

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE



**Snižování emisí oxidů dusíku
v uhelném tepleárenství a elektrárenství**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Dvořák

Bakalant: Milan Hroníček

2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Milan Hroníček

Územní technická a správní služba

Název práce

Metody pro snižování emisí oxidů dusíku z výroby elektřiny a tepla

Název anglicky

Methods for reducing nitrogen oxide emissions from power and heat production

Cíle práce

1. zhodnotit emise NOX na životní prostředí České republiky
2. nalézt známé metody pro snižování obsahu NOX v emisích ze spalovacích zdrojů
3. porovnat metody denitrifikace spalin podle dopadů na životní prostředí, množství vstupů surovin a výstupů zbytků po spalování paliv a čištění emisí

Metodika

1. Na základě dostupných dat a informací budou zhodnoceny dopady emisí NOX na životní prostředí. Bude určen jejich význam pro hodnotu jednotlivých indikátorů dopadů.
2. Na základě rešerše budou nalezeny metody, které se používají pro denitrifikaci spalin ve světě a v ČR
3. Dle dostupných dat budou porovnány jednotlivé metody denitrifikace z hlediska vlivu na životní prostředí, množství a typu vstupních surovin a vystupujících látek po čištění spalin.

Doporučený rozsah práce

40 stran textu

Klíčová slova

NOX, výroba energie a tepla, čištění splalin, vstupy a výstupy dusíku

Doporučené zdroje informací

AYRES, R.U., AYRES, L.W., 2002: A Handbook of Industrial Ecology. Edward Elgar Publishing, Northampton, 680 s. ISBN 1 84064 506 7

KOČÍ, V., 2009: Posuzování životního cyklu – Life Cycle Assessment – LCA. Ekomonitor, Chrudim, 263s. ISBN 978-80-86832-42-5

Vědecká a odborná literatura v dané problematice

VEJVODA, J., 2003: Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. 1. vyd. Praha: VŠCHT. ISBN 80-708-0517-X.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jaroslav Dvořák

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 19. 3. 2015

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2015

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan

V Praze dne 12. 04. 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Dvořáka a že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Chodově dne 11. 04. 2016

Milan Hroníček

Poděkování:

Chtěl bych tímto velmi poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Dvořákovi za vstřícný přístup a trpělivost při vedení mé práce.

Abstrakt:

Tématem bakalářské práce jsou oxidy dusíku, které vznikají při spalování uhlí v teplárnách a elektrárnách. Oxidy dusíku mají negativní vliv na životní prostředí. V bakalářské práci jsou tyto vlivy specifikovány a je provedeno vyhodnocení jejich působení na životní prostředí.

Mimo dopravu je hlavním emitentem oxidů dusíku do ovzduší spalování uhlí ve stacionárních zdrojích uhelných elektráren a tepláren. Množství emisí závisí na typu topeniště, umístění hořáků, druhu paliva i teplotě ve spalovacím prostoru. V bakalářské práci jsou identifikovány známé metody, které se používají k omezení emisí těchto oxidů dusíku a nalezené metody jsou porovnány z několika hledisek: podle dopadů na životní prostředí, finanční náročnosti opatření, množství vstupů surovin, množství výstupu zbytků po spalování paliv a po čištění emisí.

Potřebná data a informace pro splnění cílů bakalářské práce byly získány z literárních zdrojů, z odborných a vědeckých článků, z podnikových dat i z údajů poskytnutých provozovateli stacionárních zdrojů znečištění. Součástí práce je také vymezení právního rámce, který upravuje problematiku oxidů dusíku v České republice a je z části transponován z evropské legislativy.

Klíčová slova:

oxidy dusíku

výroba energie a tepla

čištění spalin

vstupy a výstupy dusíku

uhlí

Abstract:

Topic of the bachelor thesis is focused on nitrogen oxides which are produced during coal combustion in heating plants and power stations. Nitrogen oxides have negative impact on the environment. In this thesis are specified the impacts and provided evaluation of impacts on the environment.

With the exception of transportation, the main producers of nitrogen oxides into the atmosphere are stationary sources such as coal power plant and heating plants. The amount of emissions depends on type of boiler, location of burner, type of fuel and temperature in combustion chamber. The bachelor thesis identifies know methods which are used for reduction of emission of nitrogen oxides and compares identified methods on these aspects:

According to impacts on the environment, According to financial performance measures, According to the amount of material input, According to the amount of output residue after fuel combustion and after emission cleaning.

Required data and information for realisation of this bachelor thesis were acquired from literature, technical and scientific journal articles and papers. The thesis includes definition of the legal framework, which regulates the issue of nitrogen oxides in the Czech Republic and it is partly transposed from EU legislation.

Keywords:

nitrogen oxides emission

energy and heat production

exhaust cleaning

inputs and outputs of nitrogen

coal

Obsah

1. ÚVOD	9
2. CÍLE PRÁCE	9
3. OXIDY DUSÍKU	10
3.1 Dusík	10
3.2 Oxidy dusíku.....	10
3.2.1 Procesy vzniku NO _x	11
3.2.2 Oxidy dusíku v České republice.....	14
3.2.3 Oxidy dusíku v Evropské unii.....	15
3.3 Legislativní rámec řešící problematiku oxidů dusíku	17
3.4 Souhrn dopadů emisí oxidů dusíku na životní prostředí.....	20
3.4.1 Oxid dusný (N ₂ O).....	20
3.4.2 Oxid dusnatý (NO).....	21
3.4.3 Oxid dusičitý (NO ₂)	22
3.4.4 Ozon (O ₃)	22
3.4.5 Oxidy dusíku jako prekurzory PM	26
3.4.6 Oxidy dusíku jako okyselující látky.....	28
4. METODY SNIŽOVÁNÍ EMISÍ OXIDŮ DUSÍKU	32
4.1 Primární opatření.....	32
4.1.1 Spalování s nízkým přebytkem vzduchu	34
4.1.2 Odstupňování (postupné dávkování) vzduchu	35
4.1.3 Recirkulace spalin	36
4.1.4 Odstupňování paliva.....	36
4.1.5 Nízkoemisní hořáky	37
4.1.6 Fluidní spalování	40
4.1.7 Práškové kotle.....	44
4.1.8 Optimalizace spalovacího procesu	45
4.2 Sekundární opatření	46
4.2.1 Suché metody	46
4.2.1.1 Selektivní nekatalytická redukce (SNKR).....	46

4.2.1.3	Redukce NO _x na aktivním koksu	53
4.2.1.4	Radiační metoda	54
4.2.1.5	Experimentální proces	54
4.2.2	Mokrý metody	55
4.2.2.1	Proces SHL (Saarberg-Holter-Lurgi)	55
4.2.2.2	Kombinovaný způsob Walther	55
4.2.2.3	Proces SNO _x (Haldar – Topsøe)	56
4.2.2.4	Proces DESONOX	57
4.2.2.5	Proces SHELL	57
4.2.2.6	Proces Bergbau-Forschung-Uhde	57
4.2.2.7	Proces Walther	58
5.	METODY A ZDROJE DAT	58
5.1	Teoretická část	58
5.1.1	Dusík a oxidy dusíku	59
5.1.2	Legislativní rámec	59
5.1.3	Dopady oxidů dusíku na životní prostředí	59
5.1.4	Metody snižování emisí NO _x	59
5.1.5	Data z provozu stacionárních zdrojů	59
5.1.5.1	Elektrárna Počerady	60
5.1.5.2	Elektrárna Dětmarovice	63
5.1.5.3	Elektrárna Tisová	65
5.1.5.4	Teplárna Strakonice	66
5.2	Praktická část	67
6.	VÝSLEDKY	68
6.1	Dusík a oxidy dusíku	68
6.1.1	Statistické údaje	69
6.2	Legislativní rámec	71
6.3	Metody snižování emisí NO _x	72
6.4	Data od provozovatelů stacionárních zdrojů znečištění	74
7.	DISKUSE	76
8.	ZÁVĚR	79
9.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	81

1. ÚVOD

Chemické složení atmosféry není stálé a mění se již po mnoho milionů let. Změny však probíhaly v dlouhém časovém období a jejich příčinou byl přirozený vývoj naší planety. V posledních přibližně 200 letech je patrný i vliv člověka na složení atmosféry, který byl odstartován zejména průmyslovou revolucí a širokým využíváním fosilních paliv. V této době se při budování zdrojů znečištění hledělo více na ekonomické a výkonové parametry, než na dopady na životní prostředí. Koncentrace emisí v ovzduší u větších spalovacích zdrojů byla řešena vysokými komíny, aby došlo k jejich rozptýlení do širokého okolí.

V posledních desetiletích zaznamenáváme radikální změny podnebí, které lze jen stěží vysvětlit přírodními procesy. Proto moderní věda hledá možná vysvětlení těchto změn i v antropogenním vlivu na životní prostředí. Tak jak byly postupně zjišťovány škodlivé účinky jednotlivých znečišťujících látek vypouštěných při spalování fosilních paliv, byly do legislativy vyspělých zemí zaváděny pro tyto látky emisní limity.

O tom, že znečišťování ovzduší je významný problém, který má vliv i na klima Země, jsou i mezinárodní snahy o řešení tohoto problému. Základním dokumentem pro řešení změny klimatu zůstává Rámcová úmluva OSN o změně klimatu. Jejím konečným cílem, na kterém se shodlo 195 států včetně všech hlavních rozvinutých a rozvojových zemí, je dosáhnout "stabilizace koncentrací skleníkových plynů v atmosféře na úrovni, která zabrání nebezpečnému antropogennímu ovlivnění klimatického systému".

2. CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je na základě rešerše:

- definovat oxidy dusíku a identifikovat způsoby jejich vzniku zejména při spalování uhlí v teplárnách a elektrárnách,
- získat informace o emisích NO_x v České republice (dále jen „ČR“) a ve státech Evropské unie (dále jen „EU“), a vyhledat legislativní rámec, který řeší problematiku oxidů dusíku na území ČR i Evropského společenství,
- zjistit dopad oxidů dusíku na životní prostředí, tj. v čem spočívá jejich nebezpečí pro člověka i pro klima Země, jejich přímý vliv i vliv jako prekurzoru dalších znečišťujících látek,
- jedním z hlavních cílů práce je najít metody, které se používají ke snížení emisí oxidů dusíku, a také dohledat účinnost nalezených metod,

- získat reálná data od provozovatelů stacionárního zdroje znečištění a tato porovnat s daty získanými z rešerše.

Jako další krok bude provedeno:

- vyhodnocení jednotlivých metod z hlediska jejich účinnosti,
- vyhodnocení jednotlivých metod z hlediska vstupů materiálu pro denitrifikaci a výstupu zbytků po denitrifikaci.

3. OXIDY DUSÍKU

3.1 Dusík

Dusík je jedním ze základních prvků naší atmosféry a je ve velké míře zastoupen také na planetách sluneční soustavy, kde je pátým nejčastějším prvkem. Dusík je plyn bez barvy, chuti a zápachu, není toxický ani jinak nebezpečný. Je lehčí než vzduch, ve vodě méně rozpustný než kyslík. Patří mezi biogenní prvky a je součástí všeho živého. Dusík je tvořen pevnou trojnou vazbou dvouatomové molekuly plynného dusíku N_2 (energie vazby přibližně 650 KJ/mol), která mu dává charakter inertního plynu (to znamená, že reaguje s jinými chemickými sloučeninami pouze za vysokých teplot a tlaků). Z tohoto důvodu se vyskytuje převážně v ovzduší, kde tvoří přibližně 71 % zemského ovzduší; jiný zdroj uvádí 78 % (ARNIKA, 2014). V litosféře je zastoupen nepatrně - ve vyvěřelých horninách je ho obsaženo okolo 20 ppm, v sedimentech o něco víc, což je způsobeno organickými zbytky v sedimentech. V hydrosféře se dusík vyskytuje zejména ve formě dusičnanových a amonných iontů (MOLDAN, 2009).

3.2 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku tvoří sloučeniny dusíku a kyslíku. Jako oxidy dusíku označujeme oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2), pro které se používá obecná zkratka NO_x . Výskyt oxidu dusnatého a dusičitého v troposféře je z hlediska škodlivého vlivu na životní prostředí nejvýznamnější. V ovzduší se dále z dusíkatých sloučenin vyskytují ve větším množství amoniak NH_3 a oxid dusný (N_2O), druhá nejčastější forma (ARNIKA, 2014).

Mimo tyto sloučeniny se v ovzduší vyskytují v menším množství též oxid dusitý (N_2O_3), který se bezprostředně rozkládá na NO + NO_2 a oxid dusičný (N_2O_5), který vzniká oxidací NO_2 ozonem (O_3) a rychle reaguje s vodní párou za vzniku kyseliny dusičné (HNO_3). Tato látka významně přispívá ke kyselému charakteru srážkových vod.

Složky mimo N_2 jsou označovány jako reaktivní dusík. V atmosféře mají krátkou dobu setrvání (několik dnů) a jsou odstraňovány především ve formě iontů NH_4^+ a NO_3^- (VEJVODA, 2003).

3.2.1 Procesy vzniku NO_x

Nejvýznamnějšími zdroji NO_x jsou spalovací procesy při spalování fosilních paliv, a to zejména ve stacionárních zdrojích (elektrárny, teplárny, domácnosti) a v mobilních zdrojích - spalovacích motorech (VEJVODA, 2003).

Nejvíce fosilních paliv, zejména uhlí, je spalováno v uhelných elektrárnách a teplárnách. Výroba elektrické energie až na malé výkyvy dlouhodobě rostla. Od roku 2012 však byla zaznamenána stagnace, v roce 2013 dokonce došlo k meziročnímu poklesu výroby o 0,6 %. Také se mění složení zdrojů elektřiny. Postupně klesá výroba v parních elektrárnách (tedy největších emitentech) a roste podíl jaderné energie a energie z obnovitelných zdrojů. Parní elektrárny, které spalují zejména hnědé uhlí, vyrobily v roce 2013 57,4 % elektřiny, zatímco jaderné elektrárny 35,3 % (ISSAR, 2014).

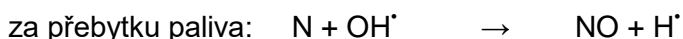
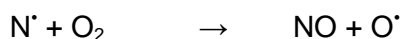
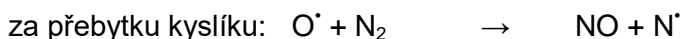
Hlavními faktory, které při spalování ovlivňují tvorbu oxidů dusíku, jsou:

- teplota plynů ve spalovacím prostoru,
- doba zdržení plynů ve vysokoteplotní zóně,
- koncentrace kyslíku a dusíku ve spalovacím prostoru,
- vstupní teplota vzduchu do spalovacího prostoru.

Při spalování paliva vznikají tři typy oxidů dusíku:

a) Vysokoteplotní NO_x

Vznikají oxidací dusíku ze spalovacího (atmosférického) vzduchu za vysoké teploty. Mechanismus vzniku vysokoteplotních NO_x zahrnuje následující reakce při spalování uhlí:



Hlavními faktory, které ovlivňují množství vysokoteplotních oxidů dusíku, jsou: teplota ve spalovacím prostoru, koncentrace atomárního kyslíku a doba setrvání spalin v pásmu hoření. Koncentrace oxidů dusíku se zvyšuje lineárně s rostoucí koncentrací atomárního kyslíku a exponenciálně s rostoucí teplotou.

Teplota [°C]	700	900	1200	1600	1800
Koncový NO [10 ⁻⁴ % obj.]	11	68	420	1920	3300

Tab. č. 1 Závislost tvorby vysokoteplotních NO_x na teplotě. Zdroj: Vejvoda, 2003

Tvorba vysokoteplotních NO_x je pomalá reakce a vyžaduje čas k dosažení rovnováhy (VEJVODA, 2003).

b) Palivové NO_x

Vznikají z dusíku, který je chemicky vázán v palivu. Při spalování se vytvářejí jednoduché sloučeniny (s vazbami N-H nebo N-C) z dusíku v palivu (N-X) a následně reagují s látkami s obsahem kyslíku za vzniku NO a s látkami obsahujícími dusík za vzniku N₂. Mechanismus přeměny N na NO probíhá ve třech krocích:

- při odplynění dusíku v uhlí,
- při spalování dusíku obsaženém ve vzniklém plynu,
- při spalování dusíku v koksu.

Dusík obsažený v palivu se přemění na NO ve spalinách jen částečně. Podíl přeměněného dusíku přecházejícího do spalin ve formě NO k celkovému obsahu dusíku se nazývá konverzní poměr v a je vyjádřen vztahem:

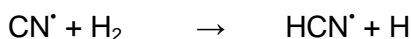
$$v = \frac{\text{N v palivu přeměněný na NO}}{\text{N v palivu organicky vázaný}} < 1$$

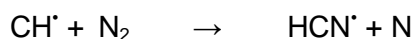
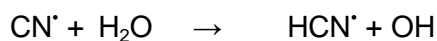
S rostoucím obsahem N v palivu tento poměr v klesá. Při nízkém obsahu dusíku vázaného v palivu se na NO_x přemění relativně větší množství, se stoupajícím množstvím dusíku v palivu konverze klesá. Rychlost konverze roste s teplotou ohřevu a roste také v blízkosti plamene s množstvím kyslíku. Při spalování uhlí se pohybuje procento nezreagovaného dusíku mezi 10–25 % (VEJVODA, 2003).

c) Promptní NO_x

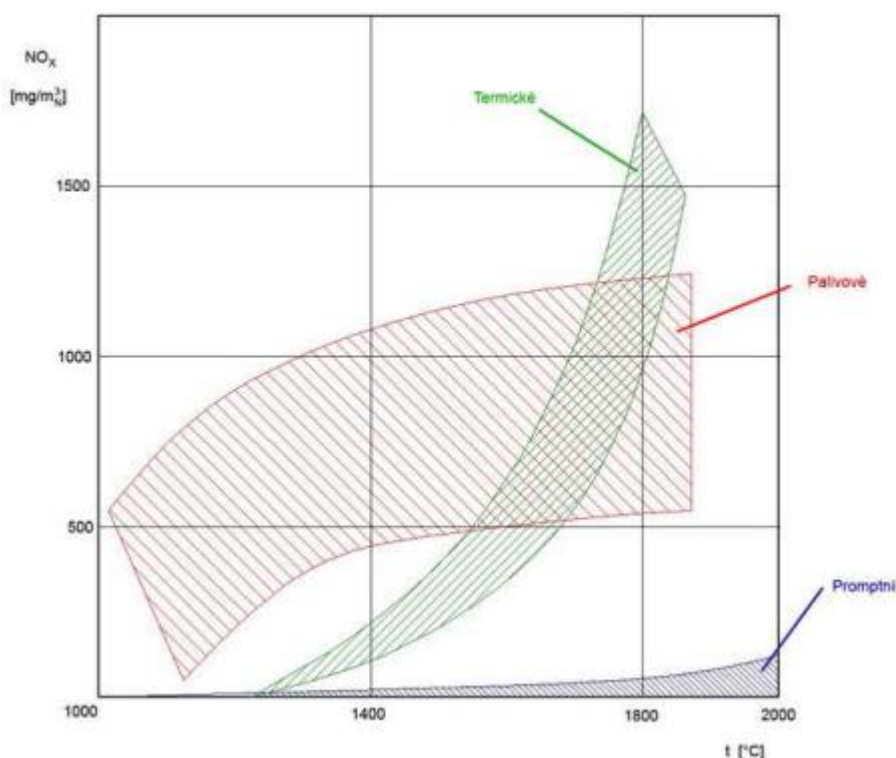
Vznikají z chemicky vázaného dusíku při relativně nízkých teplotách hoření. Na okraji plamene reagují uhlovodíkové radikály s dusíkem a následně probíhá oxidace HCN na NO. K tomuto způsobu tvorby NO_x dochází při velmi vysoké rychlosti oxidace.

Mechanismus vzniku promptních NO_x popsal C. Fenimore:





Následný stupeň přeměny HCN na NO závisí na stechiometrii a teplotě. Při nadstechimetrickém spalování (spalování s přebytkem kyslíku) je podíl promptních NO_x na celkovém obsahu NO_x ve spalinách nízký, ale při podstechimetrickém spalování (spalování s přebytkem paliva) za nízkých teplot může jejich podíl dosáhnout až 25 % (VEJVODA, 2003; ИМДОС-М, 2015).



Obr. č. 1: Tvorba jednotlivých typů NO_x při spalování uhlí.

Zdroj: ČVUT, 2015

Ve většině případů je do ovzduší emitován oxid dusnatý (NO), který tvoří až 5 % obsahu znečišťujících látek ve spalinách. NO při ochlazení rychle oxiduje na oxid dusičitý (NO₂). Rychlost této oxidace je úměrná koncentraci NO a při relativně nízkých koncentracích ve spalinách je velmi pomalá, takže na celkovém obsahu NO_x ve spalinách se NO₂ podílí nejvýše 10 % (VeJVoda, 2003).

Na základě studie osmi nových uhelných elektráren v Číně, ve kterých jsou instalovány kotle různých kapacit i provozních zatížení, a které spalují hnědé i černé uhlí, bylo prokázáno, že větší jednotky produkují méně emisí NO_x a také, že při spalování černého uhlí je produkováno více emisí NO_x než u hnědého uhlí (MA, 2016).

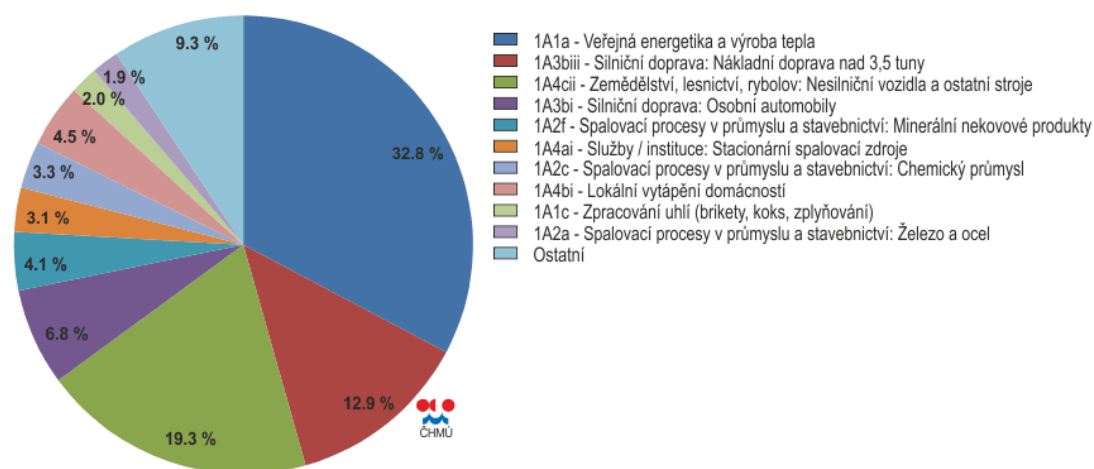
Emise NO_x ze spalování uhlí jsou poměrně vysoké – cca 540 g/GJ. V uhelných elektrárnách je 50-90 % emisí NO_x tvořeno palivovými NO_x . Při spalování zemního plynu jsou emise NO_x nižší – 30-130 g/GJ (GRAUS, 2006).

3.2.2 Oxidy dusíku v České republice

V české legislativě je zakotven imisní limit pro lidský organismus pro NO_2 , ale pokud se zaměříme na ochranu ekosystémů a vegetace, je stanoven limit pro NO_x . V roce 2013 došlo k překročení těchto limitů pouze v částech, které lze klasifikovat jako dopravní městské části. Největší koncentrace NO_x v České republice je v Praze, kde jsou koncentrace ovlivněny zejména hustou dopravou.

Největším emitentem NO_x v České republice je doprava – emise vznikají ve spalovacích motorech při spalování fosilního paliva. V roce 2013 se doprava podílela na celkovém znečištění ovzduší 39 %.

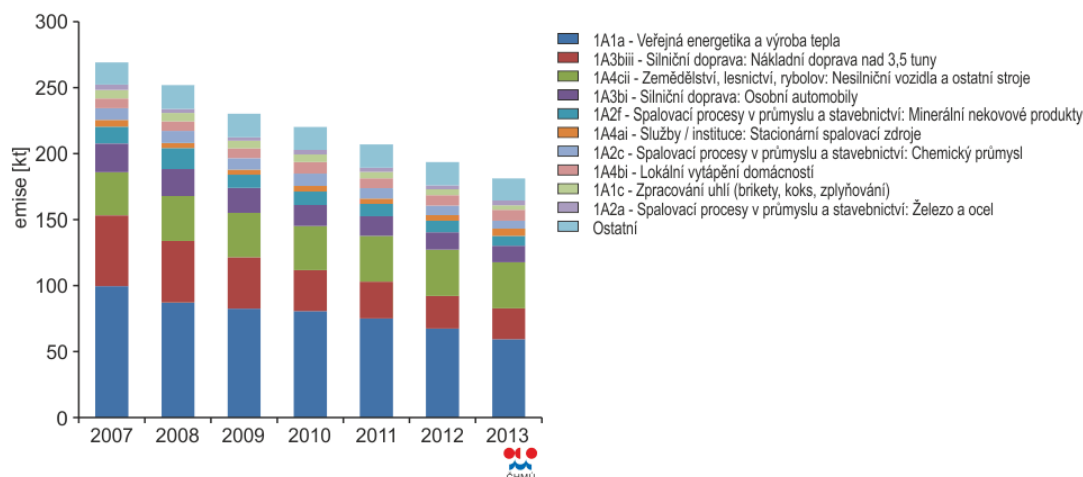
Druhým nejvýznamnějším sektorem emitujícím oxidy dusíku je energetika a výroba tepla, a to zejména uhelná. V roce 2013 se podílela na znečištění ovzduší 32,8 % (ČHMÚ, 2015).



Obr. č. 2: Rozdělení emitentů v ČR v roce 2013

Zdroj: ČHMÚ

Z následujícího grafu je zřejmé, že v posledních 10 letech dochází ke kontinuálnímu snižování emisí NO_x jak v ČR, tak i v sektoru veřejné energetiky a výroby tepla.



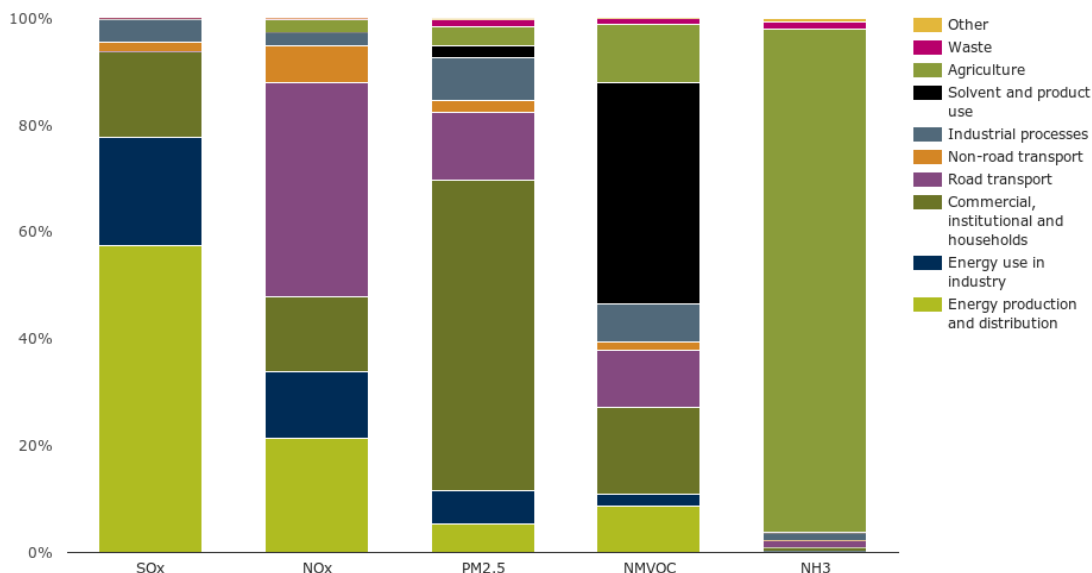
Obr. č. 3: Vývoj emisí NO_x v ČR v letech 2007-2013

Zdroj: ČHMÚ

To je způsobené zejména zavedením emisních limitů pro výrobní zdroje, které nutí emitenty realizovat nové a účinnější technologie pro snížení oxidů dusíku ve spalínách, a také obměnou starých dopravních prostředků za novější, které mají nižší emise NO_x.

3.2.3 Oxidy dusíku v Evropské unii

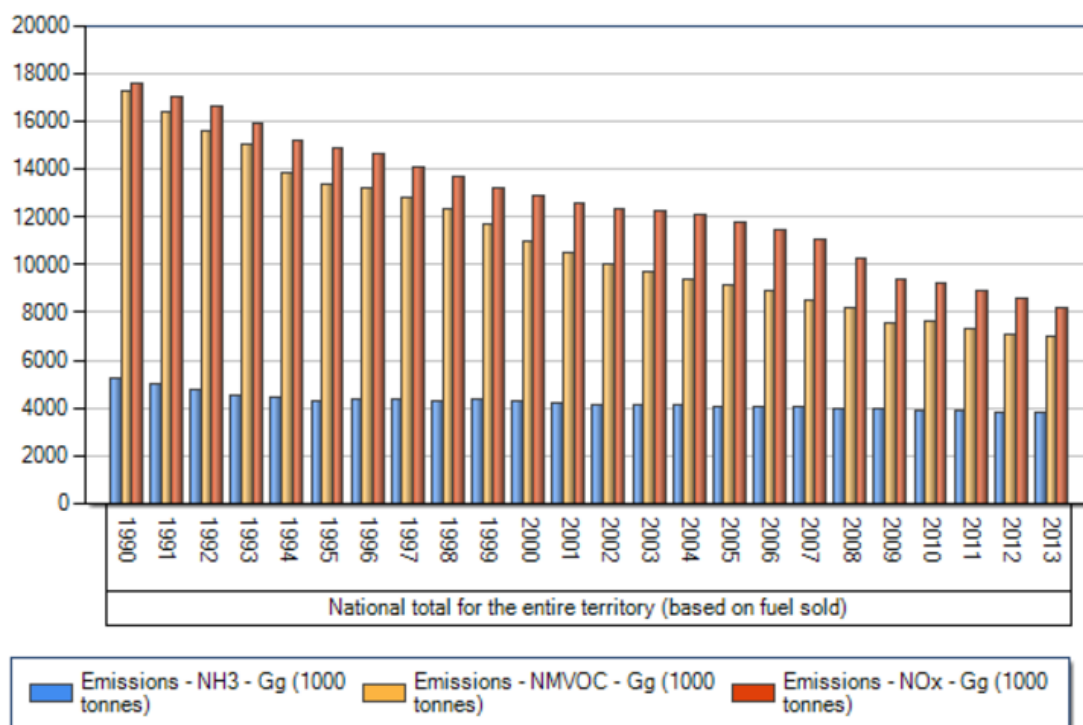
Stejně jako v České republice i v Evropské unii (dále jen „EU“) je největším emitentem NO_x sektor dopravy, jehož podíl na celkových emisích NO_x v EU činí cca 40 %, a druhým největším emitentem je energetický sektor, jehož podíl na celkových emisích NO_x v EU činí cca 21 %.



Obr. č. 4: Rozdělení emitentů v EU v roce 2013

Zdroj: EEA, 2015

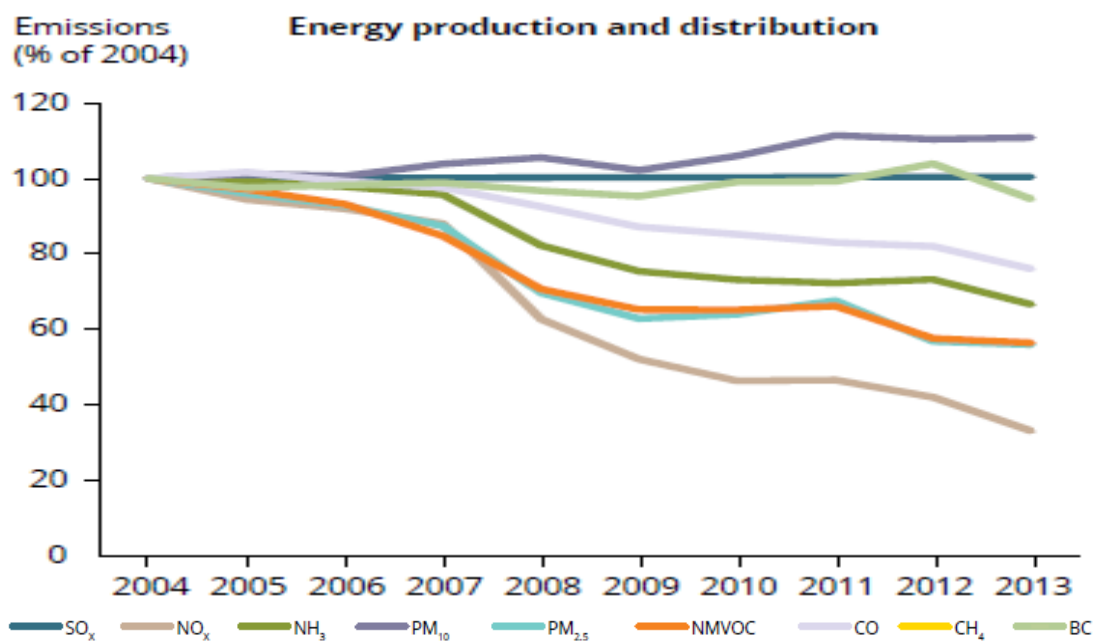
Emise oxidů dusíku v EU téměř lineárně klesají. Oproti roku 2004 poklesly emise NO_x v roce 2013 o 3 884 Gg, tj. o cca 32 %.



Obr. č. 5: Vývoj emisí v EU

Zdroj: EEA, 2015

V energetickém sektoru byly emise NO_x sníženy nejvíce ze všech sledovaných emisí. Oproti roku 2004 poklesly v roce 2013 o cca 65 %.



Obr. č. 6: Emise z výroby a distribuce energie v EU

Zdroj: EEA, 2015

Jak je vidět z grafu, od r. 2007 docházelo v energetickém sektoru ke strmému snižování emisí NO_x. K tomu nepochybně přispělo stanovení přísnějších emisních limitů pro velké spalovací zdroje v jednotlivých zemích EU (EEA, 2015).

3.3 Legislativní rámec řešící problematiku oxidů dusíku

Základními národními právními předpisy, které upravují problematiku ochrany ovzduší, jsou zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů a jeho prováděcí vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů, dále zákon č. 73/2012 Sb., o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech a jeho prováděcí vyhláška č. 257/2012 Sb., o předcházení emisím látek, které poškozují ozonovou vrstvu, a fluorovaných skleníkových plynů. Jedním z předpisů, který nepřímo ovlivňuje množství vypouštěných emisí, je zákon č. 383/2012 Sb., o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů, ve znění pozdějších předpisů. Zmínit lze také zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů, a jeho prováděcí vyhlášku č. 6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb (*Sbírka zákonů ČR*).

Ochrana ovzduší však není jen národní záležitostí jednotlivých států, neboť emise vzniklé v jednom státě mají dopad i na kvalitu ovzduší dalších států. Proto byly k ochraně ovzduší sjednány mezinárodní úmluvy, které mají rámcový charakter. Vlastní omezování znečišťování ovzduší je prováděno prostřednictvím protokolů, které jsou k úmluvám postupně přijímány. K nejvýznamnějším mezinárodním úmluvám a jejich protokolům patří:

- Úmluva o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution – CLRTAP) - sjednána byla v Ženevě již v roce 1979 a patří k významným nástrojům prevence přenosu znečišťování ovzduší na velké vzdálenosti. Dosud bylo přijato osm protokolů a Česká republika je u všech smluvní stranou:
 - Protokol o dlouhodobém financování Programu spolupráce při monitorování a vyhodnocování dálkového přenosu látek znečišťujících ovzduší v Evropě (Protocol on Long-term Financing of the Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe - EMEP) - přijat byl v roce 1984, v platnost vstoupil 22. ledna 1988
 - Protokol o snížení emisí síry přecházející hranice států nejméně o 30 % (Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent - 1. protokol o síře) - přijat byl v roce 1985, v platnost vstoupil 2. září 1987

- Protokol o dalším snížení emisí síry (Protocol on Further Reduction of Sulphur Emissions - 2. protokol o síře) - přijat byl v roce 1994 v Aarhusu, v platnost vstoupil 5. srpna 1998
- Protokol o snižování emisí těkavých organických látek (Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes - protokol VOC) - přijat byl v roce 1991, v platnost vstoupil 29. září 1997
- Protokol o těžkých kovech (Protocol on Heavy Metals) – přijat byl v roce 1998, v platnost vstoupil 29. prosince 2003, poslední změna byla provedena v r. 2012
- Protokol o persistentních organických polutantech (Protocol on Persistent Organic Pollutants - POPs) - přijat byl v roce 1998, v platnost vstoupil 23. října 2003, poslední změna byla provedena v r. 2009
- Protokol o snižování emisí oxidů dusíku nebo jejich toků přes hranice států (Protocol concerning the Control of Nitrogen Oxides or their Transboundary Fluxes) - přijat byl v Sofii v roce 1988, v platnost vstoupil 14. února 1991
- Protokol k omezení acidifikace, eutrofizace a tvorby přízemního ozonu (Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone - Göteborgský protokol) – přijat byl v roce 1999, v platnost vstoupil 17. května 2005, poslední změna byla provedena v r. 2012
- Rámcová úmluva OSN o změně klimatu (UN Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) – sjednána byla v Rio de Janeiru v roce 1992, úmluva se zabývá problematikou snižování emisí skleníkových plynů, vyrovnáváním se s negativními dopady změny klimatu i finanční a technologickou podporou rozvojových zemí. Dosud byly sjednány:
 - Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu (Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change) - přijat byl v prosinci roku 1997 v Kjótu
 - Pařížská dohoda k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu (Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change), která navazuje na Kjótský protokol, byla přijata v prosinci roku 2015 v Paříži, dosud nebyla ratifikována
- Vídeňská úmluva na ochranu ozonové vrstvy (Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer) – sjednána byla ve Vídni v roce 1985, jejím cílem

je ochrana lidského zdraví a životního prostředí proti nepříznivým účinkům lidské činnosti, které mění nebo by mohly měnit ozonovou vrstvu. Dosud byl sjednán jeden protokol:

- Montrealský protokol o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu (Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer) – přijat byl v Montrealu v roce 1987

Také v rámci Evropského společenství byly přijaty významné dokumenty na poli ochrany ovzduší:

- Směrnice Rady č. 88/609/EEC o omezování emisí některých škodlivin do ovzduší z velkých spalovacích zařízení – Směrnice stanovuje emisní limity pro oxid siřičitý, oxidy dusíku a tuhé látky pouze pro nová zařízení, tj. zařízení, k nimž bylo vydáno původní stavební povolení nebo povolení k provozu 1. července 1987 nebo později
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES ze dne 21. května 2008 o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu
- Směrnice Rady 94/66/EC doplňuje Směrnici 88/609/EEC o ustanovení týkající se spalování tuhých paliv v zařízeních o tepelném příkonu 50 – 100 MW
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/81/ES ze dne 23. října 2001 o národních emisních stropích pro některé látky znečišťující ovzduší
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/80/ES ze dne 23. října 2001 o omezení emisí některých znečišťujících látek do ovzduší z velkých spalovacích zařízení (zrušena s účinkem od 1.1.2016)
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění) – nahrazuje předchozí směrnici 2001/80/ES
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2015/2193 ze dne 25. listopadu 2015 o omezení emisí některých znečišťujících látek do ovzduší ze středních spalovacích zdrojů
- nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1005/2009 ze dne 16. září 2010 o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, v platném znění
- nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 517/2014 ze dne 16. dubna 2014 o fluorovaných skleníkových plynech a o zrušení nařízení (ES) č. 842/2006 (UNECE; MŽP).

3.4 Souhrn dopadů emisí oxidů dusíku na životní prostředí

Zatímco emise oxidů síry jsou již dlouho přísně sledovány a technická řešení jejich omezování dosáhla vysokého stupně účinnosti, emise oxidů dusíku stály dlouho stranou zájmu. Teprve s postupem vědeckého výzkumu jejich škodlivosti, která je přinejmenším srovnatelná se škodlivými účinky oxidů síry, došlo k intenzivnímu výzkumu mechanismu tvorby oxidů dusíku a hledání technických opatření ke snižování jejich emisí. V současné době patří emise oxidů dusíku k jednomu z velkých problémů znečišťování ovzduší. Důvodem je skutečnost, že se podílejí na vzniku troposférického (přízemního) ozonu, který je považován za znečišťující látku v ovzduší zejména proto, že se podílí na skleníkovém efektu.

3.4.1 Oxid dusný (N₂O)

Oxid dusný se dostává do atmosféry Země při hnojení zemědělských ploch dusíkatými chemickými hnojivy a při průmyslové výrobě chemických látek. Přírozenou cestou ho uvolňují některé mikroorganismy v půdě a v povrchových vrstvách oceánů.

Oxid dusný je málo reaktivní, proto je jeho množství v troposféře rovnoměrně rozděleno. Nemá prakticky žádný vliv na chemické reakce ve volném ovzduší. K jeho rozkladu dochází až ve stratosféře, kde oxiduje a vytváří oxid dusnatý. Rychlost úbytku N₂O vzrůstá se vzrůstající výškou.

Oxid dusný patří mezi skleníkové plyny, protože pohlcuje elektromagnetické vlnění, které se odráží od Země a volně by přešlo do kosmického prostoru. Takto získanou energii přeměňuje na energii kinetickou, tím se zahřívá a ohřívá vzduch. Koncentrace N₂O v ovzduší jsou malé ve srovnání s vodní párou a oxidem uhličitým, ale vzhledem k tomu, že potenciál globálního ohřevu (GWP) oxidu dusného je 320 (to znamená, že jeho absorpční schopnost je 320x větší než u oxidu uhličitého – některé zdroje uvádějí pouze 310x (CENIA, 2012), celkový vliv N₂O je asi 6 % antropogenního příspěvku ke skleníkovému efektu. Oxid dusný má schopnost absorbovat infračervené záření, proto ho řadíme mezi významné skleníkové plyny (BALNAR, 2008).

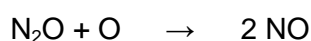
Mezi skleníkové plyny mimo oxid dusný patří také oxid uhličitý, vodní pára, metan nebo ozon. V následující tabulce je znázorněn obsah skleníkových plynů v atmosféře i s jeho odhadovaným nárůstem oproti době před průmyslovou revolucí (RICHTER, 2014).

Plyn (koncentrace)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	N ₂ O (ppb)	troposf. O ₃ (ppb)	CFC-12 (ppb)
Preindustriální doba	280	0,8	288	5 – 15	0
Současná doba	355	1,74	311	30 – 50	484
Roční přírůstek v %	0,5	0,75	0,25	0,5	4,0
Doba setrvání (roky)	50-200	10	130-150	0,1	130
Radiační účinnost vůči CO ₂	1	11	206	2.000	15.800

Tab. č. 2 Obsah skleníkových plynů v atmosféře.

Zdroj: Richter, 2014

Emise N₂O jsou sledovány na základě Rámcové úmluvy o změně klimatu, ke které přistoupila i Česká republika. Oxid dusný je v současnosti chápán nejen jako skleníkový plyn, ale také jako jedna z příčin poškození ozónové vrstvy. Kvůli jeho dlouhé životnosti v atmosféře, která je způsobena jeho poměrnou chemickou stálostí, ho lze nalézt také ve stratosféře, kde dochází fotochemickými reakcemi k jeho přeměně na oxid dusnatý (NO):



Další reakcí NO s O₃ dochází k odbourávání ozonu, jak je uvedeno v odstavci 3.4.2 Oxid dusnatý.

Dalším mechanismem, kterým N₂O přispívá k likvidaci ozónu, je jeho fotochemický rozklad ve výškách nad 30 km za vzniku atomárního kyslíku (O), který pak přímo reaguje s ozónem podle rovnice:

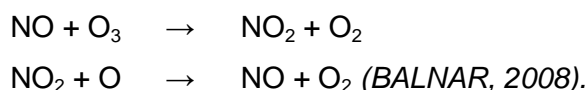


Na zdraví člověka má vliv až velká koncentrace N₂O. Ta vyvolává malátnost. Velmi vysoké koncentrace mohou být i smrtelné (PŘÍBORSKÁ, 2013).

3.4.2 Oxid dusnatý (NO)

Oxid dusnatý je plyn bez barvy a zápachu. Vzniká při spalování fosilních paliv. NO je jedovatý, dráždí oči a horní cesty dýchací. Jeho vyšší koncentrace poškozují rostliny – přispívají k jejich větší náchylnosti k plísním a k nižší odolnosti proti chladu a mrazu. Vysoké koncentrace přispívají ke vzniku přízemního ozonu a kyselých dešťů (KOVAŘÍKOVÁ, 2013).

Oxid dusnatý je součástí jednoho ze tří mechanismů, kterými je odbouráván ozón ze stratosféry (odbourávání pomocí NO, Cl a OH radikálů). Reakční mechanismus odbourávání za účasti NO je následující:



3.4.3 Oxid dusičitý (NO₂)

Oxid dusičitý je červenohnědý plyn se štiplavým zápachem. Při spalování fosilních paliv vzniká nejprve oxid dusnatý, který dále oxiduje na oxid dusičitý. Rychlost této oxidace je úměrná koncentraci NO a při relativně nízkých koncentracích ve spalinách je velmi pomalá, takže na celkovém obsahu NO_x ve spalinách se NO₂ podílí maximálně 10 %. Pro člověka je NO₂ nebezpečný při vdechování a může způsobit poleptání sliznic. Ve vodném roztoku přechází v kyselinu dusičnou, která zapříčiňuje kyselé deště. Ve vysoké koncentraci se také podílí na vzniku přízemního ozonu (BALNAR, 2008).

Člověk je vystaven škodlivému účinku oxidu dusičitého i ve vnitřním prostředí staveb, v místnostech s delším zdržením - v obytných místnostech. Proto vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností některých staveb, limituje hodinové koncentrace škodlivin v prostorách veřejných nebo veřejně přístupných staveb (pro zotavovací akce, vzdělávání, ve zdravotnických a ubytovacích zařízeních, ve stavbách pro obchod apod.). Pro srovnání je uvedena také hodnota pro venkovní prostředí.

Ukazatel	Limitní hodinové koncentrace ve vnitřním prostředí staveb	Přípustné expoziční limity v pracovním prostředí	Imisní limity pro látky znečišťující venkovní ovzduší
Oxid dusičitý	100 µg/m ³	10 000 µg/m ³	200 µg/m ³

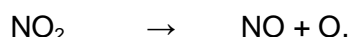
Tab. č. 3 Limity škodlivin ve vnitřním prostředí budov.

Zdroj: Moldan, 2009

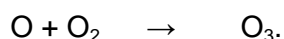
3.4.4 Ozon (O₃)

Ozon není ve venkovním ovzduší primární znečišťující látkou, protože až na zanedbatelné výjimky není přímo emitován žádným zdrojem. Náleží ke skupině fotochemických oxidantů a vzniká ve spodní troposféře z oxidů dusíku, uhlovodíků a kyslíku pod vlivem slunečního záření. V atmosféře je kyslík přítomen především ve formě dvouatomových molekul O₂, jež představují jednu ze základních složek ovzduší (cca 21 %). Mimoto existuje v atmosféře v menších množstvích atomární kyslík (O), ozon (O₃) a ionty. Podíl ozonu ve fotochemickém smogu činí přibližně 80 %, je tedy jeho hlavní substancí. Výchozí látky vstupující do složitých fotochemických reakcí, v jejichž průběhu ozon vzniká, se nazývají prekurzory (ČHMÚ).

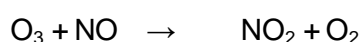
Klíčovou roli při vzniku troposférického ozonu hrají oxidy dusíku. Vlivem ultrafialového záření se oxid dusičitý rozkládá na oxid dusnatý a atomární kyslík:



Vysoce reaktivní atom kyslíku se sloučí s atmosférickým molekulárním kyslíkem na ozon:

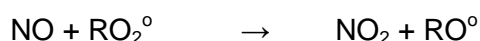


Současně probíhá také vratný proces:



Pokud by v atmosféře nebyly přítomny těkavé organické látky, velice rychle by se ustálil rovnovážný stav, v němž by koncentrace ozonu byla úměrná poměru koncentrace oxidu dusičitého ke koncentraci oxidu dusnatého, a k významnému nárůstu koncentrace ozonu by nedocházelo.

Jsou-li v atmosféře přítomny tzv. volné peroxilové radikály, uplatňují se při zpětné oxidaci NO na NO₂ mnohem účinněji než ozon. Peroxilové radikály vznikají mimo jiné při rozkladu těkavých organických látek (VOC), které se do ovzduší dostávají jak z přírodních zdrojů (terpeny z jehličnatých lesů), tak ze zdrojů antropogenních (doprava, výroba pohonných hmot a manipulace s nimi, používání laků a ředidel). Tyto radikály přebírají úlohu ozonu při obnově oxidu dusičitého:



Oxid dusičitý je znovu rozkládán slunečním zářením a celý proces se opakuje. Vzniklý ozon není spotřebováván a při dostatečné koncentraci volných radikálů v ovzduší dojde ke hromadění ozonu a tím vzniku fotochemického smogu (ČHMÚ).

Za normálních podmínek je ozon neviditelný plyn, který se v zemské atmosféře vyskytuje ve dvou vrstvách:

- ve stratosféře (stratosférický ozon) absorbuje škodlivé ultrafialové záření a chrání život na Zemi před zhoubnými účinky biologicky aktivního ultrafialového záření Slunce. Maximální množství stratosférického ozonu je soustředěno ve výšce 22 až 25 km nad zemským povrchem. Bez stratosférického ozonu by nebyl možný život na zemi.
- v troposféře (troposférický, nebo také přízemní ozon) do výšky cca 10 km. Přízemní ozon tvoří sice pouze cca 10 % celkového množství ozonu

v atmosféře, ale problémem je růst množství ozonu v přízemní vrstvě v posledních letech.

Ozon je mimořádně účinné oxidační činidlo. Může reagovat prakticky se všemi biologickými látkami. Zejména buněčné membrány, jejichž hlavní stavební prvky tvoří bílkoviny a tuky, jsou nejvíce vystaveny možnosti poškození ozonem.

V současné době je přízemní ozon považován za jednu z hlavních znečišťujících látek ovzduší (CENIA, 2008). Z různých zdrojů byla sestavena tabulka nejvýznamnějších skleníkových plynů, z které je patrný podíl ozonu na skleníkovém efektu v atmosféře Země (RICHTER, 2014).

Skleníkový plyn	Konc. 1780	Konc. 1995	Změna	Hlavní zdroje přirozené a antropogenní (odborné odhady)	Ekvivalent CO ₂	Podíl na SE (max.)
Vodní pára	0,2 - 4,0		0%	Hydrosféra (oceány, moře, jezera, toky), vegetace a půda. Spalovací procesy, sušení, odpařování, chlazení aj.	10.000	až 80 %
CO ₂	280	360	29%	Aerobní procesy, anaerobní procesy a vulkanická činnost cca 92% Průmyslové spalovací procesy cca 8% z max. 26 %	1	9 - 26 %
CH ₄	0,7	1,7	143%	Mokřady, močály, tundra (20%) Anaerobní rozklady (5%), těžba NS (10%) Chov dobytka (25%), pěstování rýže (25%)	20	4 - 9 %
N ₂ O	280	310	11%	Lesy, oceány, půda Prům. hnojiva Spalovací procesy	200	2,80 %
CFC	0	300	---	Chladicí aparatury (30%) Aerosoly (30%), izol. pěny (32 %) Rozpouštědla aj. (8%)	7500	1,00 %
Ozón	82		0%	Krátkovlnné záření Výboje v atmosféře (růst v přízemní vrstvě, pokles ve stratosféře)	2000	3 - 7 %

Tab. č. 4 Skleníkové plyny a jejich podíl na skleníkovém efektu. Zdroj: Richter, 2014

Přímý podíl na skleníkovém efektu má spalování fosilních paliv, protože při spalování unikají do ovzduší některé skleníkové plyny (zejména CO₂), nebo plyny, které působí jako prekurzory skleníkových plynů (NO_x→troposférický ozon). Emise skleníkových plynů nelze přímo měřit, jsou počítány z aktivitních dat a spotřeb paliv a energií (ISSAR, 2014).

Maximální koncentrace ozonu, jíž může být dosaženo, závisí nejen na absolutních hodnotách koncentrací VOC a oxidů dusíku, ale též na jejich poměru. V literatuře se uvádí, že nejpříznivější podmínky pro vznik vysokých ozonových

koncentrací jsou v rozpětí poměru VOC:NO_x od 4:1 do 10:1. Množství ozonu v atmosféře se mění podle přírodních cyklů, jako je například změna ročního období, změna směru větru, výbuch sopky či změna intenzity slunečního záření dopadajícího na zem vlivem oddálení Země od Slunce (ČHMÚ).

Působení ozonu má nepříznivý vliv jak na lidský organismus, tak na vegetaci i půdu:

a) Škodlivé účinky ozonu na člověka

U lidského organismu ozon dráždí dýchací ústrojí, stahuje dýchací cesty, zvyšuje jejich odpor a ztěžuje dýchání zejména u astmatiků, malých dětí a starších osob, poškozují ochranné komponenty oka a tělové bílkoviny, napadá nejperifernější rozvětvení plicních cév přímo v plicních sklípcích, čímž se plicní tkáň stává propustnější pro alergeny a snižuje se odolnost vůči infekci.

Podle Světové zdravotnické organizace (World Health Organization - WHO) se první obtíže objevují při překročení průměrné hodinové koncentrace 160 µg/m³. Nové vědecké výsledky prokazují, že koncentrace ozonu již od 100 µg/m³ omezují funkci plic. V tomto orgánu dochází až k 60% vstřebání ozonu do krve, kde se váže na hemoglobin a způsobuje značné nedokysličování organismu. Dýchací problémy se vyskytují po několika hodinách vystavení. V krátkodobém vystavení se jako první příznaky vyskytují bolest hlavy, snížení krevního tlaku a pálení očí. Při opakovaném vystavení může docházet až ke kazivosti zubů či zánětu spojivek.

Zdravý organismus snese koncentraci až okolo hodnoty 2 000 µg/m³. Ovšem takováto koncentrace je nebezpečná pro citlivé jedince a děti. Z tohoto důvodu je stanoven limit pro krátkodobé vystavení těmto plynům na 200 µg/m³ (ČHMÚ; CENIA, 2008; CENIA, 2013).

Stejně jako u oxidů dusíku i u ozonu je člověk vystaven ve vnitřním prostředí staveb škodlivému účinku ozonu, a proto vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. stanovuje hygienické limity pro ozon (MOLDAN, 2009).

Ukazatel	Limitní hodinové koncentrace ve vnitřním prostředí staveb	Přípustné expoziční limity v pracovním prostředí
Ozon	100 µg/m ³	100 µg/m ³

Tab. č. 5 Limity škodlivin ve vnitřním prostředí budov.

Zdroj: Moldan, 2009

b) Škodlivé účinky ozonu na vegetaci

Období zvýšené koncentrace ozonu se téměř kryje s vegetačním obdobím většiny rostlin, tedy od dubna do poloviny září. Důvodem je skutečnost, že ozon potřebuje ke svému vzniku sluneční záření. Do rostlin proniká ozon otevřenými průduchy (stomaty) v listech nebo jehlicích. Díky své vysoké reaktivitě napadá buněčné stěny a jeho účinky se projevují výsevem světlých skvrn (chloróza) na listech a v pozdějším stadiu bodovým rozpadem buněčné tkáně (nekróza). Při výraznějším napadení se skvrnky slévají do ploch a poškozený list nebo jehlice odumírá. Ozon tak narušuje procesy dýchání a fotosyntézy, snižuje výnosy zemědělských plodin a způsobuje poškození lesů. Velmi citlivé jsou na působení ozonu zejména pšenice, ječmen, žito, brambory a jetel, z lesních stromů pak modřín, borovice a buk (ČHMÚ; ULBRICHOVÁ, 2014).

c) Škodlivé účinky ozonu na půdu

Při nízké koncentraci ozonu ve vzduchu probíhá fotosyntéza normálně. Uhlík je dopravován skrz kořeny do půdy, kde ho využijí mikroorganismy, které ovlivňují kvalitu půdy. Při vysoké koncentraci ozonu v atmosféře se dostane do půdy méně uhlíku a mikroorganismy se přestanou množit. Kvalita půdy se sníží a tím i výnosy zemědělských plodin (CENIA, 2008).

d) Škodlivé účinky ozonu na materiály

Vysoká reaktivita ozonu má za následek, že kromě biologických materiálů ozon poškozuje i celou řadu látek nebiologických - textilní vlákna, barvy a laky, gumu. U textilních vláken se narušuje pevnost v trhu a snižuje se životnost textilií. Nátěrové hmoty blednou a odprýskávají, guma ztrácí pružnost a objevují se na ní trhliny (CENIA, 2008).

3.4.5 Oxidy dusíku jako prekurzory PM

Polétavý prach, také nazývaný prašný aerosol (PM) vzniká ve většině případů antropogenní činností. Jedná se o soubor částic různých velikostí, tvarů i chemického složení. Největším emitentem jsou spalovací procesy, zejména v automobilových motorech, v elektrárnách nebo teplárnách a v lokálních zdrojích (domácnostech) – vznikají tzv. primární emise. Průměrné hodnoty koncentrace polétavého prachu v odpadních plynech z uhelných kotlů jsou uvedeny v následující tabulce:

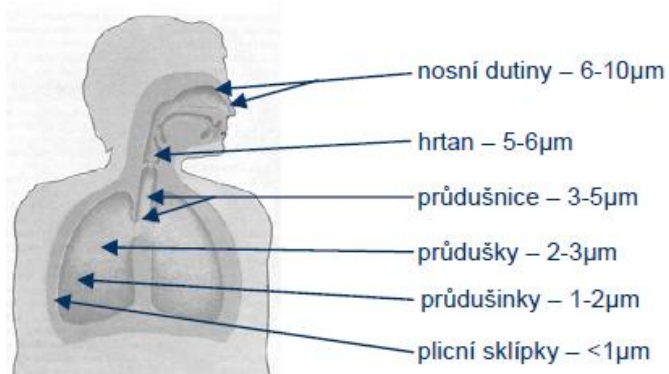
PALIVO	TYP KOTLE	PRŮMĚRNÁ KONCENTRACE (g/m ³)	VÝJIMEČNÁ KONCENTRACE (g/m ³)
černé uhlí	s mechanickým roštem	0,5–10	30
	granulační kotel	25-30	70
	fluidní kotel	do 50	100
hnědé uhlí	s mechanickým roštem	2–10	
	granulační kotel	2–30	
	práškový kotel	do 50	
	fluidní kotel	do 50	100

Tab. č. 6: Průměrné koncentrace prachu v odpadních plynech z uhelných kotlů.

Zdroj: Richter, 2014

Částice vytvořené z jiných polutantů nazýváme sekundární emise. Mezi prekurzory sekundárních emisí PM patří také NO_x. Z hlediska životního prostředí mají prachové částice v ovzduší dopad hlavně na zdraví člověka a živých organismů, protože se usazují v dýchacích cestách (RICHTER, 2014).

Průnik částic do dýchacích cest závisí na jejich aerodynamických vlastnostech a také se podle nich třídí. Nejdéle se sledují frakce PM₁₀, od roku 2004 se začalo v České republice s měřením koncentrace jemnějších částic PM_{2,5}. Jejich hlavním zdrojem jsou spalovací procesy, při kterých jsou produkovány sekundární částice. Ty vznikají chemickou reakcí mezi plynnými složkami spalin a kondenzací horkých plynů a par. Frakce PM₁₀ (resp. PM_{2,5}) jsou definovány jako částice s aerodynamickým průměrem $a < 10 \mu\text{m}$ ($a < 2,5 \mu\text{m}$) a měrnou hmotností 1000 kg/m³ (HNILICOVÁ, 2008).



Obr. č. 7 Průnik jednotlivých velikostních frakcí prachu do dýchacích cest.

Zdroj: Hnilicová, 2008

3.4.6 Oxidy dusíku jako okyselující látky

Dalším negativním důsledkem emisí oxidů dusíku je okyselení, neboli acidifikace, prostředí. Mimo emisí oxidů dusíku přispívají nejvýrazněji k okyselení emise oxidů síry a emise amoniaku (čpavku). Emise NO_x a SO_2 vytvářejí v atmosféře kyselinu dusičnou a kyselinu sírovou. Tyto kyseliny spolu s NH_3 a srážkovými vodami (kyselé deště) spadnou na zem a snižují hladinu pH půdy i vody, čímž dochází k poškození rostlin a života zvířat na souši i ve vodě (pokles biodiverzity). Okyselující látky nemají stejný okyselující potenciál. Proto se údaje o emisích vyjadřují v ekvivalentu okyselení. Faktory ekvivalentu okyselení jsou následující:

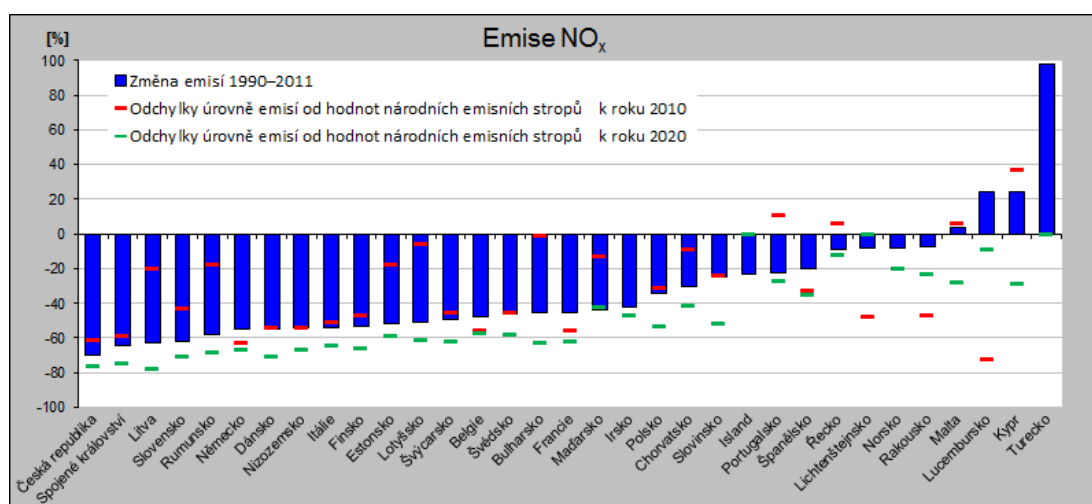
OKYSELUJÍCÍ LÁTKA	NO_x	SO_2	NH_3
FAKTOR OKYSELENÍ	0,02174	0,03125	0,05882

Tab. č. 7: Faktory ekvivalentu okyselení

Zdroj: EEA, 2015

Vzhledem k značnému snížení emisí SO_2 v průběhu uplynulých desetiletích se staly NO_x a NH_3 hlavními okyselujícími látkami (EEA, 2015).

Skutečnost, že ochrana ovzduší je záležitostí mezinárodní, je patrná i z toho, že národní emisní stropy pro jednotlivé látky pro rok 2010 stanovila Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2001/81/ES, o národních emisních stropech pro některé látky znečišťující ovzduší (NECD), která vychází mimo jiné z příslušných protokolů CLRTAP (ISSAR 2014).



Obr. č. 8: Změny emisí NO_x mezi roky 1990–2011 a odchylky od lineárního trendu snižování emisí směrem k naplnění národních emisních stropů v roce 2010 a v roce 2020, mezinárodní srovnání, 2012 (%). Zdroj: ISSAR, 2014

Odhaduje se, že snížením kyselé depozice, zejména snížením emisí SO_2 , bylo v roce 2010 ohroženo acidifikací cca 7 % ekosystému Evropské unie a 5 %

v systému NATURA 2000, což znamená snížení o 30 %, resp. 40 % oproti úrovni roku 2005 (EEA, 2015).

Setrvalý trend má i snižování emisí okyselujících látek v České republice. Základním strategickým dokumentem České republiky, který se zabývá požadavkem na snižování emisí okyselujících látek a dodržení národních emisních stropů k roku 2010, je Národní program snižování emisí ČR. Pro oxidy dusíku byl stanoven strop 286 kt/rok, po přepočtu 6,22 kt/rok v ekvivalentu okyselení. Emise NO_x v roce 2010 činily 4,77 kt/rok v ekvivalentu okyselení. Limit byl tedy, jak je patrné z emisních hodnot uvedených v tabulce, dodržen. Pro lepší orientaci jsou emise oxidů dusíku barevně odlišeny.

Rok	Kvalita údaje	NO _x	SO ₂	NH ₃	Celkem
1990	konečný údaj	11,98	57,81	9,18	78,97
1991	konečný údaj	11,46	54,66	7,88	74,00
1992	konečný údaj	10,85	46,72	6,76	64,33
1993	konečný údaj	9,98	42,69	5,82	58,49
1994	konečný údaj	8,22	37,66	5,35	51,23
1995	konečný údaj	8,05	34,48	5,06	47,59
1996	konečný údaj	7,96	29,50	4,76	42,22
1997	konečný údaj	7,59	21,78	4,76	34,13
1998	konečný údaj	6,97	13,69	4,71	25,37
1999	konečný údaj	6,81	8,37	4,41	19,60
2000	konečný údaj	6,17	6,95	4,35	17,47
2001	konečný údaj	6,41	7,08	4,51	18,00
2002	konečný údaj	6,13	6,95	4,24	17,32
2003	konečný údaj	6,16	6,81	4,84	17,82
2004	konečný údaj	6,19	6,69	4,12	17,00
2005	konečný údaj	6,09	6,58	4,10	16,77
2006	konečný údaj	5,91	6,41	3,73	16,05
2007	konečný údaj	5,84	6,57	3,52	15,93
2008	konečný údaj	5,49	5,33	3,87	14,69
2009	konečný údaj	5,00	5,25	4,02	14,27
2010	konečný údaj	4,77	5,01	4,04	13,81
2011	konečný údaj	4,45	5,03	3,87	13,34
2012	konečný údaj	4,15	4,84	3,87	12,86
2013	předběžný údaj	3,86	4,33	3,80	11,99

Tab. č. 8: Celkové emise okyselujících látek, ČR (kt v ekvivalentu okyselení)
Zdroj: ČHMÚ, 2014

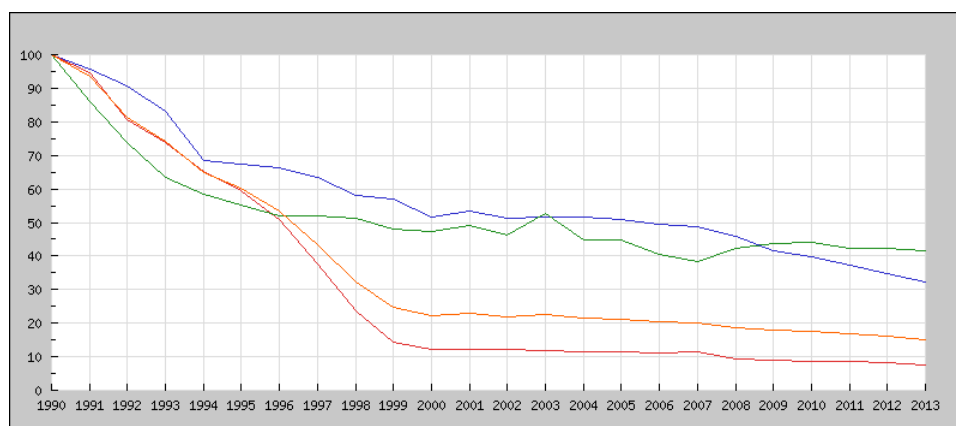
Od referenčního roku, kterým je rok 1990, došlo k roku 2013 k výraznému snížení celkového množství sledovaných emisí, a to o cca 84,8 %.

Rok	Kvalita údajů	NO _x	SO ₂	NH ₃	Celkem
1990	konečný údaj	100,00	100,00	100,00	100,00
1991	konečný údaj	95,65	94,54	85,90	93,70
1992	konečný údaj	90,57	80,81	73,72	81,47
1993	konečný údaj	83,31	73,84	63,46	74,07
1994	konečný údaj	68,61	65,13	58,33	64,87
1995	konečný údaj	67,22	59,65	55,13	60,27
1996	konečný údaj	66,43	51,03	51,92	53,47
1997	konečný údaj	63,34	37,67	51,92	43,22
1998	konečný údaj	58,21	23,68	51,28	32,13
1999	konečný údaj	56,88	14,49	48,08	24,82
2000	konečný údaj	51,47	12,02	47,44	22,12
2001	konečný údaj	53,49	12,25	49,11	22,79
2002	konečný údaj	51,19	12,02	46,25	21,94
2003	konečný údaj	51,43	11,79	52,79	22,56
2004	konečný údaj	51,69	11,57	44,93	21,53
2005	konečný údaj	50,83	11,38	44,72	21,24
2006	konečný údaj	49,31	11,09	40,67	20,33
2007	konečný údaj	48,74	11,37	38,41	20,18
2008	konečný údaj	45,87	9,22	42,15	18,61
2009	konečný údaj	41,74	9,09	43,80	18,08
2010	konečný údaj	39,78	8,67	43,97	17,49
2011	konečný údaj	37,12	8,69	42,15	16,89
2012	konečný údaj	34,64	8,37	42,15	16,28
2013	předběžný údaj	32,26	7,49	41,41	15,19

Tab. č. 9: Snížení emisí okyselujících látek, ČR (index 1990 = 100%)

Zdroj: ČHMÚ, 2014

V porovnání celkových emisí oxidů dusíku v jednotlivých letech došlo ke kontinuálnímu snižování emisí NO_x (mimo roky 2001-2004, kdy hodnota kolísala mezi 51,47–53,49 %). Oproti referenčnímu roku byly emise NO_x sníženy o cca 67,7 %.

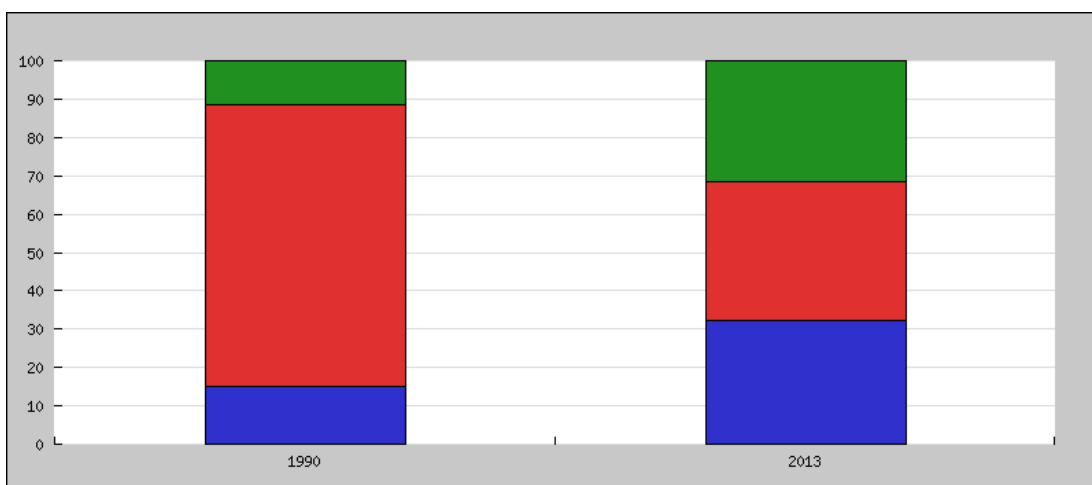


Legenda: NO_x SO₂ NH₃ Celkem

Obr. č. 9: Celkové emise okyselujících látek, ČR (ekvivalenty okyselení, index 1990=100 %)

Zdroj: ČHMÚ, 2014

Alarmující může být zvýšení podílu emisí NO_x na celkovém množství emisí okyselujících látek. Zatímco v roce 1990 tvořil podíl NO_x 15,2 %, v roce 2013 to bylo již 32,2 % (ČHMÚ, 2015).



Legenda: NO_x

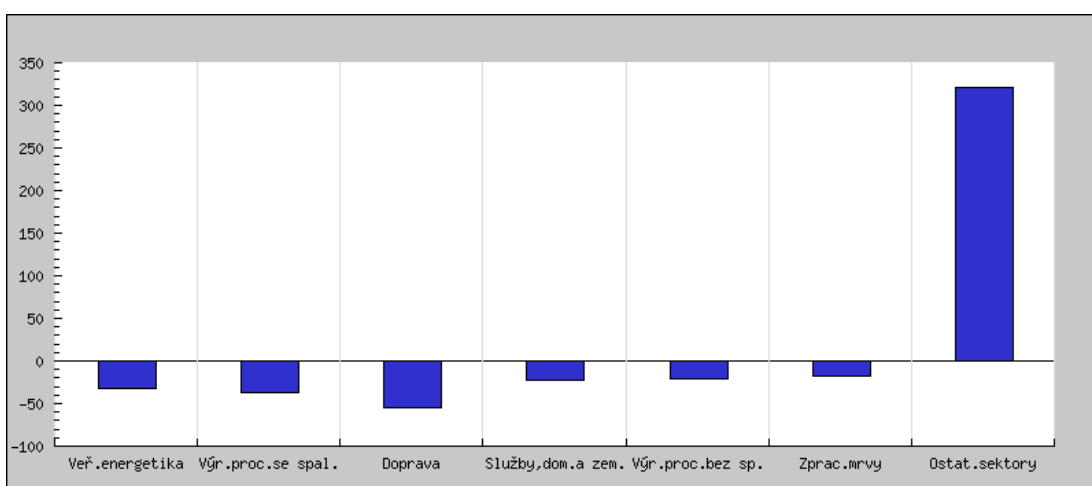
SO₂

NH₃

Obr. č. 10: Podíl emisí jednotlivých látek na celkových emisích okyselujících látek, ČR (%)
Zdroj: ČHMÚ, 2015

Tento stav je způsoben zejména tím, že škodlivé účinky oxidů síry byly známy již v minulém století a na průmyslové zdroje znečištění byla instalována ve velké míře odsiřovací zařízení, a také odsiřovací technologie velmi pokročily. Proto se podíl oxidů síry snížil výrazněji než podíl oxidů dusíku (ČHMÚ, 2015).

Když se zaměříme na sektor veřejné energetiky, můžeme konstatovat, že mezi roky 2000 až 2012 došlo k výraznému poklesu emisí okyselujících látek z 6,96 kt na 4,72 kt (v ekvivalentu okyselení), tedy o 32 % (ISSAR, 2014).



Obr. č. 11: Změna v produkci emisí okyselujících látek v jednotlivých sektorech mezi rokem 2000 a 2012 v ČR (%).
Zdroj: ISSAR, 2014

4. METODY SNIŽOVÁNÍ EMISÍ OXIDŮ DUSÍKU

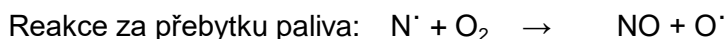
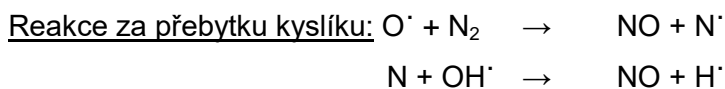
Technologie, které dokážou snížit emise oxidů NO_x ve spalinách, jsou již vyvinuty. Ovšem k jejich masivnějšímu uvádění do praxe dochází až v posledních desetiletích. Důvodem jsou výsledky výzkumů jejich škodlivých dopadů na životní prostředí, na člověka i a na klima země, a následné zapracování emisních limitů do právního řádu České republiky a zejména Evropské unie.

Metod na snížení oxidů dusíku existuje větší množství. Ne všechny jsou však vhodné k použití ve velkých komplexech, a to zejména z ekonomických důvodů. Výchozím bodem pro návrh jakýchkoliv opatření je detailní znalost stávajícího stavu zařízení. Každá spalovací komora, i kotlů stejné konstrukce, vykazuje jiné charakteristiky. Navíc jsou kotle provozovány za podmínek, které jsou odlišné od podmínek při první instalaci zařízení. Důvodem je např. rozšíření palivové základny, spoluspalování různých kvalit nebo i druhů paliv, rekonstrukcím spalovacího zařízení, apod. Proto musí návrhu primárních nebo sekundárních opatření předcházet podrobná diagnostika.

4.1 Primární opatření

Primárními opatřeními se snižuje množství oxidů dusíku úpravou spalovacího procesu (snížení spalovací teploty, snížení lokální koncentrace kyslíku, zkrácení doby zdržení v pásmu vysoké teploty), tedy úpravou v kotli. Významné množství NO_x vzniká od teplot nad 1 200 °C. K dalšímu růstu množství NO_x dochází exponenciálně s růstem teploty.

Ze základních reakčních rovnic vyplývají směry, kterými je možné se vydat při snaze snížit NO_x ve spalinách:



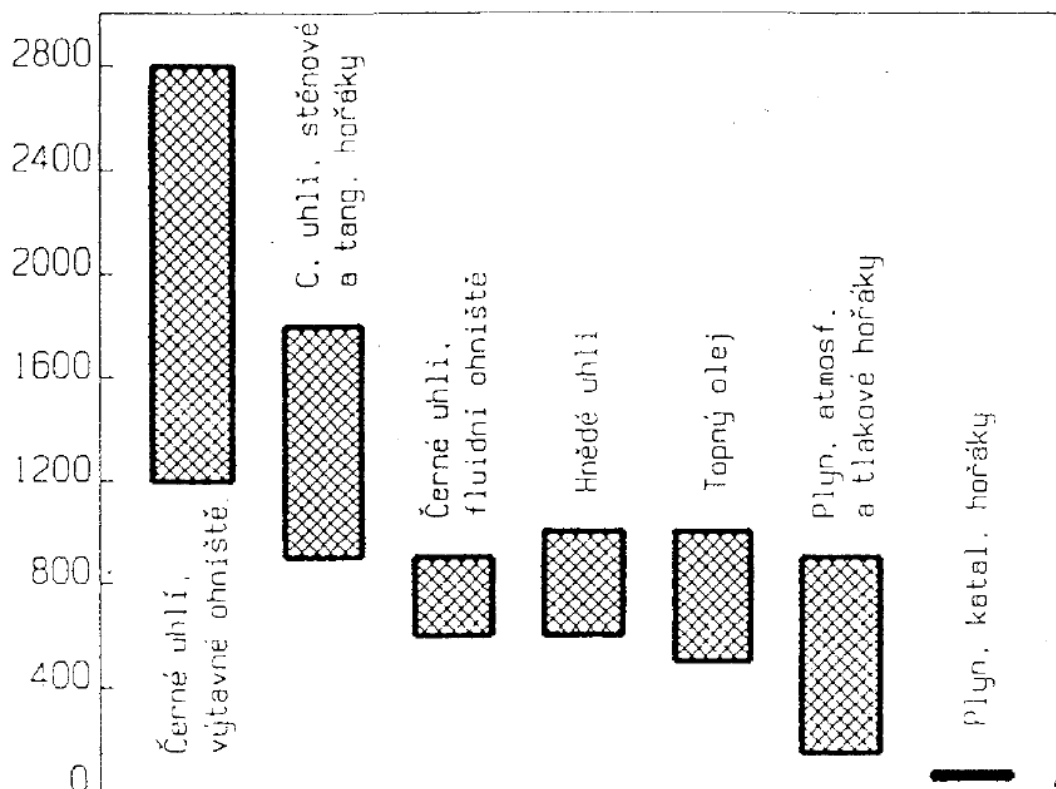
U těchto reakcí je snaha omezit tvorbu radikálů, které jsou velice reaktivní (radikály – prvky s označením tečky).

Na množství emisí NO_x má významný vliv také samotný typ topeniště, jeho konstrukce a samozřejmě stav. Uhlé kotle, které jsou v současné době v provozu, mají tyto typy topeniště:

- výtavné - emise NO_x 1600–2800 mg/m³,
- se stěnovými hořáky - emise NO_x 1000–1700 mg/m³,

- s tangenciálními hořáky - emise NO_x 800–1200 mg/m^3 ,
- fluidní - emise NO_x do 800 mg/m^3 ,
- práškové hořáky.

Rozhodující vliv má teplota hoření, která je nejvyšší u výtavných kotlů, a rychlost uvolňování tepla v zóně hoření, která je nejnižší u fluidních kotlů (VŠB, 2011).



Obr. č. 12: Emise NO_x při spalování různých druhů paliv (mg/m^3). Zdroj: VŠB, 2011

Mezi primární metody snižování emisí oxidů dusíku můžeme zařadit:

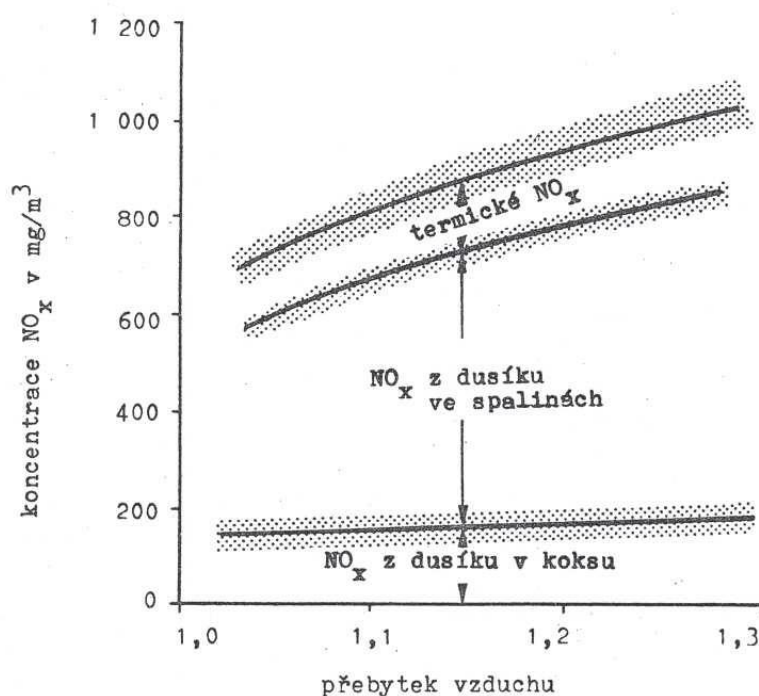
1. Spalování s nízkým přebytkem vzduchu
2. Odstupňování (postupné dávkování) vzduchu
3. Recirkulaci spalin
4. Odstupňování paliva
5. Nízkoemisní hořáky
6. Práškové kotle
7. Optimalizace spalovacího procesu

Aplikací uvedených opatření na snižování emisí NO_x však nesmíme omezit provozní vlastnosti zdrojů (zpětné vlivy), proto při návrhu opatření musíme brát v úvahu i další kritéria:

- bezpečnost,
- spolehlivost,
- rozsah paliv,
- náklady na údržbu,
- odpad z čištění,
- předcházení emisím nebo zvýšení emisí dalších látek (VŠB, 2011).

4.1.1 Spalování s nízkým přebytkem vzduchu

Princip metody spočívá v odebrání spalovacího vzduchu, čímž dosáhneme snížení přeměny dusíku v palivu. Je to jeden z nejjednodušších způsobů snižování emisí. Nevyžaduje velké změny v technologii – je nutné provést pouze malé konstrukční úpravy ve stěně kotle, a tedy není investičně náročný na zasazení do stávajících technologií. Proto je často využíván u starších výrobních zdrojů. U nových spalovacích zdrojů jsou instalovány technologie, které kontrolují optimální přísun spalovacího vzduchu do spalovacího procesu, a proto tuto metodu není možné použít. Metodu také nelze využít u kotlů s pevně daným stechiometrickým poměrem.



Obr. č. 13: Vliv přebytku spalovacího vzduchu na tvorbu NO_x

Zdroj: ČVUT, 2015

Při použití metody je nutné neustále hlídat potřebný stechiometrický poměr, protože odebráním většího množství spalovacího vzduchu by mohlo dojít k nedokonalému spalování a tím ke zvýšení obsahu uhlíku v popelu. Efekt špatného zásahu (odebrání přílišného množství vzduchu) by mohl mít i další negativní dopady - korozi, tvorbu sazí, ztráty nedopalem, nižší účinnost, zvýšení emisí CO (ČVUT, 2015).

4.1.2 Odstupňování (postupné dávkování) vzduchu

U této metody je do kotle přiváděn vzduch ve třech proudech do dvou zón:

- do první zóny primární vzduch je vháněn spolu s palivem dovnitř proudu sekundárního vzduchu; množství sekundárního vzduchu se udržuje na takové hodnotě, aby palivový dusík přecházel na elementární,
- do druhé zóny mimo hrdlo hořáku je přidáván terciární vzduch, který slouží pro konečné spálení paliva.

V každé zóně je použit jiný stechiometrický poměr (nestechiometrické spalování). V první zóně je palivo spalováno za nedostatku kyslíku. Tímto způsobem dojde ke snížení přeměny vázaného dusíku v palivu na NO_x , ale zároveň získáme negativní důsledky uvedené u spalování s nízkým přebytkem vzduchu - tvorba sazí, ztráty nedopalem, nižší účinnost, zvýšení emisí CO. Pro odstranění těchto negativních důsledků je vytvořena druhá zóna, ve které se přidává až 30 % spalovacího vzduchu. Tím dojde k úplnému dopálení zbytku paliva a zplodin nedokonalého spalování.

Tato metoda má výhodu i ve snížené teplotě druhé zóny, kde proto nedochází ke vzniku vysokoteplotních NO_x . Metodu lze použít i na stávajících zařízeních pouze s drobnými úpravami. Stejný princip spalování je vlastně podstatou speciálních nízkoemisních hořáků. Použitím hořáků lze snížit produkci NO_x o více než 50 % (VŠB, 2011). Pro použití této metody máme tři možnosti:

Diagonální hořáky

Tento způsob je často použit při modernizaci starších zařízení, protože není tak investičně náročný. Jedná se pouze o malou úpravu spalovacího zařízení, která spočívá v rozdělení funkce původně shodných hořáků. Spodní hořáky spalují směs bohatou na palivo (tedy se sníženým množstvím spalovacího vzduchu) a do horních hořáku se přivádí palivo s přebytkem vzduchu.

Hořáky mimo provoz

Metoda je velice podobná předchozí. Rozdíl spočívá v tom, že horní hořáky jsou využity pouze pro vhánění vzduchu. V případě spodních hořáků nedochází ke změně, pouze je přiváděna směs s přebytkem paliva. Tato opatření se velice dobře aplikují do vertikálních kotlů. Větší efekt metoda přináší při použití plynného paliva, jelikož je možné při dostatečné kapacitě plynu dodat do kotle stejné množství požadované tepelné energie jako v případě před rekonstrukcí.

Přídavný vzduch

Princip metody je velmi podobný, jako v předchozím bodě, ale už je nutný zásah do technologie.

Stávající hořáky se provozují s nedostatkem vzduchu, což napomáhá k redukci tvorby NO_x . Do technologie musí být zavedeny nové průduchy (větrovody), kterými se přivádí do horní části kotle přídavný vzduch. Tím docílíme dopálení směsi za redukce tvorby NO_x . Úprava tedy spočívá v dovybavení kotle potrubím pro přídavný vzduch, regulátory a větrovody. Touto metodou je možné snížit produkci NO_x až o 30 % (KOLAT, 2008).

4.1.3 Recirkulace spalin

Metoda je založena na snížení obsahu vzduchu ve spalovacím procesu a také snížení teploty. Snížením teploty zajistíme nižší tvorbu tepelných NO_x a také se omezí přeměna dusíku v palivu, protože se sníží teplota v kotli.

Část spalin (až 30 %) se odvede z hlavního kotle. Tyto spaliny projdou přes odlučovač pevných částic (různé druhy) a pokračují přes ohřívák zpět do topeniště. Tím se dosáhne jak snížení teploty, tak snížení obsahu kyslíku. Nejúčinnější je přimíchání spalin do spalovacího vzduchu. Recirkulací spalin zároveň zajistíme dopálení bohaté směsi. Metoda recirkulace spalin má i své nevýhody, které se promítnou do provozu: může dojít ke snížení účinnosti kotle, protože je nutné zajistit napájení přídavných ventilátorů, je vyšší teplota v komíně a při horší kvalitě paliva může docházet ke zvýšené korozi. Z hlediska omezení NO_x je však metoda poměrně účinná a lze jí dosáhnout snížení emisí až o 50 % (KOLAT, 2008).

4.1.4 Odstupňování paliva

Principem metody je redukce oxidů dusíku zpět na dusík. V zásadě se jedná o rozdělení spalovacího prostoru na tři zóny:

- a. Primární zóna – v té dochází ke klasickému hoření v redukční atmosféře.

- b. Sekundární zóna (jinak také dospalovací zóna) – v té se přidává sekundární palivo (uhlíkové radikály – práškové uhlí, topný olej, zemní plyn), které bude reagovat s oxidy dusíku vytvořenými v primární zóně. Nejvýhodnější je použití zemního plynu, jelikož v sobě neobsahuje pevné částice ani síru.
- c. Finální zóna – v té probíhá spalování za přídavku vzduchu.

Výhodou metody je možnost kombinace více denitrifikačních technologií. V primární zóně je možné využít jednu z výše zmíněných úprav spalování (primární opatření) a dále zachovat sekundární a finální zónu.

Metoda je těžko použitelná při rekonstrukcích, protože dospalování je velice náročné na prostor. A toho u stávajících kotlů tolik není. Proto se využívá zejména při stavbě nových zařízení.

Největší celky založené na této technologii jsou realizovány hlavně v Japonsku a USA. Důvodem je zejména to, že je zde dostupné levné sekundární palivo - zemní plyn (KOLAT, 2008).

4.1.5 Nízkoemisní hořáky

Princip spočívá v konstrukci hořáků, která je ovlivněna snahou pozdržet smísení paliva a vstupujícího vzduchu, čímž se zajistí snížený přístup kyslíku a nižší teplota plamene. Dusík vázaný v palivu se mění později na NO_x a také se snižuje tvorba tepelných oxidů, a to vše bez vlivu na účinnost spalování.

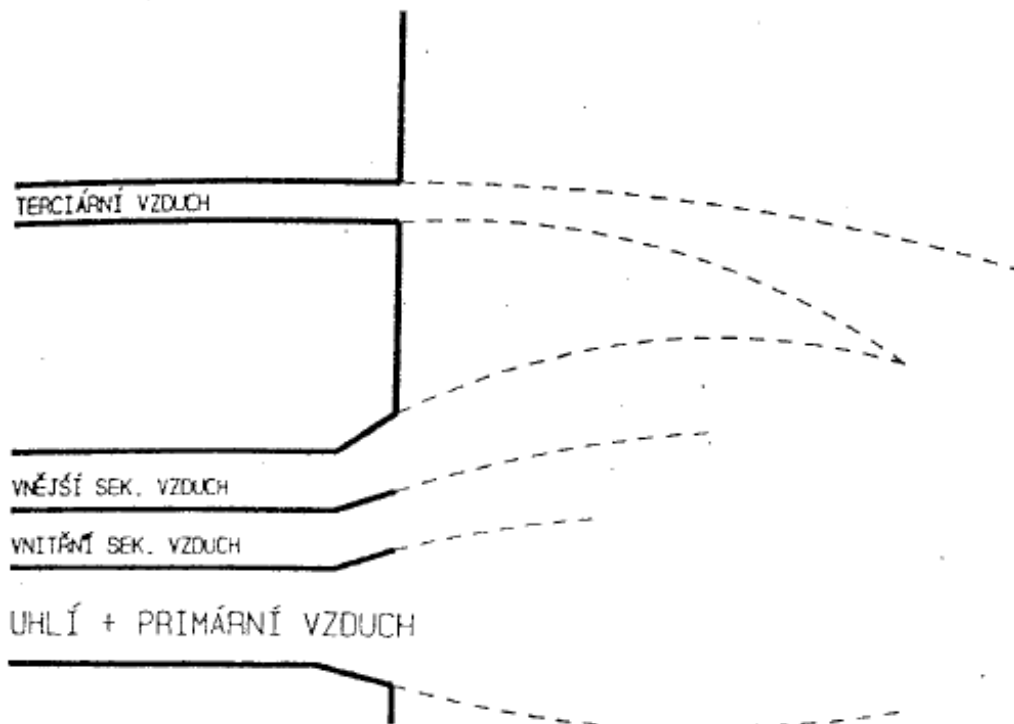
Spalování zde neprobíhá v celém spalovacím prostoru, ale pouze v plameni. Tento způsob má vyšší provozní náklady, protože je nutné pokrýt tlakovou ztrátu vedení vzduchu a také bývá potřebné zlepšit technologii mletí uhlí. Rekonstrukce starších kotlů není tak problematická, jelikož se jedná hlavně o výměnu hořáků. Výměnu lze provést s rozumnými investičními náklady a rychle, čímž se sníží ušlý zisk z odstávky zařízení.

Hlavní rozdíl oproti klasickým hořákům je tedy způsob mísení paliva a vzduchu. Klasické hořáky využívají společný vstřík. Tímto způsobem vznikne primární zóna plamene s vysokou teplotou a sekundární zóna s nižší. Jelikož závislost tvorby NO_x na teplotě je exponenciální, tak jakýmkoliv snížením teploty plamene se docílí většího snížení emisí oxidů dusíku (VŠB, 2011).

Nízkoemisní hořáky s odstupňovaným vzduchem

Princip metody je stejný jako princip popsany v bodě 4.1.2 (Vzduch je přiváděn do spalovacího prostoru ve třech prouděch: Primární vzduch je přiveden spolu s palivem dovnitř proudu sekundárního vzduchu. Množství sekundárního

vzduchu se udržuje v takové výši, aby palivový dusík přecházel na elementární. Terciární vzduch se přidává mimo hrdlo hořáku a slouží pro konečné spálení paliva). Jenom klasické hořáky jsou nahrazeny nízkoemisními.

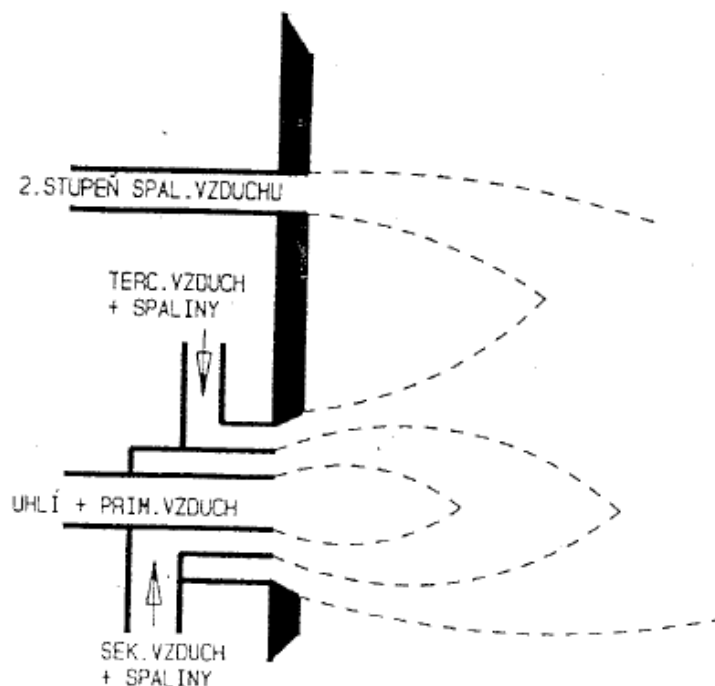


Obr. č. 14: Hořák s postupným přiváděním vzduchu.

Zdroj: VŠB, 2011

Nízkoemisní hořáky s recirkulací spalin

Základní princip je velice podobný jako u nízkoemisních hořáků s odstupňovaným vzduchem. Primární vzduch je opět vháněn společně s palivem. Sekundární a terciární vzduch je však přiváděn společně s recirkulovanými spalinami. Až 25 % spalin recirkuluje společně se vzduchem, čímž dojde k redukci teploty plamene. V primární zóně shoří především prchavá hořlavina a palivový dusík přejde do plynné fáze. V sekundární zóně shoří většina paliva a v redukční atmosféře přecházejí oxidy dusíku na dusík. Zbytky paliva jsou spáleny v terciárním vzduchu.



Obr. č. 15: Hořák s recirkulací spalin.

Zdroj: VŠB, 2011

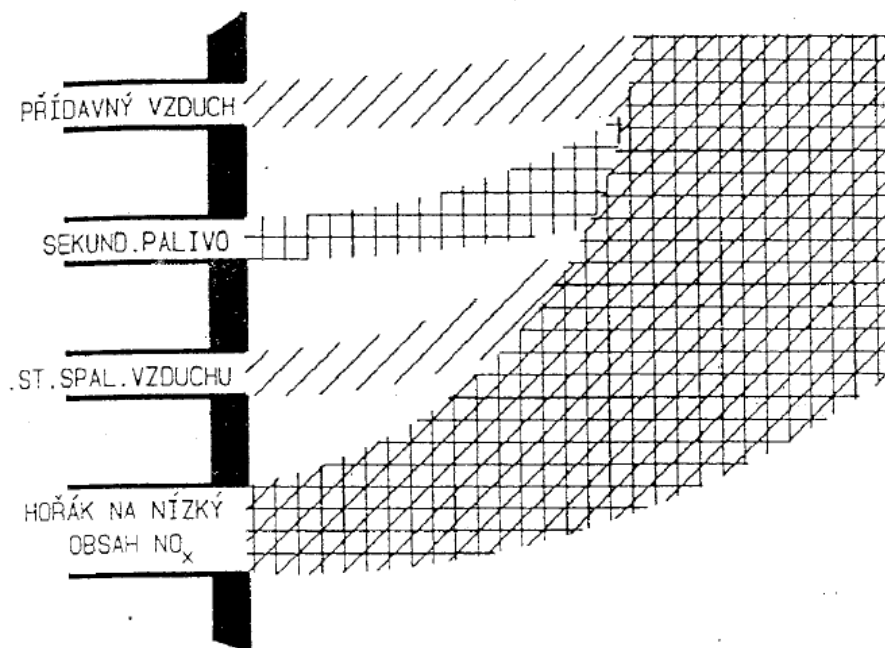
Nízkoemisní hořáky s dávkováním paliva

Mají také označení „hořáky na supernízký obsah NO_x “. Hlavním principem této technologie je využití dvojího přívodu paliva. Tím se dosáhne délky výsledného plamene přibližně o 50 % větší, než u standardního typu hořáku.

Větší podíl paliva se spaluje v primárním hořáku za vysokého přebytku vzduchu, čímž se dosáhne nižší teploty plamene.

Další podíl paliva – 7 až 15 %, se přivádí nad hlavní zónu hoření při nedostatku kyslíku a vytváří tak redukční prostředí, kde se oxidy dusíku redukují na dusík vlivem radikálů NH_3 , HCN a CO . Tento druhý proud paliva je přiváděn spolu s recirkulovanými spalinami, popřípadě jsou spaliny přiváděny nad něj.

Jako poslední stupeň se přivádí do dospalovací zóny vzduch a dojde ke spálení zbytku paliva.



Obr. č. 16: Hořák na supernízký obsah NO_x.

Zdroj: VŠB, 2011

Při použití této technologie lze snížit emise NO_x oproti hořákům na nízký obsah NO_x o cca 30 %. Tím je možné dosáhnout stanovený emisní limit NO_x 200 mg/m³ a v zásadě by nemusela být realizována sekundární denitrifikační opatření, která jsou celkem nákladná. Metodu je však možné použít pouze u nově budovaných jednotek. Proto sekundární denitrifikační opatření stále připadají v úvahu u stávajících zdrojů (VŠB, 2011).

4.1.6 Fluidní spalování

U fluidního spalování není klasický hořák. Jedná se o pokročilou technologii spalování, kdy fluidní lože je vytvářeno průtokem primárního vzduchu vrstvou částic, které jsou nasypané pod pórovité dno – fluidní rošt. Fluidní vrstvu tvoří palivo, aditivum pro odsíření (většinou vápenec nebo dolomit) a aditivum pro stabilizaci fluidní vrstvy (inertní materiál, např. křemičitý písek). Uhlí je před dávkováním do kotle umleto na prášek, kde velikost zrna nepřesahuje 10 mm. Sekundární vzduch je přiváděn samostatnou tryskou. Prouděním vzduchu dojde ke kvalitnímu promíchání práškového uhlí a spalovacího vzduchu (částice uhlí jsou obaleny vzduchem) a proces hoření je velmi rychlý - činí 0,5 až 3 s (u roštových kotlů je doba spalování i desítky minut). Přidáním odsiřovacího aditiva lze snížit emise SO₂ o 40 až 95 %.

Na výstupu spalin musí být instalován odlučovač tuhých částic. Ten bývá elektrostatický nebo tkaninový, často jsou osazeny oba typy odlučovače. Výhodou elektrostatického odlučovače je, že nezpomaluje rychlost spalin. Zachycený popílek

je odveden na úložiště. U některých systémů popílek recirkuluje zpět do fluidní vrstvy.

Výhodou této technologie je, že je možné použít palivo různé kvality a i méně kvalitní palivo s nižší výhřevností. Díky přidávání odsiřovacího aditiva k palivu není nutné realizovat sekundární metody odsiřování. Palivo se spaluje při teplotách 760 až 930 °C, tedy výrazně pod hranicí, kdy se začíná tvořit velké množství vysokoteplotních oxidů dusíku (cca 1370 °C). V ideálním případě je možné dosáhnout snížení emisí NO_x až na hodnoty srovnatelné s hořáky na supernízký obsah NO_x. Technologie fluidního spalování plní současné limity emisí NO_x v České republice bez nutnosti realizovat některé ze sekundárních opatření denitrifikace.

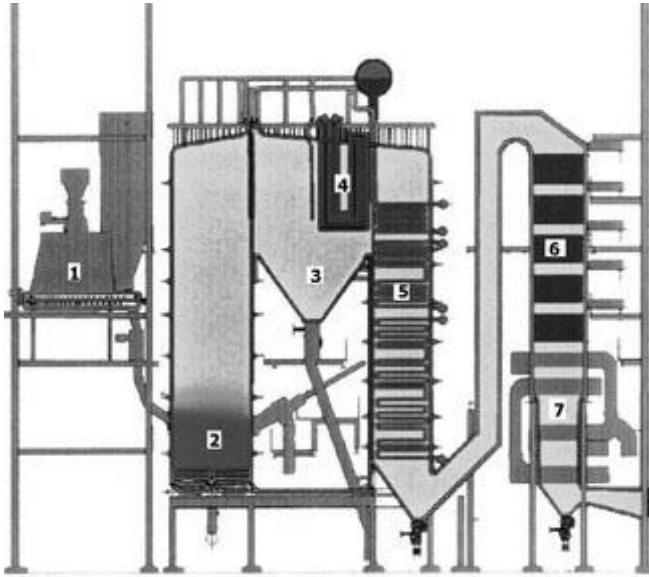
Nevýhodou fluidního spalování je nutnost drcení a mletí paliva na prášek při dodržení minimální velikosti zrn (*U.S. DEPARTMENT OF ENERGY; BALÁŠ, 2012*).

Podle druhu fluidního lože rozlišujeme několik typů fluidních kotlů:

- s bublajícím fluidním ložem (často se užívá také název „stacionární“ fluidní lože - AFB),
- s tlakovým fluidním ložem (PFB),
- s cirkulující fluidní vrstvou (ACFB).

STACIONÁRNÍ FLUIDNÍ LOŽE

Fluidní vrstva má zřetelnou hladinu a využívá se u menších jednotek do 50 MWt. Tyto kotle charakterizuje bublající neboli stacionární fluidní vrstva, která má velmi snadno rozpoznatelnou hladinu. Palivo se přivádí ze zásobníku paliva do spalovací komory, kam je také přiveden spalovací vzduch. Primární vzduch se vede skrze fluidní rošt, kde vzniká spalováním paliva a působením aditiva fluidní vrstva. Spaliny obsahující popílek pak procházejí dohořivací komorou, kam bývá často přiveden sekundární vzduch, který v mezitahu odlučuje velké částice tuhého popílku. Dále spaliny s menší koncentrací nečistot putují do parní části kotle, kde se přes výhřevné plochy předává teplo. Popílek se odvádí na úložiště, popřípadě je možné jej zavést zpět do fluidní vrstvy (*BALÁŠ, 2012*).



Obr. č. 17: Kotel se stacionární fluidní vrstvou.

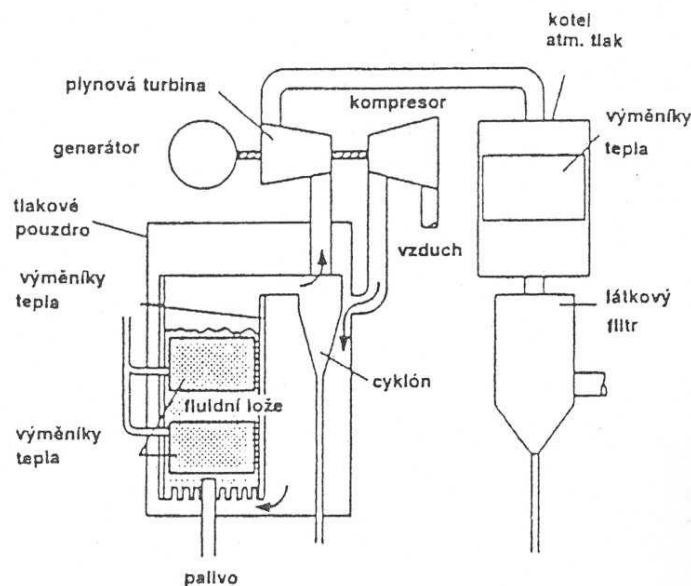
Zdroj: Baláš, 2012

1–zásobník paliva, 2–fluidní vrstva, 3–obratová komora, 4 a 5–přehřívák, 6–ekonomizér, 7–LUVO

V posledních letech probíhají experimenty se spalováním uhlí s kyslíkem. Experimenty byly prováděny ve stacionárním fluidním loži při teplotě 850 až 950 °C s palivem různé kvality. Ani v jednom z případů nebyla zjištěna tvorba NO₂. Vliv výše teploty na tvorbu N₂O a NO byl stejný jako při klasickém spalování. Na tvorbu NO však měla vliv vlhkost paliva – se stoupající vlhkostí se obsah NO snižoval (OBRAS-LOSCERTALES, 2015).

TLAKOVÉ FLUIDNÍ LOŽE

Princip je založen na stacionárním fluidním loži, které však pracuje při vysokém tlaku. Pro využití energie, která je obsažena ve stlačených spalínách, se do systému osazuje plynová turbína. Vyčištěné spaliny jsou přivedeny do turbíny, kde expandují. Na společné hřídeli je osazen kompresor, který dopravuje stlačený vzduch zpět do fluidního kotle (SKUPINA ČEZ, 1999).



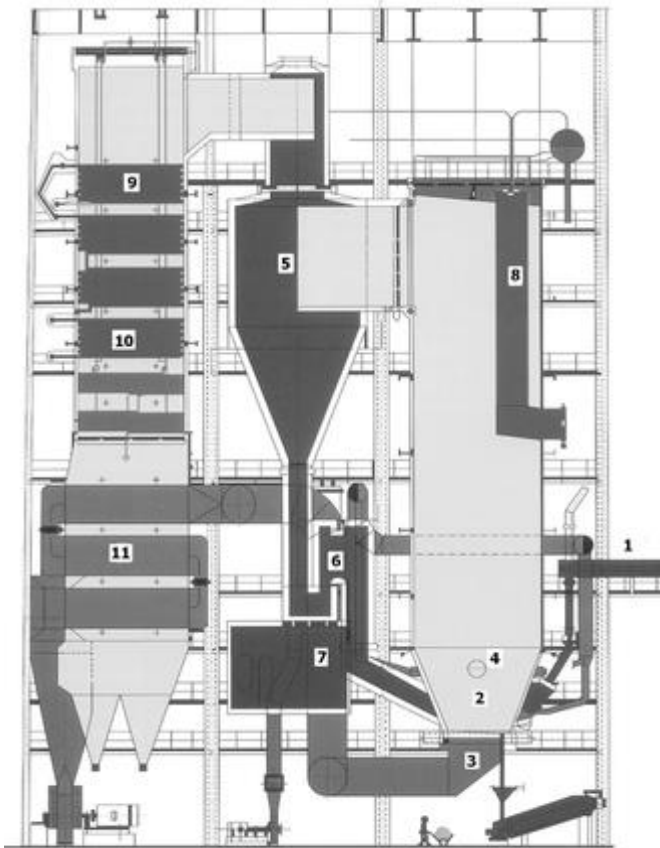
Obr. č. 18: Schéma kotle s tlakovým fluidním ložem.

Zdroj: ČVUT, 2015

CIRKULUJÍCÍ FLUIDNÍ VRSTVA

Systém se používá pro vyšší výkony kotlů (50 až 700 MW_t), než u kotlů se stacionárním fluidním ložem. U tohoto systému spalování není zřetelná hladina fluidního lože, ale částice fluidní vrstvy – paliva i aditiv, cirkulují mezi spalovací komorou a cyklonem, odkud jsou vraceny zpět do fluidního ohniště. Cirkulací dochází k delšímu pobytu částic ve spalovacím prostoru, čímž dochází k lepšímu vyhoření uhlíku (sníží se tak ztráty nedopalem) i k lepšímu odsíření. Uvádí se, že částice paliva cirkulují až 15x, než dojde k jejich vyhoření.

Primární vzduch se přivádí fluidním roštem v podstechiometrickém množství – (přibližně 70 % z celkového množství vzduchu přiváděného do kotle). Nad rošt se pak přivádí sekundární vzduch. Ze spalovací komory jsou spaliny přivedeny do cyklonu, kde dojde k odloučení pevných částic (až 90 %), které se vrací zpět do fluidní vrstvy (BALÁŠ, 2012).



Obr. č. 19: Kotel s cirkulující fluidní vrstvou.

Zdroj: Baláš, 2012

1–přívod paliva, 2–fluidní vrstva, 3–primární vzduch, 4–sekundární vzduch, 5–cyklon, 6–fluidní uzávěr (sifon), 7–externí chladič popele, 8 a 9–přehřívák, 10–ekonomizér, 11–LUVO

4.1.7 Práškové kotle

Palivem v práškových kotlích je uhlí, které musí být rozemleto tak, aby velikost zrn nepřesahovala 1 mm. Rozemletím dojde ke zvětšení měrného povrchu paliva (cca 100x většímu než u kusového uhlí) a tím k intenzivnějšímu spalování. Palivo se mele v mlýnicích, kde také dochází k jeho vysoušení. Práškové kotle nemají rošt, takže nedochází k omezování teploty primárního vzduchu. Proto se také tyto kotle využívají pro nejvyšší výkony.

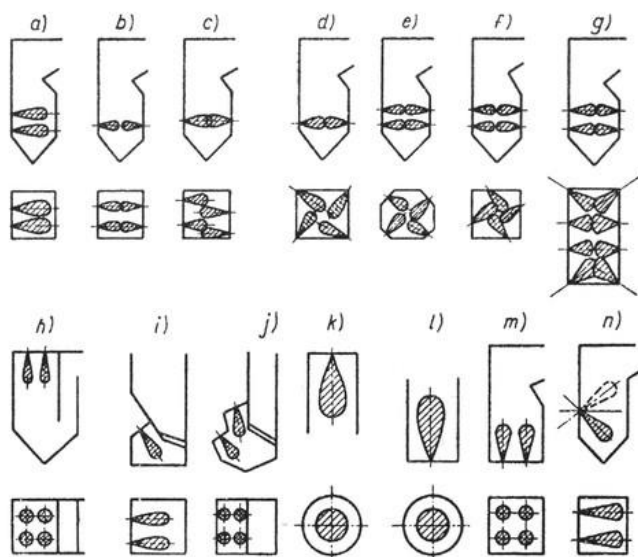
Největší kotel v České republice je instalovaný v elektrárně Ledvice a má výkon 1678 t páry/h. Největší kotel ve světě má výkon 4200 t páry/h.

Existují dva typy práškových kotlů:

- granulační, kde se tuhé zbytky z ohniště odvádějí v podobě škváry,
- výtavné, kde se tuhé zbytky z ohniště odvádějí v podobě tekuté strusky.

V České republice se využívají ve většině případů granulační ohniště, která jsou vhodnější pro naše hnědé uhlí.

Palivo – rozemleté uhlí se do ohniště přivádí spolu s primárním vzduchem, který slouží jako nosné medium. Primární vzduch může být smíchán se spalinami. Tato primární směs se spolu se sekundárním vzduchem zavede do kotle práškovými hořáky, které mohou mít různé uspořádání:



Obr. č. 20: Varianty hořáků v ohništích kotlů.

Zdroj: BALÁŠ, 2012

a–dvouřadé čelní, b–jednořadé protiběžné, c–jednořadé vystřídané, d–jednořadé rohové (tangenciální), e–dvouřadé rohové (tangenciální), f–dvouřadé rohové (tangenciální), g–dvouřadé kombinované, h, k–stropní, i, j–uspořádání v čelní stěně u výtavných ohnišť, l – naklápěcí

Směs se v ohništi smísí s terciálním vzduchem. Spalovací vzduch se předeřhřívá na teplotu 300 až 450°C.

Nevýhodou práškových kotlů jsou vyšší investiční náklady na mlecí zařízení a snížení účinnosti celého zařízení kvůli vyšší vlastní spotřebě. Další nevýhodou je vysoké znečištění spalin popílkem, kterým jsou zvyšovány požadavky na odprašovací zařízení (BALÁŠ, 2012).

4.1.8 Optimalizace spalovacího procesu

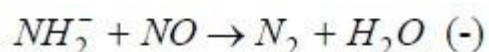
Je velmi účinnou metodou snížení emisí oxidů dusíku. Účinnost spalování je dána zejména poměrem vzduchu a paliva, ale také vhodným rozptřením vzduchu ve spalovacím prostoru. Proto volba optimálního poměru paliva a vzduchu je zásadním faktorem pro minimalizaci emisí NO_x a zvýšení účinnosti spalovacího procesu.

Při tradičních metodách spalování a při rozdílné kvalitě spalovaného uhlí je složité najít a udržet ideální poměr paliva a spalovacího vzduchu. Proto je nutné vyvíjet a uvádět do provozu inteligentní systémy sledování a řízení spalovacího

procesu v kotli, založené na kombinaci neuronové sítě a technologie digitálního zpracování obrazu plamene. Metoda již byla testována na různých typech kotlů s tepelným výkonem 150–200 MW a bylo potvrzeno výrazné snížení emisí oxidů dusíku bez snížení výkonu kotle (БЕЛИКОВ, 2006).

4.2 Sekundární opatření

Sekundární metody odstraňování NO_x spočívají ve využití chemických či fyzikálně-chemických procesů. Nejedná se tedy o úpravu stávající technologie (primární opatření), ale odstraňování NO_x ze spalin přidáním činidla. Všechny sekundární metody jsou založeny na reakci iontů NH₂⁻ s NO za vzniku molekulárního dusíku N₂ a vody H₂O.



Jako zdroj radikálů NH₂⁻ se využívají tři látky:

- čpavková voda - NH₄OH
- močovina - (NH₂)₂CO
- kyanomočová kyselina - (HNCO)₃

Sekundární metody můžeme rozdělit na suché metody a mokré metody.

Často používanými metodami jsou pak metody založené na současném odstraňování oxidů síry a oxidů dusíku, popřípadě oxidů uhlíku a oxidů dusíku. Primární a sekundární metody je výhodné kombinovat, protože tak lze dosáhnout maximální účinnosti odstranění NO_x ze spalovacího procesu (GRYCMANOVÁ, 2012).

4.2.1 Suché metody

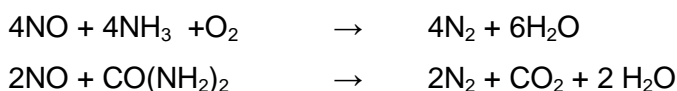
Při těchto metodách neklesá během procesu teplota pod rosný bod vody. Mezi tyto metody patří i metody katalytické, popřípadě kombinace fluidního spalování tuhých paliv s přidavkem aditiv do spalovacího prostoru (HOLOUBEK).

4.2.1.1 Selektivní nekatalytická redukce (SNKR)

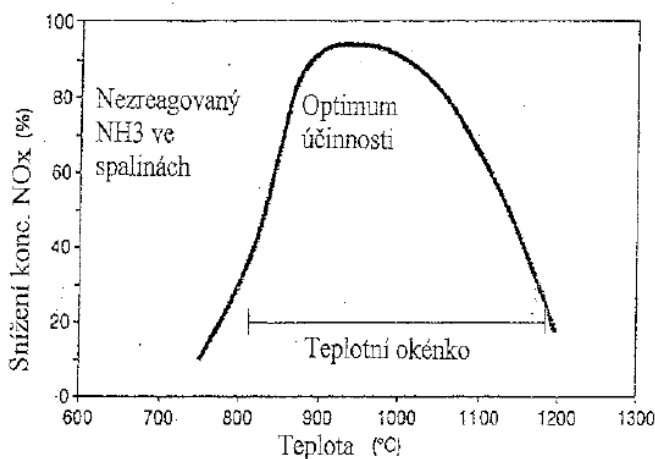
Princip této metody je založen na reakci NO_x s činidlem. Oxidy dusíku se redukuje bez přítomnosti katalyzátoru přidáním amoniaku nebo močoviny do kotle. Reakce probíhají v rozmezí teplot přibližně 800–1100 °C v závislosti na použitém činidle. Teplota, při které reakce probíhá s optimální redukcí, se nazývá „teplotní okénko“ (TO). Pro amoniak leží v rozmezí 850–1000 °C, pro močovinu v rozmezí 950–1100 °C. Rozpětí TO lze zvětšit přidavkem určitých chemikálií, např. přidáním

methanolu do močoviny. Rozpětí lze také zvýšit přidáním malého množství H₂ nebo zemního plynu (tím dojde ke snížení obsahu kyslíku).

Při SNCR probíhají následující reakce:



Vzhledem k rozsahu reakčních teplot je vhodné místo vstřiku činidla do kotle v zóně mezi spalovací komorou a ekonomizérem. Dodržení teplot podle teplotního okénka je důležité. Leží-li teplota místa vstřiku činidla pod TO, reakce probíhá pomalu a účinnost denitrifikace je nízká. Zároveň amoniak, který nezreagoval, uniká spolu se spaliny do ovzduší. Při vyšších teplotách pak amoniak oxiduje na oxid



dusnatý.

Obr. č. 21: Závislost účinnosti SNCR na teplotě spalin.

Zdroj: VŠB, 2011

Výkon kotle není stabilní, ale mění se podle požadavků na odběr energie. Takovému kolísání výkonu musí být kotel přizpůsoben – při nízkých výkonech je TO blíže k hořákům, při vyšším výkonu je od hořáků dál. V praxi je tento požadavek řešen umístěním dvou až tří míst pro vstřikování činidla v různých výškách nad hořákem a volba místa je řízena elektronicky v závislosti na teplotě (VŠB, 2011).

Činidlo může být zaváděno i ve formě kapaliny (roztok močoviny, amoniakální voda). V takovém případě hraje důležitou roli rozprášení činidla a tedy velikost kapek. Malé kapky se rychle odpaří a reakce může proběhnout nad optimální teplotou, tudíž dojde k nedostatečné reakci. Naopak velké kapky se odpařují déle a reakce nastane při nižší teplotě, kdy uniká nezreagovaný amoniak. Činidlo se do kotle může zavádět s tlakovým vzduchem, s vodou, s párou nebo s recirkulovanými

spalinami (při použití některého z primárních opatření). Účinnost celého procesu závisí na rovnoměrném rozprášení činidla do spalin, proto se používá více trysek různě rozmístěných. Podle provedené studie je pro snížení emisí NO_x neúčinnější vstřikování činidla zároveň se vstřikováním vzduchu (LEE a kol., 2008).

Nevýhodou SNKR je nutnost mít zařízení pro skladování činidla. Použití amoniaku jako redukčního činidla má některé nevýhody. Je to zdraví nebezpečná látka, která vyžaduje složitější technologická zařízení pro skladování (amoniak nebo amoniakální voda musí být skladovány v tlakových nádržích) a manipulaci. Při jeho úniku je okolí obtěžováno zápachem. Nezreagovaný amoniak se dostává se spalinami do ovzduší. Jeho emise by neměly překročit hodnotu 50 mg/m_n^3 . Vzniklé sloučeniny amoniaku a síry mohou také vytvářet nežádoucí nánosy na strojním zařízení. Z uvedených důvodů se u některých postupů používá místo amoniaku močovina, kterou je možné skladovat v beztlakých nádržích a nemá uvedené negativní dopady.

Metoda SNKR je vhodná pro použití v technologii s nízkými emisemi (není tak účinná) nebo s emisemi již sníženými primárními opatřeními. Účinnost metody se pohybuje mezi 50–65 %. Výhodou SNKR jsou nižší investiční náklady – ty činí přibližně 20 % nákladů na selektivní katalytickou redukci. Metoda také není náročná na samotnou montáž, proto je možné ji použít jako technologii při rekonstrukci spalovacích zařízení (VŠB, 2011).

CONOx

Jednou z technologií SNKR je CONOx technologie. Technologie je založena na vstřikování předehřátého reaktivního kyslíku do spalin tryskou. Tryska je umístěna ve spalinovém potrubí v místě, kde horké spaliny opouští spalovací prostor. Tím se vytváří vysoké koncentrace volných radikálů, které umožňují rychlé reakce při teplotě spalin. Předehřátý kyslík odstraňuje prekurzory oxidů dusíku i uhlíku, a tím snižuje tvorbu NO_x a CO. Důležitá u této technologie je vysoká rychlost vstřikovaného kyslíku, který se rychle smísí s odpadními plyny. Tuto technologii lze kombinovat i s dalšími metodami denitrifikace (SHELL GLOBAL).

Určitou modifikací CONOx technologie je spalování paliva s přebytkem kyslíku a zároveň se zavedením recirkulace spalin, kdy dochází k podstatnému snížení emisí NO_x i CO_2 (BUHRE, B., 2005).

Bio-CONOx

Další z technologií SNKR je technologie Bio-CONOx. Jádrem technologie je přidání biomasy k palivovému uhlí – jedná se tedy o proces spalování. Jako

nejefektivnější přídatné palivo se ukázal extrahovaný řepkový šrot. Ten se vyznačuje pomalým tepelným rozkladem při vysokých teplotách, při kterém se uvolňuje značné množství amoniaku, lehkých uhlovodíků včetně metanu, aktivních volných radikálů, ketonů a dalších dusíkatých sloučenin. Ke snížení emisí oxidů dusíku dochází při nedostatku kyslíku a za vysokého obsahu těkavých látek pomocí dvou kombinovaných mechanismů: SNKR a opětovným spalováním.

Testy ukázaly, že zvýšením podílu přídatného paliva z 10 % na 30 % dojde k relativnímu snížení emisí NO_x o 15–40 %. Tuto technologii je však možné zatím využít pouze v kotlích s tepelným výkonem do 10 MW (POSKROBKO, 2012).

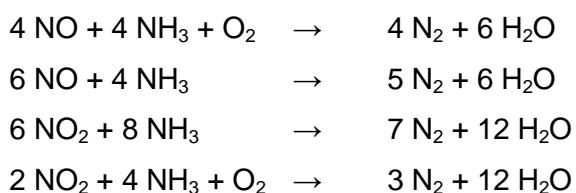
CMA

U této technologie se jedná o souběžné snížení emisí NO_x a SO₂. Reakčním činidlem je roztok octanu vápenatého a hořečnatého, který je vsťikován do spalin o teplotě 1 100–1 200 °C. Pyrolýzou dojde k uvolňování uhlovodíkových molekul (CH), které následně reagují s NO_x. Podle stechiometrického poměru v primární spalovací zóně bylo dosaženo snížení emisí NO_x v rozsahu 30–80 % (NIMMO, 2004).

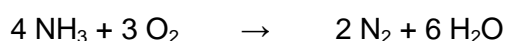
4.2.1.2 Selektivní katalytická redukce (SKR)

Princip této metody spočívá v reakci NO_x s činidlem na katalyzátoru za vzniku dusíku. Činidlo je dávkováno do spalin. Jako činidlo se může používat močovina, ale hlavním činidlem je amoniak, protože je cenově dostupnější. Tím se snižují provozní náklady. Čpavek se skladuje obvykle jako kapalný. Pro jeho využití jako činidla na katalyzátoru je potřeba, aby byl plynný. Jeho zplyňování se provádí v elektrických, parních či horkovodních odparkách. Energetická náročnost SKR se udává okolo 2 %.

Při procesu SKR probíhá více reakcí. Mezi ty hlavní patří:



Amoniak se přidává v malém přebytku oproti stechiometrii, protože se ztrácí kromě nedokonalé redukce také oxidací:



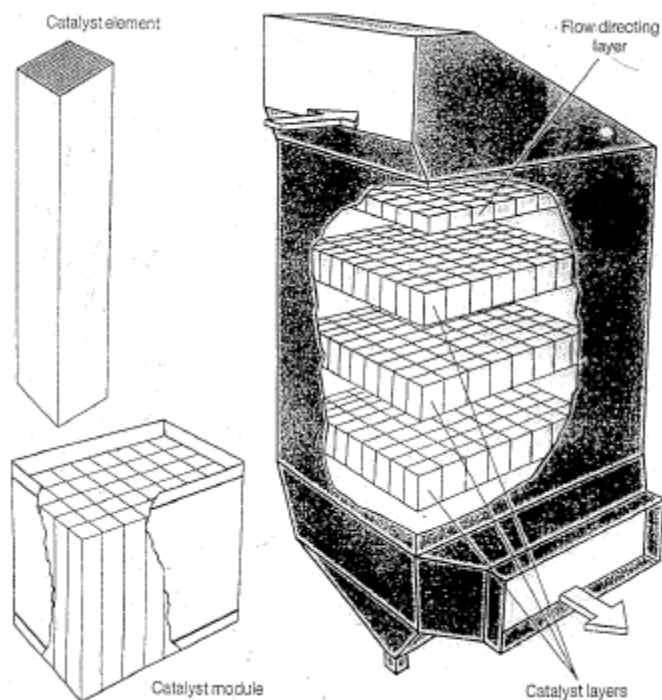
Reakce probíhá díky katalyzátoru převážně při teplotách 300–400 °C, zatímco SNKR probíhá při teplotách přibližně 800–1100 °C. Nízká teplota je tedy základem

vysoké účinnosti SKR a to vzhledem k tomu, že vznik NO_x exponenciálně roste se zvyšující se teplotou hoření, tedy i exponenciálně klesá při snížení teploty.

Podle technologického uspořádání rozlišujeme dvě varianty SKR:

- **vysokoteplotní**, kde probíhají reakce při teplotách 300-450 °C, varianta se vyskytuje ve dvou modifikacích:
 - SKR před odprášením spalin,
 - SKR po odprášení spalin,
- **nízkoteplotní**, kde reakce probíhají při teplotách do 150 °C. Tato varianta zatím není příliš využívána, protože současné katalyzátory jsou značně nespolehlivé a málo účinné. Alternativní metodou selektivní katalytické reakce k nízkoteplotní technologii je selektivní katalytické redukce na aktivním uhlí.

Volba velikosti a tvaru katalyzátoru závisí na množství čištěných spalin, vlastnostech katalyzátoru či požadovaném snížení NO_x . Reaktory pro SKR bývají čtyřhranné skříně s vertikálním prouděním u pevných paliv nebo horizontálním prouděním u plynového topeniště. Katalyzátory, zejména jejich nosiče, musí odolávat extrémním podmínkám – plynu, který obsahuje agresivní oxid siřičitý a abrazivní popílek. Ten také snižuje aktivitu katalyzátoru. Z těchto důvodů tvoří katalyzátorové těleso keramická kostra, která je potažena oxidem titaničitým (ten nahradil původní oxid hlinitý). Usazování popílku v katalyzátoru zabraňuje proudění spalin a také jeho tvar - nejčastěji je tvořen voštinami s vertikálními otvory (ČVUT, 2015).



Obr. č. 22: Schéma DENOX reaktoru pro SKR.

Zdroj: ČVUT, 2015

Jako vlastní katalyzátor se používají oxidy těžkých kovů (wolfram, molybden), zejména však oxid vanadičitý. Optimální teplota vanadového katalyzátoru se pohybuje kolem 350 °C. Při nižší teplotě výrazně klesá účinnost, při vyšší teplotě dochází ke katalytické oxidaci oxidu siřičitého na oxid sírový, který způsobuje zvýšenou korozi. Katalyzátor je nutné udržovat trvale v provozu a při odstávce zařízení musí být udržována jeho teplota na 300 °C, jinak by došlo k usazování NH_4HSO_4 na katalyzátoru.

Potřebná prostorová rychlost na katalyzátoru se liší podle paliva, v případě uhlí také podle typu ohniště. U výtavného ohniště je nezbytná rychlost cca 2500 h^{-1} , u granulačního ohniště rychlost cca 3500 h^{-1} . Z uvedených rychlostí tak vychází potřebný objem katalyzátoru 130 m^3 u výtavného ohniště a 90 m^3 u granulačního ohniště na každých 100 MW elektrického výkonu.

Životnost katalyzátoru je však omezená a závisí především na druhu paliva. V případě uhlí je nejkratší a činí cca 3 roky. Pro zajímavost: u plynu činí 6 až 7 let. Aby nemusel být každé 3 roky katalyzátor měněn, bývá rozdělen do několika vrstev. Poslední vrstva (dolní vrstva) se po dožití odstraní a shora je nahrazena novou (ČVUT, 2015).

Nevýhodou SKR je nutnost udržovat postupnou rychlost spalin v katalyzátoru v malém rozsahu – 4 až 8 m/s. V případě vyšších rychlostí by docházelo k vysoké

tlakové ztrátě, při nižší rychlosti zase dochází k usazování popílku. Z těchto důvodů je složitější uplatnění SKR u kotlů s variabilním výkonem. Řešením je osazení dvou reaktorů na jeden kotel, kdy podle aktuálního výkonu kotle pracuje buď pouze jeden reaktor, nebo oba současně. Toto řešení však prodražuje jak pořizovací náklady, tak i náklady provozní.

Dle obsahu prachu můžeme dělit katalyzátory na tři uspořádání:

1. Vysoký obsah prachu – není potřeba ohřev spalin, nevýhodou však je, že spaliny obsahují nečistoty (popílek, katalytické jedy), další nevýhodou je nutnost volného prostoru v okolí kotle, pokud se jedná o osazení této technologie na stávající celky.
2. Nízký obsah prachu – hlavním kladem je menší poškození katalyzátoru a tím pádem i jeho delší životnost, nevýhodou je nutnost zabudovat odlučovače pro vysokoteplotní prach.
3. Koncový plyn – toto uspořádání je nejšetrnější ke katalyzátoru, lze použít i menší katalyzátor, nevýhodou je potřeba ohřevu vstupujících spalin na provozní teplotu, kterou potřebuje katalyzátor.

Katalyzátor tedy slouží k urychlení reakce a také tyto reakce mohou probíhat za nižších teplot, díky čemuž dojde k šetření vlastní spotřeby výrobního celku. Reakce probíhá v rozmezí teplot 300–450 °C.

Modifikací metody SKR je nanesení vrstvy katalyzátoru na tkaninové rukávové filtry. Zařízení jsou již technologicky aplikována v moderních spalovnách, ale dlouhodobé vyhodnocení a porovnání provozních nákladů této technologie s doposud používanou SKR technologií nejsou dostupné (ČVUT, 2015).

S úspěchem byl uplatněn nový katalytický systém SDS (Shell Denox System), který je označován jako DeNO_x/DeDioxin systém. Ten pracuje na bázi Ti/V katalyzátoru. Systém byl uplatněn v MWI v Roosendaalu. Bylo dosaženo účinnosti v odstranění NO_x vyšší než 98 %, která je zaručena pro teplotní rozmezí 100-230 °C. Účinnost katalyzátoru zůstala nezměněna i po 7000 provozních hodinách (MOKO HK, 2011).

Výhody selektivní katalytické redukce:

- možnost využití s mnoha druhy paliv,
- žádné vedlejší složky znečištění,
- vysoká účinnost (více jak 90 %).

Nevýhody selektivní katalytické redukce:

- drobný únik čpavku ve spalínách následkem neúplné reakce při hoření,
- finančně náročná technologie.

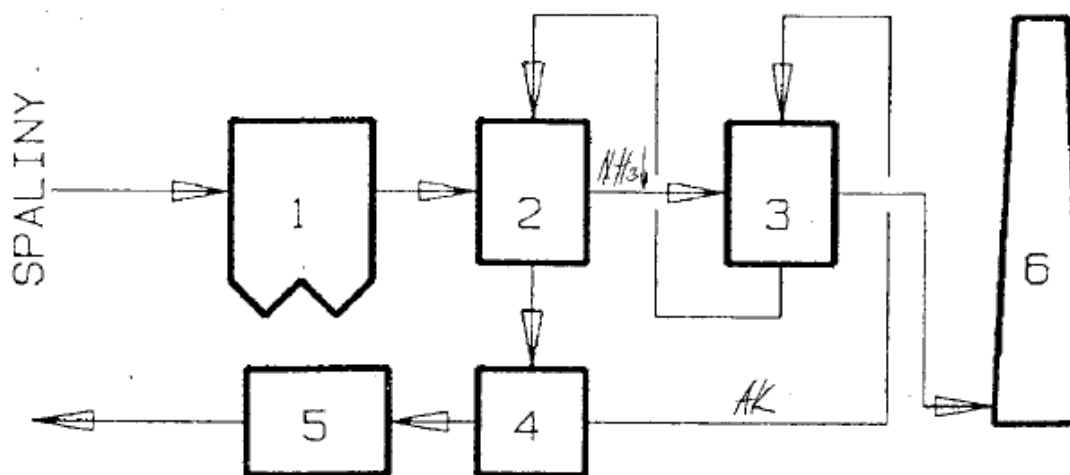
I přes finanční náročnost této metody je v současné době používána ve většině nově instalovaných spaloven a patří k základním metodám soudobých BAT technologií (ČVUT, 2015).

4.2.1.3 Redukce NO_x na aktivním koksu

Jedná se o kombinovanou metodu odstranění oxidu siřičitého a oxidů dusíku. Je založena na odsíření spalin metodou Bergbau-Forschung. Aktivní koks se získává nízkoteplotnou karbonizací černého uhlí s nízkým obsahem popela (max. do 8 %). Karbonizace probíhá při teplotě 600 °C, uhlí se dále mele, formuje do požadovaného tvaru a reaktivuje za pomoci páry při teplotě 900 °C. Takto připravený materiál má příznivou strukturu pórů a značnou pevnost a odolnost proti otěru.

Spaliny nejprve procházejí aktivním koksem, který naváže oxid siřičitý za vzniku kyseliny sírové (H₂SO₄). Tento vedlejší produkt lze dále využít, např. prodat. Teplo spalin je možné využít ve výměníku pro karbonizaci černého uhlí. Vlastní proces denitrifikace probíhá přidáním amoniaku k aktivnímu uhlí, kde aktivní uhlí působí jako katalyzátor a probíhají reakce popsané u selektivní katalytické redukce.

Metoda je ve srovnání s klasickou selektivní katalytickou redukcí výhodná z hlediska nižších pracovních teplot. Nevýhodou je nutnost mnohonásobně většího reaktoru vzhledem k menší prostorové rychlosti (VEJVODA, 2003).



Obr. č. 23: Schéma redukce NO_x na aktivním koksu.

Zdroj: Vejvoda, 2003

4.2.1.4 Radiační metoda

Jedná se o suchý proces, kdy se odstraňují současně oxidy síry a oxidy dusíku. Funkci katalyzátoru zde nahrazuje působení urychlených elektronů.

Spaliny nejdříve procházejí mechanickým odlučovačem a přímým vodním chladičem. Poté vcházejí do ozařovací jednotky, kde jejich ozářením urychlenými elektrony dojde k vytvoření radikálů. Ty reagují s přidávaným amoniakem a s přítomným kyslíkem za vzniku síranu amonného a dusičnanu amonného. Amonné soli se odlučují v elektroodlučovači. Směs síranu amonného a dusičnanu amonného je možné použít jako hnojivo.

Metoda byla vyzkoušena v Japonsku. Bylo při ní dosaženo účinnosti 95 % u SO₂ a 80 % u NO_x. Hlavní nevýhodou metody je vysoká energetická náročnost – udává se 3 % z výkonu kotle; u selektivní katalytické redukce se udává cca 2 % (VŠB, 2011).

4.2.1.5 Experimentální proces

V Polsku proběhl experiment se souběžným odstraňováním oxidů dusíku a oxidu síry reakcí se směsí oxidačního činidla a sorbentu, kde sorbentem byl hydroxid vápenatý /Ca(OH)₂/ a jako oxidační činidlo byly použity chlornan vápenatý /Ca(OCl)₂/, popřípadě chlornan sodný (NaOCl) nebo oxid vodíku (H₂O₂). Pokus probíhal po dobu osmi hodin při průběžném měření emisí

Směs sorbentu s oxidačním činidlem byla vstříkována do kouřových plynů. Při pokusech bylo prokázáno, že na množství odstranění SO_x má vliv i použité oxidační činidlo (KUROPKA, 2008). Účinnost odstranění NO_x i SO₂ při použití různých oxidačních činidel je uvedena v tabulce (hodnoty uvedené v tabulce jsou průměrem hodnot naměřených po dobu 8 hodin):

OXIDAČNÍ ČINIDLO	SO ₂ (mg/m ³)		SO ₂ (%)	NO _x (mg/m ³)		NO _x (%)
	VSTUP	VÝSTUP		VSTUP	VÝSTUP	
Ca(OCl) ₂	1598	144	91	517	183	64,6
NaOCl	1578	120	92,4	506	185	63,5
H ₂ O ₂	1591	190	88,1	500	224	55,2

Tab. č. 10: Emise NO_x a SO₂ při použití různých oxidačních činidel

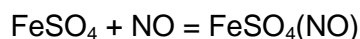
Zdroj: Kuroпка, 2008

4.2.2 Mokr  metody

Jsou pouziteln  pro menší objemy odpadních plynů s výší koncentrací NO_x. P  aplikaci těchto metod odstraňování NO_x je důležitý rozdílný charakter NO a NO₂. NO má vlastnosti inertního plynu – nemá snahu přecházet do roztoku, zatímco NO₂ je reaktivní a d bře se rozpouští ve vodě. Z NO_x ve spalinách v razn  převažuje NO, proto je nutné zvolit takov  postupy, při kterých bude NO převeden na NO₂, pop rpadě postupy, při kterých je využita schopnost NO vytvářet komplexn  soli. Při těchto metodách tedy přichází spaliny do kontaktu s vodn m roztokem (např. NaOH) nebo se suspenzí aktivn  látky. V souasně době nejsou p il š pouz v ny, pop rpadě se pouz v j  v kombinaci s některou z metod odsíření spalin.

4.2.2.1 Proces SHL (Saarberg-Holter-Lurgi)

Je jednou z metod, při kterých je využito schopnosti NO vytvářet komplexy. Oxid dusnatý zde reaguje se železnatou solí a vznikne nitrosokomplex.

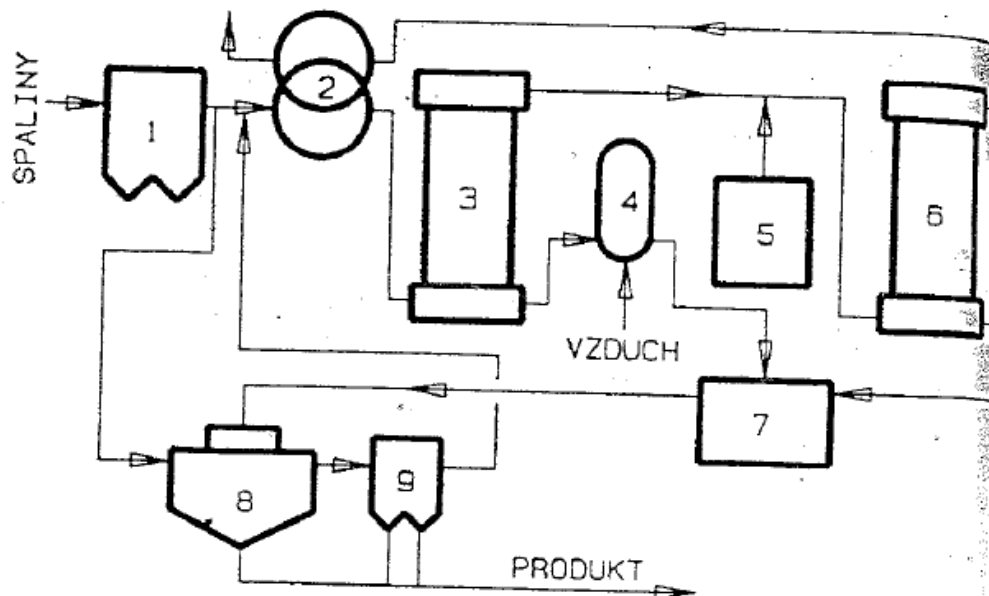


Schopnost vytvářet komplex m  jen dvojmocn  železo. Aby nemohlo docházet k jeho oxidaci kyslíkem na trojmocn , v že se do komplexu s kyselinou ethylendiamintetraoctovou (EDTA). Pro využití v praxi bylo nutné zajistit regeneraci roztoku. Ta se provádí přidáním alkalického si iĉitanu. Tím vznikne voln  komplex a síran, kter  se v další m stupni sráží na sádrovec.

4.2.2.2 Kombinovan  způsob Walther

Jedná se o metodu, u které je nejv ší moznost budoucího využití z mokrých metod vyuz vaj c ch oxidaci NO na NO₂. Nejprve proběhne desulfuraĉn  proces Walther & Cie (vypírání oxidu si iĉit ho amoniakem), po kter m následuje proces denitrifikace. Při této metodě se vyuz v  oxidace ozonem z ozonizátoru a následuje vypírka ĉpavkov m roztokem. V roztoku se zachycuje NO₂ jako dusiĉnan amonn . Denitrifikaĉn  proces tvo r  vlastn  druhý stupeň desulfuraĉn  technologie Walther. Při této metodě se vyuz v  oxidace ozonem z ozonizátoru, kde se NO oxiduje na NO₂, a ten se absorbuje amoniakem. N sledn m zahuštěním odpařováním se zpracuje na dusiĉnan amonn  (ledek - NH₄NO₃), kter  se pouz v  jako hnojivo (VEJVODA, 2003).

Roztoky z obou absorbérů se m s  přímo v poměru, v jakém se pouz v  poměr síranu a dusiĉnanu amonného v hnojivech. Odpaření roztoku se provádí stejn  jako u původního způsobu Walther. Z krystalů se vytvářejí pelety, kter  se dod v j  jako hnojivo.



Obr.27. Kombinovaný způsob Walther

- | | | |
|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1 - elektrofiltr | 4 - oxidér | 7 - směš.nádrž |
| 2 - REGAVO | 5 - výroba O ₃ | 8 - rozpr.sušárna |
| 3 - pračka SO ₂ | 6 - pračka NO | 9 - elektrofiltr |

Obr. č. 24: Schéma kombinovaný způsob Walther.

Zdroj: Vejvoda, 2003

4.2.2.3 Proces SNOx (Haldar – Topsöe)

Při této metodě se nejprve při teplotě 190 °C odpráší spaliny v tkaninovém odlučovači. Používá se tkanina z expandovaného tetrafluorethylenu (e-PFTE). Cílem je snížit koncentraci popílku pod hodnotu 5 mg/m³. Následně se spaliny ohřejí na 380 °C a přidá se amoniak. Spaliny putují do reaktoru s katalyzátorem (V₂O₅ a MoO₃ na TiO₂), kde proběhne selektivní katalytická redukce NO_x na N₂. Spaliny za reaktorem se ohřejí nepřímým spalováním zemního plynu na 420 °C a v reaktoru s oxidačním katalyzátorem (V₂O₅ na Al₂O₃) se oxiduje SO₂ na SO₃.

Za účelem vyloučit kyselinu sírovou v koncentrované formě (cca 95 %) se spaliny pomalu chladí ve skleněném chladiči. Chladícím médiem ve skleněném chladiči je vzduch, který se využívá jako spalovací vzduch do hořáků. Spaliny pak procházejí mokrým elektrostatickým odlučovačem, kde se odloučí i zbývající zředěná kyselina sírová.

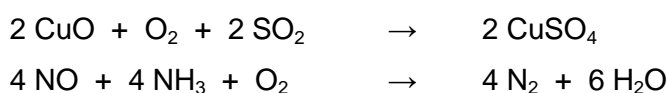
Na oxidačním katalyzátoru je pak zneškodňován NH₃, který prošel denitrifikačním reaktorem, na hodnotu 0,01 ppm a dále se oxiduje na NO a organické látky ve spalinách. Účinnost odsíření i denitrifikace je okolo 95 % (VEJVODA, 2003).

4.2.2.4 Proces DESONOX

Princip je podobný jako u procesu SNOx. Rozdíl je v tom, že selektivní katalytická redukce i katalytická oxidace SO₂ na SO₃ probíhají v jednom reaktoru při stejné teplotě. Selektivní katalytická redukce probíhá na zeolitech, oxidace na oxidovém katalyzátoru při teplotě 420 °C.

4.2.2.5 Proces SHELL

Jedná se o kombinovaný regenerativní katalytický proces. Katalyzátorem je CuO na Al₂O₃. Odsiřování a denitrifikaci charakterizují reakce:



Regenerace nasyceného sorbentu se provádí redukcí vodíkem. Sorbent následně oxiduje zpět na aktivní formu, kterou je pro odsiřování CuO a pro denitrifikaci CuSO₄:



Optimální teplota pro odsiřování je okolo 300 °C a pro regeneraci 600 °C (VEJVODA, 2003).

4.2.2.6 Proces Bergbau-Forschung-Uhde

Jedná se také o kombinovaný způsob odstranění SO₂ a NO_x ze spalin na aktivním koksu. Nejprve proběhne adsorbce SO₂ ze spalin na aktivním koksu a následuje denitrifikací amoniakem. Jako katalyzátor funguje aktivní koks. Tato technologie je instalována v elektrárně v Arzbergu v SRN u dvou kotlů na hnědé uhlí s celkovým výkonem 237 MW (107 a 130 MW).

Princip technologie:

Neodsířené spaliny vstupují do spodní části reaktoru při teplotě 90 °C horizontálním směrem, protékají křížovým tokem vrstvou pomalu se sunoucího aktivního koksu, který se sune odshora dolů, tedy kolmo na spaliny. Na druhé straně reaktoru se do odsířených spalin (obsah SO₂ < 100 mg/m_n³) přidává amoniak a spaliny vstupují opět horizontálně do horní části reaktoru. Zde při cca 80 °C opět při křížovém toku kolmo k pohybujícímu se aktivnímu koksu dochází k denitrifikaci. Podmínkou účinné denitrifikace je prakticky úplné odsiřování spalin.

V pórech aktivního koksu vzniká při odsiřování kyselina sírová, která inaktivuje jeho povrch pro selektivní katalytickou reakci. Kyselina sírová se dále redukuje na

oxid siřičitý. Jako vedlejší produkt vzniká reakcí mezi NH_3 a zbytkovým obsahem SO_2 síran amonný - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, který se tvoří na povrchu aktivního uhlí. Po reakci se koks proseje, prosev spálí v kotli a nadsítná část se regeneruje ohřevem na $450\text{ }^\circ\text{C}$.

Reaktor je na vnitřní straně obložen čedičovými deskami, které omezují otěr sunoucího se aktivního koku. Ve spodní části se aktivní koks chladí a zregenerovaný se vrací do reaktoru pro odsíření a denitrifikaci. Ztráty aktivního koku jsou způsobeny jednak jeho spotřebou při regeneraci a jednak otěrem. Vzniklý síran amonný se redukuje na dusík a oxid siřičitý, anebo se rozkládá na amoniak a oxid sírový. Uvolněný oxid siřičitý se zpracovává na kyselinu sírovou (VEJVODA, 2003).

4.2.2.7 Proces Walther

Navazuje na odsířovací proces Walther & Cie - vypírání oxidu siřičitého amoniakem. Odsířené spaliny se přivedou do ozonizátoru, kde se NO oxiduje na NO_2 a ten se absorbuje amoniakem. Následnou oxidací vzduchem a zahuštěním odpařováním se zpracuje na dusičnan amonný (ledek - NH_4NO_3), který se používá jako hnojivo (VEJVODA, 2003).

5. METODY A ZDROJE DAT

Tato bakalářská práce je rešeršní prací. Z tohoto hlediska byla práce náročná na zpracování rozsáhlého počtu tuzemských i zahraničních zdrojů literatury. Bakalářská práce se skládá se ze dvou hlavních částí: teoretické a praktické.

5.1 Teoretická část

V teoretické části byly formou rešerše vyhledány v tuzemských i zahraničních periodikách, odborných vědeckých člancích a publikacích i na internetových stránkách Českého hydrometeorologického ústavu, České informační agentury životního prostředí, Ministerstva životního prostředí i Evropské agentury pro životní prostředí informace a data o druzích, způsobech vzniku oxidů dusíku a jejich působení na životní prostředí, legislativě, která upravuje ochranu ovzduší a klimatu země i o známých metodách snižování emisí oxidů dusíku vznikajících ze spalování fosilních paliv v uhelných kotlech. Dále byla získána podniková data ze společnosti ČEZ, a.s., která se týkala denitrifikačních opatření v elektrárnách Počerady, Dětmárovice a Tisová, a vyhledána data z internetových stránek společnosti Teplárna Strakonice, a.s. o provozu a produkovaných emisích teplárny. Informace jsou zpracovány v kapitolách 3, 4 a 5.

5.1.1 Dusík a oxidy dusíku

Informace o dusíku a jeho sloučeninách - jejich vlastnostech a výskytu, byly získány hlavně z tuzemských zdrojů. Ze statistických dat Českého hydrometeorologického ústavu a z údajů Evropské agentury pro životní prostředí byly vyhledány údaje o vývoji roční produkce emisí NO_x v ČR a v EU za roky 2004 až 2013 a byl vypočítán podíl emisí na jednoho obyvatele. Také byly vyhledány údaje o podílu jednotlivých sektorů na emisích oxidů dusíku v České republice a v Evropské unii. V další části práce byla pozornost zaměřena zejména na oxidy dusíku (NO , NO_2), které vznikají spalováním uhlí ve stacionárních zdrojích - byly identifikovány způsoby vzniku NO_x při spalovacím procesu.

5.1.2 Legislativní rámec

Ve Sbírce zákonů ČR byly vyhledány zákony a jejich prováděcí vyhlášky, které se týkají ochrany ovzduší nebo s ním bezprostředně souvisí. Informace o mezinárodních předpisech (úmluvy a protokoly) byly získány ze stránek Ministerstva pro životní prostředí a ze stránek Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů.

5.1.3 Dopady oxidů dusíku na životní prostředí

Z dostupných zdrojů byly získány informace o způsobu, jakým se v ovzduší projevují škodlivé účinky NO_x i N_2O , o jejich negativním vlivu na životní prostředí i o jejich škodlivosti pro lidský organismus. Dopady NO_x byly rozděleny podle jejich vlivů na přímé účinky a účinky jako prekurzorů jiných emisí.

5.1.4 Metody snižování emisí NO_x

Důležitou součástí teoretické části bylo vyhledání metod, které se používají ke snížení emisí NO_x z provozu uhelných parních kotlů, a to jak úpravou spalovacího procesu (primární metody), tak při dodatečném čištění spalin (sekundární metody). Zároveň byly identifikovány i účinnosti nalezených metod.

5.1.5 Data z provozu stacionárních zdrojů

V rámci teoretické části bakalářské práce byla získána podniková data od společnosti ČEZ, a.s., která se týkala denitrifikačních opatření v elektrárnách Počerady, Dětmárovice a Tisová. Dále byla doplněna data z Teplárny Strakonice. Všechna data se týkají provozu uhelných parních kotlů. Data z jednotlivých provozů nejsou všechna stejného rozsahu, proto byla sestavena do přehledných tabulek tak, aby s nimi bylo možné v kapitole „Výsledky“ dále pracovat.

5.1.5.1 Elektrárna Počerady

V elektrárně Počerady (dále jen „EPC“) je instalováno pět 200 MW bloků. Každý blok je sestaven z parního kotle typu PG 640 o jmenovitém výkonu 640 t/h páry a kondenzační turbíny ŠKODA 200 MW. Dosažitelný tepelný výkon kotle je 974 MW_t. Průměrná roční výroba elektrické energie v EPC je 7 TWh. V roce 2011 bylo dosaženo účinnosti výroby tepelné energie 88,09 %. Na kotlích byla aplikována v letech 1997 a 1998 primární metoda pro snížení emisí NO_x v odchozích spalinách, která je založena na řízeném spalování v oblasti práškových hořáků při přibližně stechiometrickém spalování a následném postupném odhořívání paliva za nedostatku vzduchu, kde dochází k redukci oxidů dusíku obsažených ve spalinách. Za pásmem dohořívacího vzduchu OFA, kde je přebytek vzduchu cca 1,2, již dochází pouze k dohoření zbytků paliva a k redukci části CO na CO₂. Upravená vzduchová bilance kotlů je řízena v rámci automatické regulace.

Kotle v EPC jsou všechny stejného typu i výkonu, použito je stejné palivo – hnědé uhlí (výhřevnost 8,5 až 11,4 MJ/kg) a pro start a stabilizaci kotle zemní plyn. Také primární denitrifikační opatření provedená na kotlích v předchozích letech jsou stejná, proto byl pro další práci vybrán jeden kotel - K5 (ČEZ-2, 2012).

Před návrhem opatření na snížení emisí NO_x pod 200 mg/m³ bylo dosahováno následujících hodnot:

	EMISE NO _x (mg/m ³)	PRŮMĚRNÉ EMISE NO _x (mg/m ³)
Výkon kotle 100 - 70 %	480 - 520	534,38
Výkon kotle 70 - 60 %	500 - 550	

Tab. č. 11: Současné koncentrace emisí NO_x

Zdroj: ČEZ-2, 2012

Ke snížení výkonu kotle dochází zejména při spalování uhlí nižší kvality. Roční vstupy paliv a energie v EPC jsou následující:

VSTUPY PALIV A ENERGIE	MNOŽSTVÍ	VÝHŘEVNOST (GJ/jednotku)	PŘEPOČET (GJ)
Vlastní spotřeba el. energie (MWh)	34 438	3,60	123 977
Hnědé uhlí (t)	1 270 121	11,56	14 682 599
Zemní plyn (tis. m ³)	167,6	34,28	5 745
Celkem spotřeba paliv a energie	-	-	14 812 321

Tab. č. 12: Roční vstupy paliv a energie

Zdroj: ČEZ-2, 2012

Roční výroba tepla a spotřeba uhlí v EPC jsou následující:

VÝROBA A SPOTŘEBA TEPLA	HODNOTA
Celková spotřeba uhlí (t)	1 270 121
Celková výroba tepla (GJ)	13 022 127
Jednotková spotřeba uhlí (kg/GJ)	97,5
Jednotková výroba tepla (GJ/t)	10,3

Tab. č. 13: Spotřeba uhlí a výroba tepla

Zdroj: ČEZ-2, 2012

V EPC bylo dosahováno průměrných emisí, které jsou souhrnně uvedeny v tabulce:

UKAZATEL	JEDNOTKY	HODNOTY EMISÍ
Koncentrace emisí TZL	mg/m ³	11,96
Množství vypouštěných emisí TZL	t/rok	63,11
Koncentrace emisí NO _x	mg/m ³	534,38
Množství vypouštěných emisí NO _x	t/rok	2821,15
Koncentrace emisí NH ₃	mg/m ³	-
Množství vypouštěných emisí NH ₃	t/rok	-

Tab. č. 14: Průměrné emise

Zdroj: ČEZ-2, 2012

Ve výše uvedených přehledech jsou uvedeny průměrné hodnoty dosažené v roce 2009 až 2011. Od těchto stavů jsou v dalších výpočtech odvozovány úspory, popřípadě navýšení energií a snížení emisí znečišťujících látek v navrhovaných variantách (ČEZ-2, 2012).

Pro snížení emisí oxidů dusíku byly navrženy v první řadě primární opatření:

- instalace nových nízkoemisních hořáků
- instalace nové distribuce spalovacího vzduchu
- instalace a úprava stávajícího dohořivacího pásma vzduchu OFA
- instalace nových práškovodů
- úprava mlýnských okruhů
- vybudování systému recirkulace spalin
- nové instalace měřidel a regulačních členů příslušných zařízení
- instalace a úpravy příslušné části měření a regulace

Primární metody zajistí snížení emisí NO_x ve spalovacím procesu pod hranici 400 mg/m³ v celém výkonovém rozsahu kotle. Po realizaci primárních opatření bude dosahováno následujících koncentrací emisí:

	EMISE NO _x (mg/m ³)	SNÍŽENÍ (%)
Výkon kotle 80 - 100 %	max. 310	42
Výkon kotle 60 - 80 %	max. 360	33

Tab. č. 15: Předpokládané koncentrace emisí NO_x Zdroj: ČEZ-2, 2012

Pro snížení emisí NO_x v odchozích spalínách na úroveň pod 200 mg/m³ je navrženo ještě sekundární opatření, které spočívá ve vstřikování redukčního činidla (čpavková voda - 25% roztok, nebo močovina - 45% roztok s aditivou) do proudu horkých spalín. Po realizaci sekundárního opatření bude dosahováno následujících koncentrací emisí:

	JEDNOTKY	HODNOTY	SNÍŽENÍ [%]
Koncentrace emisí TZL	(mg/m ³)	beze změn	0
Množství vypouštěných emisí TZL	(t/rok)	-	-
Koncentrace emisí NO _x	(mg/m ³)	200,00	62,6
Množství vypouštěných emisí NO _x	(t/rok)	1055,85	1765,3
Koncentrace emisí NH ₃	(mg/m ³)	5,00	-
Množství vypouštěných emisí NH ₃)	(t/rok)	26,40	-

Tab. č. 16: Předpokládané hodnoty emisí po denitrifikačních opatřeních Zdroj: ČEZ-2, 2012

Po provedení denitrifikačních opatření se předpokládá následující spotřeba médií:

PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ EMISÍ NO _x			
medium	spotřeba	počet provozních hodin/rok	roční spotřeba MWh
el. energie	440 kW	7 547	3320,8
SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ EMISÍ NO _x – SNCR (45 % ROZTOK MOČOVINY S ADITIVY)			
medium	spotřeba	počet provozních hodin/rok	roční spotřeba t/rok,MWh
močovina	max. 360 kg/h	7 547	2717,0
voda	4600 kg/h	7 547	34717,0
tlakový vzduch	1095 kg/h	7 547	8264,1
el. energie	17,5 kW	7 547	132,1
SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ EMISÍ NO _x – SNCR (ČPAVKOVÁ VODA 25 % ROZTOK)			
medium	spotřeba	počet provozních hodin/rok	roční spotřeba t/rok,MWh
čpav. voda	max. 365 kg/h	7 547	2754,7
DEMI voda	4600 kg/h	7 547	34717,0
tlakový vzduch	1095 kg/h	7 547	8264,1
el. energie	7,5 kW	7 547	56,6

Tab. č. 17: Přehled spotřeb médií po denitrifikačních opatřeních Zdroj: ČEZ-2, 2012

Energetický auditor doporučil k realizaci primární opatření spolu se sekundárním opatřením - SNKR za použití čpavkové vody, protože investiční náklady na navržená opatření jsou nejnižší a stanoveného emisního limitu 200 mg/m³ bude dosaženo. Opatřeními dojde k celkovému snížení emisí NO_x o 62,6 %, úlet TZL zůstane nezměněn. Oproti současnému stavu vznikne vlivem použití reagentu při SNKR nová emise – NH₃.

Dalšího snížení emisí NO_x by bylo možné dosáhnout realizací dalšího sekundárního opatření - selektivní katalytické redukce, kde předpokládané koncentrace emisí NO_x nepřekročí 150 mg/m³ v celém výkonovém rozsahu kotle a únik NH₃ nepřekročí 3 mg/m³ (ČEZ-2, 2012).

5.1.5.2 Elektrárna Dětmorovice

V elektrárně Dětmorovice (dále jen „EDE“) jsou instalovány čtyři 200 MW bloky. Každý blok je sestaven z parního kotle typu PG 650 o jmenovitém výkonu 640 t/h páry a kondenzační turbíny ŠKODA 200 MW. Průměrná roční výroba elektrické energie v EDE je 2,1 TWh a tepla 800 TJ. Na všech kotlích byla aplikována v letech 1997 a 1998 primární metoda pro snížení emisí NO_x v odchozích spalinách, která je založena na řízeném podstechiometrickém spalování v oblasti nízkoemisních práškových hořáků a postupném dohořívání paliva za nedostatku vzduchu, kde dochází k redukci ve spalinách obsažených oxidů dusíku až do úrovně pásma dohořívacího vzduchu OFA. Za pásmem OFA již dochází pouze k dohoření zbytků paliva a k oxidaci části CO na CO₂. Součástí řídicího systému je kamerový monitorovací systém plamene a systém monitoringu spalování uhelného prášku (pro zajištění bezpečného provozování kotle na nízkých výkonech). Koncentrace NO_x před realizací denitrifikačních opatření v 90. letech činila cca 950-1 200 mg/Nm³ (ČEZ, 2012).

Kotle v EDE jsou všechny stejného typu i výkonu, použito je stejné palivo – směs černých uhlí (EDE je jedinou elektrárnou v ČR, která spaluje černé uhlí) a pro start a stabilizaci kotle zemní plyn. I současné primární opatření jsou stejná, proto pro další práci vybrán jeden kotel (K3), ke kterému byla získána potřebná data.

Před návrhem opatření na snížení emisí NO_x pod 200 mg/m³ bylo dosahováno v letech 2009 až 2011 následujících hodnot:

	EMISE NO _x (mg/m ³)	PRŮMĚRNÉ EMISE NO _x (mg/m ³)
Výkon kotle 100 - 70 %	250 - 380	325 - 348
Výkon kotle 70 - 60 %	400 - 500	

Tab. č. 18: Současné koncentrace emisí NO_x a nedopalů v popílku

Pro snížení emisí oxidů dusíku byly navrženy v prvé řadě primární opatření:

- instalace nové generace nízkoemisních hořáků
- zajištění a měření odpovídajícího množství vzduchu a paliva, které jdou do hořáku
- úprava stávajícího pásma dohořivacího vzduchu OFA a instalace druhého pásma dohořivacího vzduchu OFA
- instalace nových práškovodů
- úprava mlýnských okruhů
- vybudování systému recirkulace spalin
- instalace a úpravy příslušné části měření a regulace.

Po realizaci primárních opatření bude dosahováno následujících koncentrací emisí:

	EMISE NO _x (mg/m ³)	SNÍŽENÍ (%)
Výkon kotle 70 - 100 %	max. 300	28,6
Výkon kotle 50 - 70 %	max. 400	11,1

Tab. č. 19: Předpokládané koncentrace emisí NO_x po primárních opatřeních

Pro snížení emisí NO_x v odchozích spalinách na úroveň pod 200 mg/m³ je navrženo ještě sekundární opatření, které spočívá ve vstřikování redukčního činidla (čpavková voda, močovina) do proudu horkých spalin. Po realizaci sekundárního opatření bude dosahováno následujících koncentrací emisí:

	EMISE NO _x	ÚNIK NH ₃	JEDNOTKA
Výkon kotle 50 – 100 %	max. 200	max. 5	mg/m ³

Tab. č. 20: Předpokládané koncentrace emisí NO_x po SNKR

Po provedení denitrifikačních opatření se předpokládá následující spotřeba médií:

PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ EMISÍ NO _x			
medium	spotřeba	počet provozních hodin/rok	roční spotřeba MWh
el. energie	neuveдено		
SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ EMISÍ NO _x – SNKR (45 % ROZTOK MOČOVINY S ADITIVY)			
medium	spotřeba	počet provozních hodin/rok	roční spotřeba t/rok, MWh
močovina	max. 340 kg/h	6 000	2 040
DEMI voda	7580 kg/h	6 000	45 480
tlakový vzduch	1320 kg/h	6 000	7 920
el. energie	10 kW	6 000	60

SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ EMISÍ NO _x – SNKR (ČPAVKOVÁ VODA 25 % ROZTOK)			
medium	spotřeba	počet provozních hodin/rok	roční spotřeba t/rok, MWh
čpav. voda	max. 345 kg/h	6 000	2 070
DEMI voda	7580 kg/h	6 000	45 480
tlakový vzduch	1320 kg/h	6 000	7 920
el. energie	7 kW	6 000	42

Tab. č. 21: Přehled spotřeb médií po denitrifikačních opatřeních

Realizací SNKR dojde k navýšení provozních nákladů o cenu nově spotřebovávaných médií (ČEZ, 2012):

MÉDIUM	ROČNÍ SPOTŘEBA (t/rok, MWh/rok)	JEDNOTKOVÁ CENA (Kč)	CENA CELKEM (tis. Kč)
Elektrická energie	60	2 000	120
Tlakový vzduch	7 920	300	2376
DEMI voda	45 480	75	3 411
45% roztok močoviny s aditivy	2 040	6 570	13 403
CELKEM			19 310

Tab. č. 22: Navýšení nákladů po SNKR s močovinou

MÉDIUM	ROČNÍ SPOTŘEBA (t/rok, MWh/rok)	JEDNOTKOVÁ CENA (Kč)	CENA CELKEM (tis. Kč)
Elektrická energie	42	2 000	84
Tlakový vzduch	7 920	300	2376
DEMI voda	45 480	75	3 411
25% vodný roztok čpavku	2 070	4 900	10 143
CELKEM			16 014

Tab. č. 23: Navýšení nákladů po SNKR s NH₃

Jednotkové ceny byly převzaty z projektu „Snížení emisí NO_x – kotel K3 EDĚ“, který byl zpracován v roce 2012.

5.1.5.3 Elektrárna Tisová

Elektrárnu Tisovou tvoří (dále jen „ETI“) tvoří dvě výrobní jednotky. Výrobní jednotka Tisová I se skládá ze dvou fluidních kotlů o výkonu 350 t/h páry a čtyř turbín o celkovém výkonu 183,8 MW. Výrobní jednotku Tisová II tvoří granulační kotel K9 o jmenovitém výkonu 330 t/h páry a kondenzační turbína 112 MW. Celkový instalovaný výkon je tedy 295,8 MW. Roční výroba elektřiny se pohybuje okolo 1,6 TWh, dodávka tepla odběratelům okolo 1 500 TJ. Data byla získána ke kotli K9, který je stejného typu jako kotle v EPC a EDE (granulační), akorát o nižším výkonu. Palivem je hnědé uhlí, které má průměrnou výhřevnost 12,05 kJ/kg.

Regulační rozsah kotle je 70 až 100 %. Na kotli byla provedena primární denitrifikační opatření v roce 1997 a další v roce 2009. Sekundární opatření dosud provedena nebyla. Primární opatření v roce 1997 spočívala ve snížení součinitele přebytku vzduchu v ohništi, v přerozdělení prášku a spalovacího vzduchu po výšce hořáků (k tomu byla zvětšena výška práškových hořáků) a pásmování vzduchu po spalovací dráze (byl instalován přívod terciárního a dohořivacího vzduchu do ohniště). Cílem bylo snížení emisí NO_x pod úroveň 400 mg/m^3 . Skutečně dosahované emise činily v roce 2008 cca 370,8 mg/m^3 .

V rámci primárních opatření v roce 2009 byla provedena instalace zařízení recirkulace spalin. Doplňující úpravou je použití horkého vzduchu místo studeného pro plynové stabilizační hořáky. Cílem bylo snížení emisí NO_x pod úroveň 300 mg/m^3 . Skutečně dosažené emise činily v letech 2010-2015 cca 308,2 mg/m^3 . Stanoveného cíle se tedy nepodařilo dosáhnout (ČEZ, 2016).

V následující tabulce jsou uvedeny dosahované hodnoty:

UKAZATEL	PO R. 1997	PO R. 2009	SNÍŽENÍ (%)
Koncentrace emisí NO_x (mg/m^3)	370,8	308,2	17,0
Množství vypouštěných emisí NO_x (t/r)	96,8	62,7	35,2
Výroba energie (GJ)	601396,8	505352,3	-
Emise NO_x /GJ (kg/GJ)	0,161	0,124	23,0

Tab. č. 24: Dosahované hodnoty v ETI – K9

Podle informace technického ředitele ETI Ing. Frimla bude nutné i v ETI realizovat sekundární denitrifikační opatření, a to jak na kotli K9, tak i na fluidních kotlích, protože splnění emisního limitu 200 mg/m^3 není bez těchto opatření možné. Podle předpokládaného vývoje emisí NO_x v ETI budou v roce 2020 sníženy hodnoty emisí ze současných 320 mg/m^3 na 180 mg/m^3 .

5.1.5.4 Teplárna Strakonice

Teplárna Strakonice (dále jen „TST“) je vybavena následujícími parními kotli:

OZNAČENÍ	VÝKON (t/h)	OHNIŠTĚ	ÚČINNOST (%)	PALIVO
K1	36	fluidní	74,6	Hnědé uhlí + biomasa
K2	36	fluidní	91,0	Hnědé uhlí + biomasa
K3	75	granulační	87,5	Hnědé uhlí
K4	80		85,5	Topný olej
K5	69		87,4	Topný olej

Tab. č. 25: Typy kotlů v TST

Zdroj: TST, 2015

Celkový tepelný příkon činí 242 MW, instalovány jsou i dva turbogenerátory o celkovém výkonu 30 MW, které dodávají elektrickou energii pro vlastní potřebu i do energetické sítě.

Vývoj emisí NO_x v letech 2010 až 2014 dokumentuje následující tabulka:

NO _x	R. 2010	R. 2011	R. 2012	R. 2013	R. 2014
KONCENTRACE (mg/m ³)	433	438	479	469	424
EMISE (t)	358	331	332	345	264

Tab. č. 26: Vývoj emisí NO_x v TST

Zdroj: TST, 2015

V porovnání s devadesátými lety 20. století poklesl úlet emisí NO_x o cca 30 %.

Výroba energií v roce 2014 byla následující:

	K1, K2, K3	K4, K5	CELKEM
TEPLO (GJ)	1 488 065	14 731	1 502 796
EL. ENERGIE (MWh)			73 298

Tab. č. 27: Výroba energií v r. 2014

Zdroj: TST, 2015

Podíl olejových kotlů K4 a K5 na celkové výrobě tepla činil v roce 2014 cca 1 %, tedy celkem zanedbatelný podíl. Z toho lze vycházet i při posuzování produkovaných emisí NO_x, protože u těchto emisí se nepodařilo dohledat rozdělení podle kotlů.

Spotřeba paliva a energie v palivu v roce 2014 byla následující:

	UHLÍ	BIOMASA	MAZUT	OLEJ
SPOTŘEBA PALIVA (t)	108 538	353	799	34
SPOTŘEBA ENERGIE V PALIVU (GJ)	1 685 002	4 095	32 445	1 437

Tab. č. 28: Spotřeba paliva a energie v palivu v r. 2014

Zdroj: TST, 2015

Celková spotřeba energie v palivu v roce 2014 činila 1 722 979 GJ (TST, 2015).

5.2 Praktická část

V praktické části bakalářské práce je provedeno vyhodnocení informací získaných v teoretické části.

Informace o procesech vzniku NO_x v teoretické části je důležitá pro pochopení známých metod jejich snižování. Nalezené metody snižování emisí NO_x i jejich účinnosti jsou ve výsledcích přehledně uspořádány. U primárních metod je uvedena

účinnost souhrnně pro úpravy přívodu vzduchu i paliva, protože tyto metody jsou aplikovány současně.

Ze statistických údajů byly sestaveny přehledy o vývoji emisí NO_x v ČR a v EU za roky 2007-2013 i o podílu jednotlivých sektorů na produkci emisí NO_x. Zmíněny jsou základní mezinárodní úmluvy na ochranu ovzduší a klimatu země, i předpisy EU a ČR na poli ochrany ovzduší. V teoretické části jsou podrobně vypsány škodlivé účinky jednotlivých oxidů dusíku v ovzduší i na člověka. Ve výsledcích už je tedy proveden jenom jejich stručný souhrn.

Vyhodnocení z hlediska vstupů materiálu pro denitrifikaci a výstupu zbytků po denitrifikaci bylo provedeno u metody SNKR, ke které byla zajištěna data z projektů denitrifikačních opatření v EPC a v EDE.

6. VÝSLEDKY

6.1 Dusík a oxidy dusíku

Na základě zjištění v teoretické části bakalářské práce není pochyb o tom, že oxidy dusíku včetně oxidu dusného (N₂O) mají negativní vliv na životní prostředí a to i přesto, že samotný dusík není toxický ani jinak nebezpečný. Škodlivost se projevuje:

- v přímém působení na
 - člověka - toxicita, dráždění očí a horních cest dýchacích, při vyšších koncentracích poleptání sliznic,
 - přírodu - kyselé deště, eutrofizace, náchylnost rostlin k plísním, nižší odolnost proti chladu a mrazu,
 - atmosféru Země - podíl na tvorbě přízemního ozonu,
- v působení jako prekurzorů jiných znečišťujících látek
 - ozonu - dráždí dýchací ústrojí, stahuje dýchací cesty, poškozují ochranné komponenty oka a tělové bílkoviny, napadá nejperifernější rozvětvení plicních cév (snižuje se odolnost vůči infekci), způsobuje nedokysličování organismu, u vegetace narušuje procesy dýchání a fotosyntézy (snížení výnosů zemědělských plodin, poškození lesů), podílí se na skleníkovém efektu 3–7 %,
 - částic PM - částice se usazují v dýchacích cestách člověka i ostatních živých organismů,
 - okyselujících látek - vytváří kyselé deště, které snižují hladinu pH půdy i vody, čímž dochází k poškozování rostlin a života zvířat na souši i ve vodě a tím i k poklesu biodiverzity.

Protože oxidy dusíku působí na atmosféru, není řešení problému s jejich snižováním pouze záležitostí každého jednoho státu, ale je to záležitostí mezinárodní.

6.1.1 Statistické údaje

V následující tabulce jsou shrnuty emise NO_x v EU – zapracovány byly hodnoty emisí z r. 2004 a r. 2013, které jednoznačně dokumentují snížení emisí ve všech zemích EU. Ve všech zemích EU také došlo ke snížení emisí NO_x na jednoho obyvatele s výjimkou Litvy, u níž došlo k navýšení o 10,31 %. Navýšení však bylo způsobeno výrazným poklesem počtu obyvatel (o cca 21 %), neboť celkové emise NO_x klesly o cca 12 %. Hodnoty pro ČR jsou zvýrazněny.

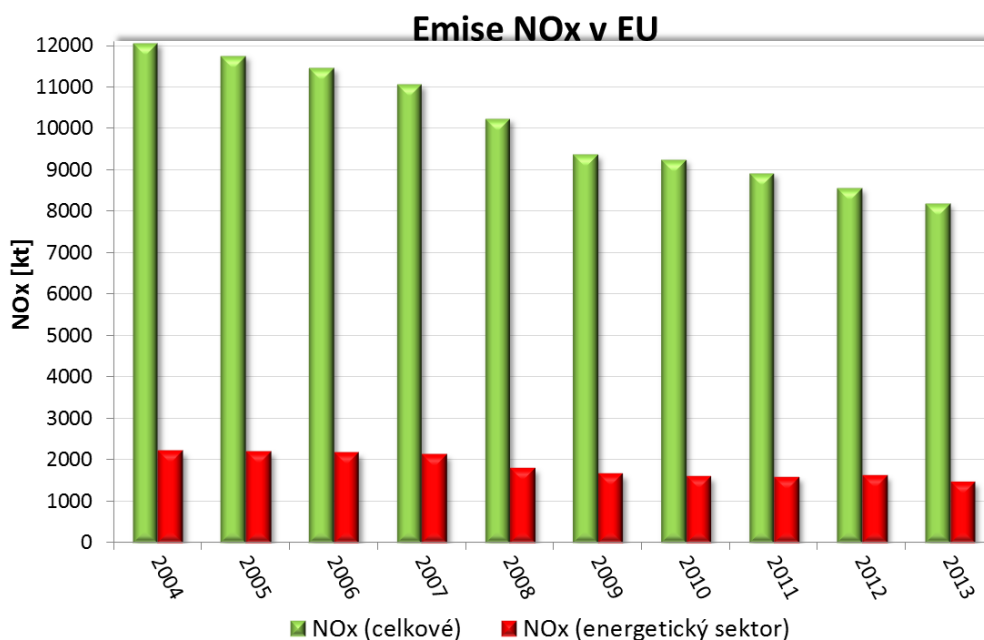
STÁT	ROK 2004			ROK 2013			SNIŽENÍ NO _x /ob.
	obyvatel (tis.)	Nox (kt)	NOx (kg/obyv.)	obyvatel (tis.)	Nox (kt)	NOx (kg/obyv.)	%
Belgie	10 379	297,88	28,70	11 204	207,68	18,54	35,41
Bulharsko	7 518	169,88	22,60	7 246	122,57	16,92	25,14
ČR	10 221	332,21	32,50	10 512	181,09	17,23	47,00
Chorvatsko	4 495	83,04	18,47	4 247	55,75	13,13	28,94
Dánsko	5 451	209,82	38,49	5 627	123,87	22,01	42,81
Estonsko	1 342	38,94	29,02	1 316	29,72	22,58	22,18
Finsko	5 231	194,72	37,22	5 451	144,88	26,58	28,60
Francie	60 424	1472,25	24,37	65 857	989,52	15,03	38,33
Irsko	3 970	134,08	33,77	4 604	79,06	17,17	49,15
Itálie	58 057	1305,37	22,48	60 783	820,57	13,50	39,96
Kypr	776	21,52	27,74	858	16,16	18,83	32,09
Litva	3 704	52,68	14,22	2 943	46,17	15,69	-10,31
Lotyšsko	2 306	45,90	19,91	2 001	34,04	17,01	14,54
Lucembursko	463	56,25	121,49	550	31,43	57,15	52,96
Maďarsko	9 981	204,10	20,45	9 879	120,57	12,20	40,32
Malta	400	9,70	24,25	425	4,87	11,46	52,75
Německo	82 422	1648,46	20,00	80 780	1269,18	15,71	21,44
Nizozemsko	16 318	353,71	21,68	16 829	239,62	14,24	34,31
Polsko	38 537	854,64	22,18	38 496	798,23	20,74	6,50
Portugalsko	10 524	248,92	23,65	10 427	161,48	15,49	34,52
Rakousko	8 193	233,11	28,45	8 508	162,32	19,08	32,95
Řecko	10 688	398,88	37,32	10 993	238,62	21,71	41,84
Rumunsko	22 304	319,93	14,34	19 943	218,82	10,97	23,51
Slovensko	5 424	99,05	18,26	5 416	79,58	14,69	19,54
Slovinsko	2 010	50,95	25,35	2 061	42,89	20,81	17,90
Španělsko	42 717	1436,94	33,64	46 508	812,15	17,46	48,09

GB	60 271	1607,02	26,66	64 308	1019,67	15,86	40,53
Švédsko	9 017	180,04	19,97	9 645	125,92	13,06	34,61
EU CELKEM							32,00

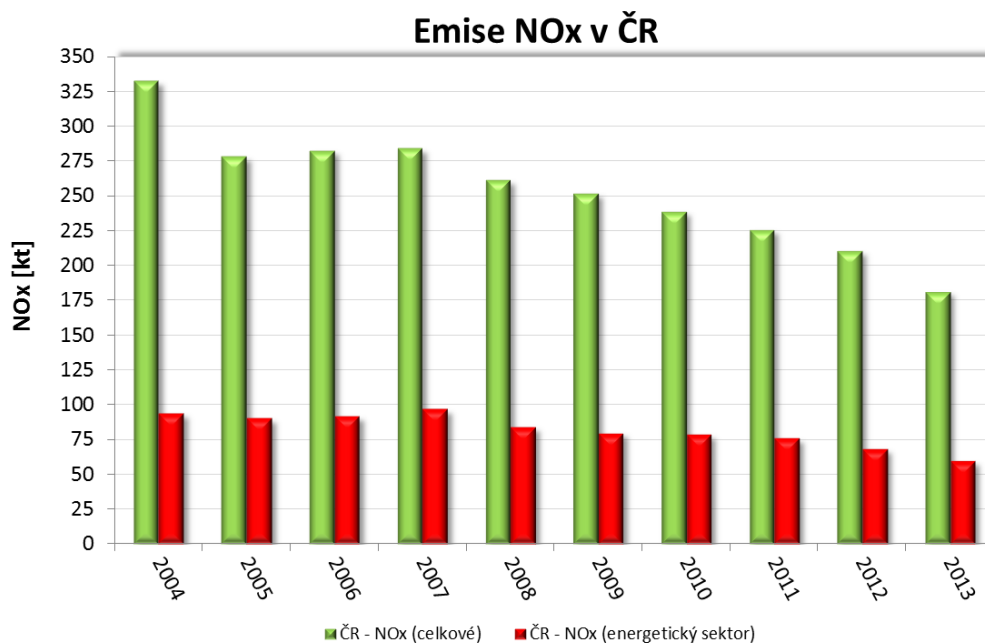
Tab. č. 29: Emise NO_x v EU 28

Z hodnot uvedených v tabulce je vidět že v ČR je kladen velký důraz na snižování emisí NO_x – v přepočtu na obyvatele jsme na 5. místě v EU.

V ČR stejně jako v EU je největším producentem emisí NO_x sektor dopravy. Jeho podíl na emisích tvoří v ČR 39 %, v EU 40 %. Druhým největším znečišťovatelem je sektor veřejné energetiky a výroby tepla, jehož podíl tvoří v ČR 32,8 % a v EU 21 %. V následujících grafech je názorně vidět podíl energetického sektoru na celkovém množství vypouštěných emisí NO_x v EU a v ČR.



Obr. č. 25: Emise NO_x v EU.



Obr. č. 26: Emise NO_x v ČR.

V obou případech je patrné, že k výraznému kontinuálnímu poklesu emisí došlo od r. 2007. Zde je jednoznačně vidět vliv legislativy Evropské unie, která stanovila emisní limity znečištění ovzduší.

6.2 Legislativní rámec

Skutečnost, že omezování emisí znečišťujících látek do ovzduší je mezinárodní záležitostí, je zřejmá z přijímání mezinárodních úmluv na ochranu ovzduší a klimatu země a protokolů k úmluvám. Základními úmluvami jsou:

- Úmluva o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution – CLRTAP),
- Rámcová úmluva OSN o změně klimatu (UN Framework Convention on Climate Change – UNFCCC),
- Vídeňská úmluva na ochranu ozonové vrstvy (Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer).

Také na půdě EU byly přijaty důležité dokumenty - směrnice a nařízení na poli ochrany ovzduší, které jsou pro členy EU (a tedy i pro ČR) závazné. Z hlediska omezování emisí NO_x z velkých stacionárních spalovacích zdrojů (výkon nad 50 MW) je v současné době nejvýznamnější Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010, která stanovuje pro stacionární zdroje znečištění o výkonu nad 100 MW emisní limit 200 mg/m₃ (pro zdroje o výkonu do 100 MW 300 mg/m₃). Směrnice byla implementována do právního řádu

ČR ve vyhlášce č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.

Základním předpisem české legislativy na poli ochrany ovzduší je zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů.

6.3 Metody snižování emisí NO_x

Rozlišujeme dvě základní skupiny metod:

- primární, které spočívají v úpravě stávajících kotlů – úpravy vstřikování paliva a vzduchu, úpravy toku spalin, výměna hořáků, optimalizace pracovního procesu,
- sekundární, které spočívají v odstraňování emisí NO_x ze spalin vzniklých spalováním paliva.

Nalezené denitrifikační metody jsou uvedeny v následující tabulce::

PRIMÁRNÍ METODY			
Spalování s nízkým přebytkem vzduchu			
Odstupňování (postupné dávkování) vzduchu	Diagonální hořáky		
	Hořáky mimo provoz		
	Přehřátý vzduch		
Odstupňování (postupné dávkování) paliva			
Recirkulace spalin			
Nízkoemisní hořáky	s odstupňovaným vzduchem		
	s recirkulací spalin		
	s dávkováním paliva		
	fluidní spalování	stacionární fluidní lože	
		tlakové fluidní lože	
	s cirkulující fluidní vrstvou		
Optimalizace spalovacího prostoru			
SEKUNDÁRNÍ METODY			
Suché metody	Selektivní nekatalytická redukce (SNKR)		
	Selektivní katalytická redukce (SKR)	vysokoteplotní	před odprášením spalin

			po odprášení spalin
		nízkoteplotní	
	Redukce NO _x na aktivním koksu		
	Radiační metoda		
Mokré metody			
	Proces SHL (Saarberg-Holter-Lurgi)		
	Kombinovaný způsob Walther		
	Proces SNO _x (Haldar-Topsöe)		
	Proces DESONOX		
	Proces SHELL		
	Proces Bergbau-Forschung-Uhde		
	Proces Walter		

Tab. č. 30: Metody snižování emisí NO_x

Většina denitrifikačních metod má jako vedlejší přínos také snížení dalších emisí vznikajících při spalování uhlí – oxidů uhlíku a oxidů síry.

Mezi investičně méně nákladné metody patří primární metody. V zásadě se jedná o úpravy stávajících kotlů, tedy nejsou zvýšeny provozní náklady o další materiály, které by vstupovaly do procesu. Jak je patrné z dat EPC, může dojít k navýšení vlastní spotřeby elektrické energie (nové měření a regulace, nové vstřikování paliva a vzduchu). Účinnosti základních primárních opatření jsou uvedeny v tabulce:

PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ	ÚČINNOST OPATŘENÍ (%)
odstupňování vzduchu	≤ 30
recirkulace spalin	≤ 50
nízkoemisní hořáky	≥ 50
hořáky na supernízký obsah NO _x	≥ 65

Tab. č. 31: Účinnost primárních denitrifikačních metod

Jak vyplývá z dat EPC i EDE, v současné době se pro snížení emisí NO_x používá kombinace různých primárních opatření pro maximální snížení NO_x.

U sekundárních metod již jsou pro denitrifikaci použity pomocné materiálové vstupy – činidla, která zvyšují investiční náklady o cenu zařízení pro jejich skladování, dopravu nebo případnou úpravu, a provozní náklady o jejich cenu a také

o cenu za dopravu a likvidaci výstupu po aplikaci sekundárního opatření – selektivní nekatalytické redukci. U katalytických redukcí se přidávají i náklady na pořízení katalyzátoru a jeho údržbu. U SNKR činí investiční náklady cca 20 % nákladů na SKR. Účinnost některých sekundárních opatření je uvedena v tabulce:

SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ	ÚČINNOST OPATŘENÍ (%)
SNKR	50-65
SNKR Bio CONOX – zvýšení podílu přídatného paliva o 10-30 %	další snížení o 15-40
SKR	> 90
Radiační metoda	80
Proces SNO _x (Haldar-Topsøe)	cca 95
SDS (Shell Denox Systém)	> 98

Tab. č. 32: Účinnost sekundárních denitrifikačních metod

Uvedené účinnosti denitrifikačních opatření je možné dosahovat při plném výkonu kotle. Při sníženém výkonu se účinnost může snížit. Výběru vhodného denitrifikačního opatření musí vždy předcházet podrobný rozbor stávajícího stavu a také stanovení cílové hodnoty emisí, které má být dosaženo. Ty se odvíjí zejména od stanoveného národního emisního stropu.

V našich podmínkách pro dodržení emisního stropu pro rok 2010 (650 mg/m³) postačilo ve většině případů realizovat primární opatření. Zejména technologie fluidního spalování byla podle sdělení p. Frimla (ETI) pro dodržení emisí NO_x zcela dostačující. Ovšem pro dodržení národního emisního stropu stanoveného pro rok 2020 již primární opatření nepostačí a bude nutné realizovat některé ze sekundárních opatření, popřípadě bude nutné realizovat výstavbu nového moderního spalovacího zdroje.

6.4 Data od provozovatelů stacionárních zdrojů znečištění

Z rešeršní části bakalářské práce byla do kapitoly výsledky vybrána data s určitou vypovídací hodnotou, popřípadě data porovnatelná s ostatními daty.

Dnem 1.1.2016 vstoupily v platnost emisní limity pro koncentraci NO_x, které byly stanoveny legislativou ČR a EU (viz kapitola 7.2) a pro stacionární zdroje o výkonu nad 100 MW spalující uhlí činí 200 mg/m³. Zajistit uvedený limit je nutné v celém výkonovém rozsahu zařízení, tedy i při nižších výkonech, při kterých, jak vyplývá z dat EPC a EDE, jsou emise NO_x vyšší, než při plném výkonu zařízení.

Pro dodržení limitu je nutné na stávajících zařízeních aplikovat nová denitrifikační opatření, a to v kombinaci primárních i sekundárních. Ze sekundárních opatření postačí aplikace SNKR.

Z dat, které byly poskytnuty společností ČEZ, a.s., je zcela zřejmé, že primární denitrifikační opatření jsou pro splnění limitu nedostatečná:

EMISE	PŘED DENOX	PO DENOX	SNÍŽENÍ	%
ELEKTRÁRNA POČERADY				
Koncentrace NO _x (mg/m ³)	520 - 550	310 - 360	210 - 190	34,6 - 40,4
ELEKTRÁRNA DĚTMAROVICE				
Koncentrace NO _x (mg/m ³)	250 - 500	300 - 400	80 až 100	11,1 - 28,6
ELEKTRÁRNA TISOVÁ				
Koncentrace NO _x (mg/m ³)	370,8	308,2	62,6	17,0

Tab. č. 33.: Účinnost navržených primárních opatření

Ani v jednom z případů nebylo dosaženo nebo se nepředpokládá snížení emisí NO_x pod 300 mg/m³.

Po realizaci sekundárních denitrifikačních opatření se podle projektu „Snížení emisí NO_x - kotel K3 EDĚ“ i projektu „Snížení NO_x ve spalinách na hodnotu 200 mg/m³ kotle K-5“ v EPC předpokládají emise NO_x pod 200 mg/m³:

EMISE	PŘED DENOX	PO DENOX	SNÍŽENÍ	%
ELEKTRÁRNA POČERADY				
Koncentrace NO _x (mg/m ³)	310 - 360	max. 200	až 160	44,5
ELEKTRÁRNA DĚTMAROVICE				
Koncentrace NO _x (mg/m ³)	300 - 400	max. 200	až 200	50,0
ELEKTRÁRNA TISOVÁ				
Koncentrace NO _x (mg/m ³)	Dosud nenavrženo sekundární opatření			

Tab. č. 34.: Účinnost navržených sekundárních opatření

Negativním dopadem realizace SNKR, když nebudeme brát v úvahu investiční náklady, je předpokládané navýšení provozních nákladů o cenu nově spotřebovávaných médií:

MÉDIUM	ROČNÍ SPOTŘEBA (t/rok, MWh/rok)	JEDNOTKOVÁ CENA (Kč)	CENA CELKEM (tis. Kč)
Elektrická energie	60	2 000	120
Tlakový vzduch	7 920	300	2376
DEMI voda	45 480	75	3 411
45% roztok močoviny	2 040	6 570	13 403
CELKEM			19 310

Tab. č. 35: Navýšení nákladů po SNKR s močovinou

MÉDIUM	ROČNÍ SPOTŘEBA (t/rok, MWh/rok)	JEDNOTKOVÁ CENA (Kč)	CENA CELKEM (tis. Kč)
Elektrická energie	42	2 000	84
Tlakový vzduch	7 920	300	2376
DEMI voda	45 480	75	3 411
25% vodný roztok	2 070	4 900	10 143
CELKEM			16 014

Tab. č. 36: Navýšení nákladů po SNKR s NH₃

Jednotkové ceny byly převzaty z projektu „Snížení emisí NO_x – kotel K3 EDĚ“, který byl zpracován v roce 2012.

7. DISKUSE

Na začátku této bakalářské práce byly stanoveny její cíle, které byly z velké části naplněny. Údaje o oxidech uhlíku, jejich vzniku i škodlivých účincích se podařilo celkem přesně identifikovat, a to včetně schémat, která znázorňují chemické reakce oxidů dusíku při spalování uhlí i při denitrifikačních opatřeních. Pro praktickou část bakalářské práce bylo důležité získat reálná data od provozovatelů stacionárních zdrojů znečištění, aby bylo možné porovnání s daty z odborných textů. Zde se ukázalo, že je složité zajistit relevantní data, navíc v potřebné struktuře. Provozovatelé data buď odmítli poskytnout, nebo byla poskytnuta v omezeném rozsahu. Na nové denitrifikační opatření byly zpracovány projekty, takže data o emisích a výpočty účinnosti jsou pouze v teoretické rovině neproověřené v reálném provozu.

Jak je uvedeno výše, negativní dopady oxidů dusíku rozhodně nejsou zanedbatelné. Důležité je zdůraznit globální dopady emisí NO_x (ale samozřejmě i dalších znečišťujících látek), protože aby byla opatření na snížení emisí účinná, musí je přijmout a realizovat maximální počet států. Příkladem může být legislativa týkající se snižování emisí NO_x v rámci EU, zejména Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění), která stanovuje pro velké zdroje spalující uhlí (o výkonu 50 MW a vyšším) velmi přísné limity pro koncentraci NO_x ve spalínách – pro zdroje o výkonu 100-300 MW činí 200 mg/m³. Oproti emisnímu limitu platnému do 31.12.2015, který byl 650 mg/m³, to znamená snížení o téměř 70 %. Ne všichni provozovatelé u svých zařízení zajistili splnění stanoveného limitu k 1.1.2016. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU však umožňuje členským státům pro období od 1. ledna 2016 do 30. června 2020 vypracovat a provádět pro tato zařízení přechodný národní plán. Podmínkou je, že spalovacím

zařizování bylo vydáno první povolení před 27. listopadem 2002 a byla uvedena do provozu nejpozději 27. listopadu 2003.

Také pro střední zdroje znečištění byl na půdě EU vydán předpis omezující emise NO_x - Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2015/2193 ze dne 25. listopadu 2015 o omezení emisí některých znečišťujících látek do ovzduší ze středních spalovacích zdrojů (1-50 MW). Pro tyto zdroje byl stanoven limit 650 mg/m³.

Ve světovém měřítku je snaha o ochranu ovzduší i celého klimatu země zcela zřejmá z přijatých mezinárodních úmluv - Úmluvy o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států z roku 1979 (CLRTAP), Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu z roku 1992 (UNFCCC), nebo Vídeňské úmluvy na ochranu ozonové vrstvy z roku 1985, které jsou následně rozpracovávány postupně přijímanými protokoly.

Informace o emisích NO_x v ČR za předcházející roky byly čerpány jak ze statistických dat ČR, které zpracoval Český hydrometeorologický ústav, tak ze statistických dat EU zpracovaných Evropskou agenturou pro životní prostředí. Z dat je zřejmé, že pocházejí od jednoho poskytovatele, protože se podstatně neliší. Ze získaných dat je možné vyčíst výrazný pokles emisí NO_x v EU i v ČR, a to jak celkových emisí, tak emisí ve veřejném energetickém sektoru. Pro porovnání byl proveden přepočítání NO_x na obyvatele – v ČR poklesly emise o 47 %, v EU o 32 %. Zde se evidentně promítá vliv evropské legislativy, která je implementovaná do národních předpisů.

Důležitým cílem práce bylo nalezení metod, které se používají ke snižování emisí NO_x. Metod je velké množství. Otázkou je jejich uplatnění v provozu uhelných elektráren a tepláren, tedy ve velkých provozech. V přehledu jsou uvedeny také alternativní metody, které se zatím zkoušejí spíše u malých spalovacích zařízeních.

Běžné je používání primárních metod spočívajících v postupném dávkování vzduchu a paliva do spalovacího prostoru, v recirkulaci spalin i ve výměně hořáků za moderní nízkoemisní. Ani monitorování a elektronické řízení spalovacího procesu již není výjimkou. To potvrzují údaje získané ze společnosti ČEZ, a.s., která v roce 2012 připravovala denitrifikační opatření ve svých elektrárnách EPC a EDE. Ne všechny primární metody je možné použít u starších zařízení. Například, jak uvádí Kolat (2008), instalace nízkoemisních hořáků s postupným dávkováním paliva nebo technologie odstupňování paliva vyžaduje větší prostor, kterého u starších kotlů není tolik, proto tato opatření nejsou pro ně vhodná.

V žádném odborném článku nebo publikaci nebyla mezi primárními opatřeními zmíněna úprava – modernizace mlecích okruhů. Nejedná se sice u úpravu přímo na kotli, ale přímo souvisí se spalovacím procesem, a jak je uvedeno v projektech denitrifikačních opatření v EPC a EDE, je to velice účinné opatření, které předchází vzniku NO_x . Podle mého názoru lze úpravu mlecích okruhů mezi primární opatření zařadit.

V odborných člancích a publikacích autoři uvádějí účinnost jednotlivých primárních metod mezi 30-50 %. V EPC i v EDE byla v 90. letech minulého století realizována denitrifikační opatření. V projektu denitrifikace pro EPC je počítáno s účinností navržených primárních opatření 42 % a to i přesto, že má být provedena kombinace několika primárních opatření. V EDE byla koncentrace emisí NO_x před provedením primárních opatření v 90. letech minulého století 950-1200 mg/m^3 . Po jejich realizaci klesly emise NO_x na 250-500 mg/m^3 , tedy o 58-74 %. V projektu denitrifikace je však již počítáno s účinností nově navržených primárních opatření max. 29 %. Z uvedených hodnot vyplývá, že uváděné účinnosti primárních metod v odborných textech se vztahují ke zdrojům bez provedených denitrifikačních opatření.

Ze sekundárních metod je u nás, podle informace technického ředitele ETI Ing. Frimla, nejčastěji používaná jedna ze suchých metod - selektivní nekatalytická redukce, kde je jako reakční činidlo použita čpavková voda nebo roztok močoviny s aditivou. Stejná metoda je navržena i v EPC a EDE. Hlavním důvodem je podle mého názoru výše investičních nákladů, která je nižší v porovnání se selektivní katalytickou redukcí (náklady činí podle VŠB (2011) cca 20 % nákladů na SKR) nebo s mokřými metodami, a také provozní náklady jsou nižší. Navíc zde nevzniká odpad po denitrifikaci jako u mokřích metod, a tedy není nutné řešit manipulaci s ním a jeho likvidaci, což také nepříznivě ovlivňuje provozní náklady. Mezi používané suché metody patří také fluidní spalování, které patří mezi nejúčinnější primární metody, ale podle Ing. Frimla (ETI) ani při použití této technologie není možné dodržet emisní limit 200 mg/m^3 .

Mokrý metody nejsou podle Vejvody (2003) v současné době příliš používány nebo se používají v kombinaci s odsiřovací metodou. Důvodem je zejména finanční stránka metody, kdy se do provozních nákladů promítá cena vstupů materiálu pro denitrifikaci a výstupu zbytků po denitrifikaci i cena za likvidaci odpadu po denitrifikaci na skládku.

V rámci rešeršní části se nepodařilo vyhledat ceny ani množství vstupních materiálů popřípadě potřebných energií (mimo dat z EDE) ani ceny za uložení odpadů, a tak nebylo možné vyhodnotit jednotlivé metody z hlediska vstupů materiálu pro denitrifikaci a výstupu zbytků po denitrifikaci.

Z nalezených denitrifikačních technologií je zřejmé, že technické řešení denitrifikace není v současné době problémem. Důležitým krokem však bude volba optimální technologie z hlediska ekonomického a požadavku na splnění emisních limitů platných v současnosti i dalšího možného snížení do budoucnosti.

8. ZÁVĚR

Tématem této bakalářské práce byly oxidy dusíku, jejich vznik, vlastnosti i metody, které slouží ke snížení jejich emisí při spalování uhlí v uhelných stacionárních zařízeních.

Dusík i oxidy dusíku se přirozeně vyskytují v ovzduší. O škodlivém vlivu NO_x na člověka, životní prostředí i klima země není po zjištění uvedených v bakalářské práci pochyb. Tento negativní vliv se začal projevovat zejména po zvýšení koncentrace NO_x vlivem antropogenního působení. Jedním ze zdrojů emisí NO_x je také spalování fosilních paliv, zejména hnědého a černého uhlí.

O nutnosti snižování emisí NO_x svědčí uzavření mezinárodních úmluv a protokolů k úmluvám. Také právní předpisy Evropské unie, v které je soustředěno mnoho průmyslově vyspělých zemí, jsou jednoznačným signálem, že negativní vliv emisí NO_x nelze podceňovat. V těchto předpisech (Směrnících a Nařízeních) jsou stanoveny, mimo jiné, také emisní limity pro znečišťující látky včetně NO_x . Předpisy byly následně implementovány do právního řádu členských zemí EU.

Z teoretické části bakalářské práce vyplývá, že metod pro snížení emisí NO_x existuje celá řada, ať metod, kterými se předchází vzniku NO_x (primární metody), tak metod pro odstraňování NO_x ze spalin. Návrhu denitrifikační metody musí vždy předcházet podrobný rozbor stávající technologie spalovacího zařízení i umístění zařízení s ohledem na dostupnost vstupních materiálů, popřípadě možnost využití materiálů po denitrifikaci. V neposlední řadě je nutné brát v úvahu cílové emise NO_x , kterých chceme dosáhnout, a investiční i provozní náklady spojené s navrženou denitrifikační metodou. V této souvislosti nelze vyloučit ani výstavbu nového zařízení, které bude spalovat jiné palivo než uhlí (např. plynové kotle, které produkují menší množství NO_x než kotle uhelné).

Je zřejmé, že investice do denitrifikačních opatření nebude investicí návratnou z hlediska jejího ekonomického hodnocení, přestože řada opatření, zejména primárních, může přispět k vyšší účinnosti kotlů a tím ke zvýšení výroby tepla a elektrické energie. Ale z environmentálního hlediska se bez takových opatření v současné době ani v budoucnu neobejdeme.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Arnika, 2014:** *Nejlepší dostupné techniky*. Praha. Dostupné z:
<http://arnika.org/nejlepsi-techniky>, cit. 14.03.2015.
- BALÁŠ, M., LISÝ, M., MOSKALÍK, J., 2012:** *Kotle – 2. část*. TZB-info, 2012.
Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>, cit. 05.04.2015.
- BALNAR, A., 2008:** *Příčiny a důsledky vlivu člověka na životní prostředí z fyzikálního hlediska*. Vyd. 1. Ostrava: Wichterlovo gymnázium, 2008. 55 s. ISBN 978-80-87058-06-0.
- BUHRE, B.J.P., ELLIOT, L.K., SHENG, C.D., GUPTA, R.P., WALL, T.F., 2005:** *Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation*. Progress in Energy and Combustion Science, 2005/31: Pages 283 307.
- БЕЛИКОВ, С., 2006:** *Комплексная разработка методов снижения выбросов оксидов азота от ТЭС путем оптимизации процесса горения и способов сжигания топлива*. Техносфера, 2006. Dostupné z:
<http://tekhnosfera.com/kompleksnaya-razrabotka-metodov-snizheniya-vybrosov-oksidov-azota-ot-tes-putem-optimizatsii-protsesssa-goreniya-i-sposobov>, cit. 09.03.2015.
- CENIA, 2008:** *Multimediální ročenka životního prostředí*. Praha: CENIA, Česká informační agentura životního prostředí, 2008. Dostupné z:
<http://www.vitejenazemi.cz/vzduch/index.php?article=175>, cit. 22.02.2015.
- CENIA, 2012:** *Metodika sestavování klíčových indikátorů životního prostředí pro oblast klimatu a ovzduší*. Praha: CENIA, Česká informační agentura životního prostředí, 2012. Dostupné z:
http://www1.cenia.cz/www/sites/default/files/klima_ovzdusi.pdf, cit. 21.03.2015.
- CENIA, 2013:** *Multimediální ročenka životního prostředí*. Praha: CENIA, Česká informační agentura životního prostředí, 2013. Dostupné z:
<http://www.vitejenazemi.cz/vzduch/index.php?article=164>, cit. 22.02.2015.
- ČEZ, 2012:** *Snížení emisí NO_x - kotel K3 EDE*. Elektrárna Dětmarovice - podniková data, 2012.
- ČEZ-2, 2012:** *Snížení NO_x ve spalínách na hodnotu 200 mg/m³ kotle K-5*. Elektrárna Počerady - podniková data, 2012.
- ČEZ, 2016:** Elektrárna Tisová - podniková data, 2016.

- ČHMÚ:** *Přízemní (troposférický) ozon*. Český hydrometeorologický ústav.
Dostupné z:
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Přízemni_ozon/text_ozon.htm, cit. 22.02.2015.
- ČHMÚ, 2014:** *Grafická ročenka 2013*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2014. Dostupné z:
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/II_ovzd_CZ.html, cit. 21.03.2015.
- ČHMÚ, 2015:** *Grafická ročenka 2014*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2015. Dostupné z:
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/IV3_NOx_CZ.html, cit. 28.03.2016.
- ČVUT, 2015:** *Denitrifikace, Ochrana ovzduší, ZS 2012/2013* (přednáška). Praha: České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z:
<http://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Prednasky/Prednaska%20Denitrifikace.pdf>, cit. 07.03.2015.
- EEA, 2015:** *Air quality in Europe – 2015 report*. In: EEA Report 5/2015. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. European Environment Agency, 2015. ISBN 978-92-9213-702-1
- EUROPEAN COMMISSION, 2006:** *Integrated Pollution Prevention and Control: Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. In: Seville: Institute for Prospective Technological Studies, 2006.
- GRAUS, W., WORREL, E., 2006:** *Comparison of efficiency fossil power generation*. Utrecht: Ecofys, 2006. Dostupné z:
http://www.ecofys.com/files/files/ecofyscomparison_fossil_power_efficiencyaug2006_02.pdf, cit. 27.03.2016.
- HNILICOVÁ, A., 2008:** *Emise PM₁₀ a jejich zdroje* (přednáška). Český hydrometeorologický ústav, 2008. Dostupné z:
<http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/sd2008-prednaska-hh-emise-pm10-a-jejich-zdroje.pdf>, cit. 06.04.2015.
- HOLOUBEK, I.:** *Technologie na ochranu čistoty ovzduší – odsiřování spalin*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Dostupné z:
http://old.vscht.cz/uchop/velebudice/ovzdusi/entech_4a.pdf, cit. 14.03.2015.

- ИМДОС-М, 2015:** *Токсичные ингредиенты продуктов сгорания органического топлива. Газомазутные горелки, 2015.* Dostupné z:
<http://promgorelki.ru/2013-05-15-08-58-18>, cit. 07.03.2015.
- IPPC, 2016:** *IPCC Fourth Assessment Report, Climate Change 2007 - What is the Greenhouse Effect.* Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Working Group I, France. Dostupné z:
https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html,
cit. 20.03.2016
- ISSAR, 2014:** *Klíčové indikátory životního prostředí České republiky.* CENIA, česká informační agentura životního prostředí. Dostupné z:
<http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=1506>, cit. 21.03.2015 a 09.04.2015.
- JELÍNEK, A., ŠÍSTKOVÁ M., MAŠÁTOVÁ R., 2012:** *Vzdělávací modul Ochrana životního prostředí v oblasti vzduch.* Vyd. 1. Náměšť nad Oslavou: ZERA – Zemědělská a ekologická regionální agentura, 2012, 173 s. ISBN 978-80-86884-59-2.
- KOLAT, P., ROUBÍČEK, V., KOZACZKA, J., 2008:** *Pokročilé energetické technologie* (skripta). Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008.
Dostupné z:
http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/energet_centraly/Ciste_uhelne_technologie_skript_a.pdf, cit. 19.03.2015
- KOVAŘÍKOVÁ, D., 2013:** *Znečišťující látky v ovzduší a jejich škodlivost I – SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁.* Ekologické centrum most pro Krušnohoří, 2013.
Dostupné z: http://www.ecmost.cz/clanky.php?page=znecistujici_latky, cit. 02.04.2016
- KUROPKA, J., 2008:** *Simultaneous desulphurisation and denitrification of flue gases.* Wroclaw: Environment Protection Engineering, 2008/34: Pages 189-195.
- LEE, G., SHON, B., YOO, J., JUNG, J., OH, K:** *The influence of mixing between NH₃ and NO for a De-NO_x reaction in the SNCR proces.* Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2008/14: Pages 457-467.
- MA, Z. a kol., 2016:** *Characteristics of NO_x emission from Chinese coal-fired power plants equipped with new technologies.* Atmospheric Environment, 2016/131: Pages 164-170.

- MOKO – HK, 2011:** *Montáže technologií na snížení emisí ze spalovacích procesů.* Hradec Králové: MOKO – HK s.r.o. Dostupné z: <http://moko-hk.webnode.cz/sluzby/montaze-technologie-na-snizeni-emisi-ze-spalovacich-procesu/>, cit. 21.03.2015.
- MOLDAN, B., 2009:** *Podmaněná planeta.* Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2009, 419 s. ISBN 9788024615806.
- MŽP, 2015:** *Mezinárodní smlouvy v oblasti životního prostředí.* Praha: Ministerstvo životního prostředí. Dostupné z: http://www.mzp.cz/cz/mezinarodni_smlouvy, cit. 19.03.2016
- OBRAS-LOSCERTALES, M., MENDIARA, T., RUFAS, A., DE DIEGO, L. F., GARCÍA-LABIANO, F., GAYÁN, P., ABAD, A., ADÁNEZ, J., 2015:** *NO and N₂O emissions in oxy-fuel combustion of coal in a bubbling fluidized bed combustor.* Fuel, 2015/150: Pages 146-153.
- NIMMO, W., PATSIAS, A.A., HAMPARTSOUMIAN, E., GIBBS, B.M., WILLIAMS, P.T., 2004:** *Simultaneous reduction of NO_x and SO₂ emissions from coal combustion by calcium magnesium acetate.* Fuel, 2004/83: Pages 149-155.
- POSKROBKO, S., KRÓL, D., LACH, J., 2012:** *A primary method for reducing nitrogen oxides in coal combustion through addition of Bio-CONOX.* Fuel Processing Technology, 2012/101: Pages 58 - 63.
- PŘÍBORSKÁ, E., 2013:** *Analýza množství a struktury emisí znečišťujících látek do ovzduší ve státech Evropské unie (diplomová práce).* Olomouc: Univerzita Palackého, 2013. Dostupné z: http://geography.upol.cz/soubory/studium/dp/2013-rg/2013_Priborska.pdf, cit. 05.04.2015.
- RICHTER, M., 2014:** *Technologie ochrany životního prostředí – technologie ochrany ovzduší.* Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2014.
- SBÍRKA ZÁKONŮ ČR, 2016.** Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/>, cit. 19.03.2016.
- SHELL GLOBAL.: Praxair CONOX Technology.** Dostupné z: <http://www.shell.com/content/dam/shell/static/globalsolutions/downloads/products-services/licensed-technologies/fact-sheet-praxair.pdf>, cit. 08.03.2015.
- SKUPINA ČEZ, 1999:** *Tlakový fluidní kotel.* ČEZ, a.s., Plzeň. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/tlak_fluid_kotel.html, cit. 05.04.2015.

- STÁŇA, M., BLEJCHAŘ, T., ČECH, B., MALÝ, R., MATOUŠEK, J., PUMPRLA, O., SZELIGA, Z., 2009:** *Optimalizace primárních a sekundárních metod snižování emisí NO_x pro dosažení limitu 200 mg/m³ (přednáška)*. All for Power, 2009. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/malycech.pdf> cit. 05.04.2015.
- TST, 2015:** *Prohlášení k životnímu prostředí za rok 2014*. Teplárna Strakonice, a.s. Dostupné z: http://www.tst.cz/files/_manager/envi_2014_s_vyjadrenim.pdf, cit. 5.4.2016.
- TURCONI, R., BOLDRIN, A., ASTRUP, T., 2013:** Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies. Overview, comparability and limitations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013/vol. 28: Pages 555-565.
- ULBRICHOVÁ, I., 2014:** *Hospodaření v imisních oblastech – obnova antropogenně poškozených oblastí (skripta)*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra Pěstování lesa, 2014.
- UNECE, 2016:** *Conventions and Protocols*. United Nations, Economic Commission for Europe. Dostupné z: <http://www.unece.org/env/treaties/welcome.html>, cit. 10.03.2016
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Office of Fossil Energy:** *Fluidized bed technology – overview*. Dostupné z: <http://energy.gov/fe/science-innovation/clean-coal-research/advanced-combustion-technologies/fluidized-bed-technology>, cit. 05.04.2015.
- VEJVODA J., MACHAČ, P., BURYAN, P., 2003:** *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. (skripta). Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-7078-517-X
- VŠB, 2011:** *Ochrana ovzduší* (pomocný učební text). Ostrava: Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, 2011. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~lih90/soubory/oo/10-01.pdf>, cit. 19.03.2015.

POUŽITÉ ZKRATKY

ČR – Česká republika

EU - Evropská unie

SNKR – selektivní nekatalytická redukce

SKR – selektivní katalytická redukce

EPC - elektrárna Počeradý

EDE – elektrárna Dětmarovice

ETI - elektrárna Tisová

TST - Teplárna Strakonice

NO - oxid dusnatý

N₂O oxid dusný

NO₂ oxid dusičitý

NO_x – oxidy dusíku

SO₂ – oxid siřičitý

SO₃ – oxid sírový

SO_x – oxidy síry

CO – oxid uhelnatý

CO₂ – oxid uhličitý

PM - polétavý prach (prašný aerosol)

TZL – tuhé znečišťující látky

NH₃ - amoniak

O₃ - ozon

CH₄ - metan

VOC – organická sloučenina

NH₄OH - čpavková voda

(NH₂)₂CO - močovina

DENOX – denitrifikační opatření