se destilace provádí za extrémně nízké teploty a vysokého tlaku, jedná se o energeticky náročný proces, který se odhaduje na 600–660 kWh na tunu CO₂ získaného v kapalně formě. [11]



Obr. 3.7 Zjednodušené schéma procesu kryogenní destilace [14]

3.3 Doprava CO₂

Jakmile je CO₂ oddělen od zbytku složek spalin, musí být transportován do úložiště nebo do zařízení pro jeho průmyslové využití. Bez ohledu na zvolený konečný osud CO₂ klíčovým prvkem každého projektu CCS je spolehlivý, bezpečný a ekonomicky proveditelný systém dopravy. V závislosti na použitých objemech mohou být využity různé dopravní prostředky, od silničních cisteren až po lodě a potrubí. Potrubí jsou považována za nejschopnější funkční metodu pro přepravu velkých objemů CO₂ na pevnině na velké vzdálenosti. Aby se optimalizoval poměr hmotnost / objem, CO₂ je veden jednak jako hustá fáze buď v kapalných, nebo nadkritických podmínkách.

Další záležitosti by mohly vzniknout ve spojení s nadnárodní přepravou CO₂ a skladováním na moři v důsledku právních aspektů. Dva klíčové dokumenty jsou Úmluva o ochraně mořského prostředí severovýchodního Atlantiku (Úmluva OSPAR) a Londýnský protokol. Tyto smlouvy neumožňují skládkování odpadu v mořském prostředí a rovněž omezují přeshraniční přepravu znečišťujících látek.

3.4 Využití CO₂

Zachycený CO₂ může být transportován pro geologické skladování nebo pro následující využití. Byl navržen integrovaný systém pro regenerace a opětovné využití CO₂ v

průmyslu, zemědělství a výrobě energie. Demonstrační závod v Luzhou v Číně vyrábí amoniak a močovinu s využitím CO_2 (160t / den), zachyceného ze svého výrobního procesu. CO_2 lze použít také v jiných oblastech, jako jsou potravinářské nápoje, chladiva a hasicí plyny. Současné využití CO_2 představuje pouze 2% emisí, ale prognózy předpovídají, že chemické využití by mohlo odstranit 700 megatun CO_2 ročně, což je mnohem více než kombinovaný potenciál technologií jaderných, větrných a celulózových biopaliv. [11]

CO_2 lze využít prostřednictvím mineralizace, což je proces založený na urychlené reakci CO_2 s silikátovými horninami bohatými Mg / Ca nebo anorganickými odpady za vzniku stabilních uhličitánů, které lze dále použít. Nepříznivá kinetika tohoto procesu je překonána buď přímo zvýšením tlaku nebo teploty, anebo nepřímo, použitím agresivních louhovacích činidel. Mezi nepřímými cestami je věnována značná pozornost kolísání pH, protože umožňuje recyklovatelnost chemikálií používaných při separaci a regeneraci čistých produktů.

Ohromnou vědeckou a technickou výzvu představuje fotokatalytická přeměna CO_2 na metan CH_4 nebo metanol CH_3OH . Nedávný pokrok v této oblasti se zaměřil především na vývoj nových katalyzátorů, který je způsoben hlavně pokrokem v nanotechnologiích. Několik fotokatalytických reaktorů bylo testováno na redukci CO_2 ultrafialovým zářením, které jsou převážně provozované v souvislosti s čištěním odpadních vod a čištěním vzduchu. [11]

3.5 Geologické ukládání CO_2

CO_2 lze ukládat do geologických formací, jako jsou hluboké solné akvifery, které nemají jiné praktické využití, a zásobníky ropy nebo plynu. Geologické skladování je v současné době považováno za nejrealizovatelnější variantu pro skladování velkých množství CO_2 potřebných k účinnému zamezení klimatických změn. Typické geologické úložiště může pojmout několik desítek milionů tun CO_2 zachycených různými fyzikálními a chemickými mechanismy.

Pro skladování CO_2 musí být pečlivě vybrány vhodné geologické lokality. Obecné požadavky na geologické skladování CO_2 zahrnují náležitou pórovitost, tloušťku a propustnost horniny zásobníku, horninu s dobrou těsnicí schopností a stabilní geologické prostředí. Pro ukládání CO_2 jsou běžně uvažovány tři geologické formace: vyčerpané zásobníky ropy a plynu, nevytěžitelné uhelné sloje a solné akvifery. Uskladnění do hlubin

oceánu je také možné řešení pro ukládání CO₂, i když environmentální problémy (jako je acidifikace a eutrofizace oceánu) pravděpodobně omezí jeho použití. [11]

3.6 Posouzení emisí CO₂ v životním cyklu

Většina procesů spojených s CCS popsaných výše by vyžadovala výstavbu infrastruktury a instalaci zařízení (např. pračky, kompresory a potrubí), dodatečné použití chemických látek (např. aminu, hydroxidu nebo zirkonátu), pevného odpadu a odpadních vod. Energie by byla také nutná pro výrobu, přepravu, instalaci a provoz těchto zařízení a pro výrobu chemikálií, což by mělo za následek emise CO₂.

Jedním z důležitých aspektů geologického skladování je potenciální únik uloženého CO₂, který by narušil účinnost zadržování CO₂ a nakonec by vedl k vážným následkům pro okolní prostředí, jako je acidifikace a znečištění způsobené mobilizací těžkých kovů. Existují studie týkající se účinků úniku CO₂ na člověka, rostliny a mořské ekosystémy. Vzhledem k vážným následkům a dopadům úniku na naše životní prostředí je nezbytné přiměřené monitorování, aby bylo možné stanovit jeho možné dlouhodobé účinky na člověka a životní prostředí.

CCS je považován za rozhodující součást celosvětového úsilí v boji proti klimatické změně snížením emisí skleníkových plynů. Odhaduje se, že do roku 2050 musí být realizováno více než 3000 projektů CCS, aby bylo dosaženo cíle obnovení globální teploty o 2 °C. Přestože některé technologie týkající se CCS jsou úspěšné, komplexní projekty CCS zahrnující rozsáhlé zachytávání a ukládání ještě nejsou provozovány. [11]

Mezinárodní energetická agentura (IEA) upozornila na řadu bariér na cestě k uskutečnění CCS a doporučila pravidla a normy pro přepravu a skladování CO₂ následujícím způsobem:

- Chybějící tržní mechanismus/pobídka, která je dostatečně velká a dlouhodobá, aby mohla odměnit subjekt, který využívá technologii CCS;
- Neexistence mechanismu, který by penalizoval hlavní zdroje emisí CO₂;
- Nepostačující právní rámec umožňující přepravu a geologické ukládání CO₂ jak na pevnině, tak mimo pevniny;

- Většina současných skladovacích postupů/demonstračních projektů jsou finančně životaschopnější, ale mají omezenou kapacitu pro ukládání CO₂ ve srovnání s oceánskými a solnými akvifery. [11]

Neexistují žádné významné technologické bariéry pro zachycování a geologické ukládání CO₂ pro stávající provoz, ale CCS je energeticky náročný proces, který snižuje celkovou účinnost dotčených energetických/energetických systémů. Je nevyhnutelné, že náklady provozů, vybavených technologií CCS, jsou mnohem vyšší než náklady provozů bez CCS v důsledku snížení neefektivnosti a dodatečných nákladů na instalaci zařízení pro zachycení, dopravu a ukládání. Hlavním problémem CCS jsou vysoké náklady na zachycování CO₂ především ze zředěných průtoků spalin, jako jsou plynové elektrárny a průmyslové spalovací procesy.

Kromě konvenčních metod zachycování a ukládání uhlíku se zvyšuje zájem o některé inovativní způsoby snižování emisí uhlíku, jako je používání biouhlí a biologické odstraňování CO₂. Výroba a skladování biouhlí v půdách může poskytnout současně výhody pro oddělení uhlíku, poskytování energie a úpravu půdy, které mohou obnovit degradovanou zemědělskou půdu a zvýšit výnosy plodin. V posledních letech se mikrořasy ukázaly jako slibná možnost biologické fixace CO₂ a byl proveden intenzivní výzkum s cílem vyvinout vhodné systémy pro odstraňování CO₂ z průmyslových výfukových plynů.

Závěr

Předloženou bakalářskou práci jsem věnovala technologiím čištění spalin ze stacionárních zařízení. Stacionární zdroje patří mezi nejvýznamnější znečišťovatele ovzduší a životního prostředí. V této práci jsem uvedla souhrn dnes existujících metod a technologií čištění spalin od jednotlivých škodlivých složek po spalování. Bakalářská práce zahrnuje problematiku v kostce. Osobně chci takovým způsobem přispět k diskusi o ochraně životního prostředí, přitáhnout pozornost k nutnosti co nejrychlejšího rozvoje a zlevnění představených metod a technologií.

I když výzkum nestojí na místě, a my v současné době máme možnost předložit vyčerpávající popis škodlivých látek, které vypouštíme do ovzduší, nemůžeme si být jistí, jaké následky to může mít v globálním měřítku. Musíme si uvědomit, že během pár století jsme změnili chemické složení a fyzikální charakteristiky zemské atmosféry a už se nedá vrátit k původnímu stavu rovnováhy. Teď je to na nás, předpokládat, vypočítávat a modelovat možné dopady především na lidské zdraví a blahobyt. Protože příroda se neustále mění, a nově vzniklá rovnováha by nemusela být příznivá pro člověka.

Předvedené technologie čištění spalin v druhé a třetí kapitole ukazují, že jsme schopni se zbavit jakéhokoliv znečištění v důsledku lidské činnosti. Ale musíme vzít v úvahu, kolik nás to bude stát, jak bude ovlivněna účinnost jednotlivých zařízení. Nicméně měli bychom si uvědomit i to, v jakém stavu přenecháme kvalitu ovzduší našim dětem. Ekonomická uvědomělost by nás měla naučit zahrnovat hodnotu znečištěného ovzduší do ceny produktu, které jednak vyrábíme, jednak nabýváme. Musíme se naučit hledět do budoucna, nejen honit krátkodobé výnosy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] OBROUČKA, Karel. Látky znečišťující ovzduší. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 80-248-0011-X.
- [2] GODISH, Thad. Air Quality. 4. vyd. Florida: CRC Press LLC, 2004. ISBN 1-56670-586-X.
- [3] KURFÜRST, Jiří (ed.) a kol. Kompendium ochrany kvality ovzduší. 1. Vyd. Chrudim : Vodní zdroje Ekomonitor spol. s. r. o., 2008. ISBN 978-80-86832-38-8.
- [4] Sirouhlík. [online] [cit. 10.3.2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sirouhl%C3%ADk>
- [5] Carbonyl sulfide [online] [cit. 11.3.2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonyl_sulfide
- [6] ŠTĚPÁNEK, Petr. Mechanické odlučování popílku při spalování biomasy. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jiří POSPÍŠIL.
- [7] Mokrá vápencová vypírka. [online] [cit. 2.4.2019]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cisteni-spalin/mokra-vapencova-vypirka/>
- [8] Polosuché odsiřovací zařízení s rozprašováním suspenze. [online] [cit. 2.4.2019] Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cisteni-spalin/polosuche-odsirovaci-zarizeni-s-rozprasovanim-suspenze/>
- [9] Selective Catalytic Reduction (SCR) System. [online] [cit. 2.4.2019] <https://www.mhps.com/products/aqcs/lineup/flue-gas-denitration/>
- [10] Oxy combustion with CO₂ capture. [online] Global CCS institute, 2012 [cit. 12.4.2019]. Dostupné z: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/co2-capture-technologies-oxy-combustion-with-co2-capture/>
- [11] DYC Leung, G Caramanna, MM. Maroto-Valer. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renew Sustain Energy Rev, 39 (6) (2014), pp. 426-443
- [12] J.N. Knudsen, J.N. Jensen, P.J. Vilhelmsen, O. Biede. Experience with CO₂ capture from coal flue gas in pilot-scale: testing of different amine solvents. Energy Procedia, 1 (2009), pp. 783-790
- [13] P. Babu, P. Linga, R. Kumar, P. Englezos. A review of the hydrate based gas separation (HBGS) process for carbon dioxide pre-combustion capture. Energy, 85 (2015), pp. 261-279
- [14] Baxter et al. Cryogenic CO₂ Capture as a Cost-effective CO₂ Capture Process. [online] International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA (2009) [cit. 16.4.2019] Dostupné z: <http://sesinnovation.com/news/documents/cccpittsburghcoalconference.pdf>
- [15] LAPCÍK, Vladimír. Závod na energetické využití komunálního odpadu Chotíkov. [online] Ostrava, 2011. [cit. 4.4.2019] Dostupné z: https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX1BMSzE1OTVfcG9zdWRla0RPQ18xLnBkZg/PLK1595_posudek.pdf

- [16] Vyhláška č. 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. [online] [cit. 25.4.2019]
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415#prilohy>
- [17] Interní informace poskytnuté společností Plzeňská Teplárenská. Místní provozní předpis. Odsíření spalin.
- [18] Interní informace poskytnuté ZEVO Plzeň. Místní provozní předpis spalovně ZEVO Plzeň.
- [19] Schéma ZEVO Plzeň. [online] [cit. 10.4.2019] Dostupné z: <https://www.zevoplzen.cz/schema>