

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2017

**JITKA
JENÍKOVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jeníková** Jméno: **Jitka** Osobní číslo: **395161**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh opatření pro snížení emisí NOx kotlů teplárny Otrokovice

Název diplomové práce anglicky:

Design of measures for reduction of NOx emission from Otrokovice CHP plant boilers

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete nejvhodnější opatření pro snížení emisí NOx uhelných kotlů teplárny Otrokovice.

Dílčí cíle:

1. Rešerše opatření pro snížení emisí NOx
2. Popis kotlů TOT a jejich současných provozních ukazatelů
3. Výběr a návrh vhodných opatření pro snížení emisí NOx kotlů TOT
4. Vyhodnocení vlivu navržených opatření na provozní ukazatele teplárny
5. Ekonomické posouzení a výběr nejvhodnějšího řešení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Dlouhý CSc., ústav energetiky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **12.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.06.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Doc. Ing. Tomáše Dlouhého CSc. a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Bc. Jitka Jeníková

Anotační list

- Jméno autora:** Jitka Jeníková
- Název DP:** Návrh opatření pro snížení emisí NO_x kotlů Teplárny Otrokovice
- Anglický název:** Design of measures for reduction of NO_x emissions from Otrokovice CHP plant boilers
- Akademický rok:** 2016/2017
- Ústav/obor:** Ústav energetiky/Energetika
- Vedoucí DP:** doc. Ing. Tomáš Dlouhý CSc.
- Bibliografické údaje:**
- | | |
|----------------|----|
| Počet stran: | 95 |
| Počet obrázků: | 22 |
| Počet tabulek: | 29 |
| Počet grafů: | 15 |
| Počet příloh: | 0 |
- Klíčová slova:** Denitrifikace spalin, primární opatření, sekundární opatření, SCR, SNCR
- Keyword:** Denitrification, primary measures, secondary measures, SCR, SNCR
- Anotace:** Cílem této diplomové práce je vybrat vhodné opatření pro snížení emisí dusíku v Teplárně Otrokovice. Od uvedení přehledu různých typů denitrifikace spalin v energetice pokračuji přes popis teplárny, jejích kotlů a stávajících provozních ukazatelů. Dalším krokem je návrh vhodných opatření pro snížení emisí NO_x, které vyhodnocuji jak z hlediska změny provozních ukazatelů TOT, tak z hlediska ekonomického.
- Abstract:** The aim of this thesis is to present an suitable measure for reduction of nitrogen emissions in the Otrokovice combined heat and power plant. Thesis describes introduction of various types of denitrification of flue gases and then continues to a description of the Otrokovice plant, focused on its boilers and its current operational indicators. Based on this data next part of thesis describes creation design of convenient measures for reduction of NO_x emissions, which are being evaluated from the point of view of changing of operational indicators and economic ones.

Obsah

Čestné prohlášení	1
Anotační list	2
Obsah	3
Přehled použitých zkratk	6
0 Úvod	8
1 Ochrana ovzduší	9
1.1 Základní pojmy	9
1.2 NO _x v ČR	10
2 Denitrifikace spalín	12
2.1 Oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO ₂	13
2.1.1 Vznik oxidů dusíku	13
2.1.2 Typy oxidů dusíku	14
2.2 Primární opatření ke snížení tvorby NO _x	15
2.2.1 Primární opatření pro snížení tvorby palivových NO _x	15
2.3 Sekundární opatření ke snížení tvorby NO _x	17
2.3.1 Selektivní katalytická redukce SCR	17
2.3.2 Selektivní nekatalytická redukce SNCR	22
2.3.2.1 Umbrella SNCR	25
2.3.3 Redukce NO _x na aktivním koksu - polokoksu (Bergbau - Forschung - Uhde)	27
2.3.4 Radiační metoda	28
2.3.5 Kombinovaný způsob Walther	28
2.3.6 Proces SNO _x (Haldar-Topsöe)	28
2.4 Ekonomické aspekty denitrifikace spalín	29
2.5 Shrnutí variant SCR a SNCR	30
3 Použité technologie v ČR a SR	31
3.1 Teplárna Karviná, primární opatření	31
3.2 Košická teplárna, primární a sekundární opatření	34
3.3 Elektrárna Počerady, primární a sekundární opatření	35
3.4 Elektrárna Poříčí, primární opatření	36
3.5 Elektrárna Prunéřov II, primární opatření	39
3.6 Teplárna Strakonice, primární a sekundární opatření	41
3.7 Elektrárna Dětmárovice, primární a sekundární opatření	42
3.8 Shrnutí použitých metod	44
4 Teplárna Otrokovice	45
4.1 Historie Teplárny Otrokovice	45

4.2	Výroba tepla	45
4.3	Výroba elektřiny	46
4.4	Ekologizace	46
4.4.1	Přechodný národní plán – nové emisní limity a stropy	46
4.4.2	Stávající emisní limity a stropy	47
4.5	Stávající provoz Teplárny Otrokovice	48
4.5.1	Stávající technologické schéma provozu	48
4.5.2	Zauhlování	49
4.5.3	Extra lehký topný olej	49
4.5.4	Kotle	49
4.5.5	Odstruskovací zařízení	50
4.5.6	Elektroodlučovače, manipulace s popílkem	51
4.5.7	Odsiřování spalin	51
4.5.8	Tkaninový filtr	52
4.5.9	Komín	52
4.5.10	Emisní monitoring	52
4.6	Použitá primární opatření v Teplárně Otrokovice	53
4.6.1	Recirkulace spalin	53
5	Výběr a návrh vhodných opatření pro snížení emisí NO _x kotlů TOT	55
5.1	Zopakování dvou hlavních sekundárních metod SCR a SNCR	55
5.2	Technické provedení primárních opatření + SNCR	56
5.2.1	Úprava hořáků	57
5.2.2	Systém dohořivacího vzduchu	58
5.2.3	Regulace spalovacího procesu	59
5.2.4	Kombinace SNCR a primárních opatření	59
5.3	Technické provedení SCR High-Dust	60
5.4	Technické provedení SCR Tail-End	62
6	Vliv navržených opatření na provozní ukazatele Teplárny Otrokovice	64
6.1	Primární opatření + SNCR	64
6.1.1	Látkové toky	64
6.1.2	Specifikace provozních médií	65
6.1.3	Zásahy do tlakového celku kotle	66
6.1.4	Možné problémy vzniklé užitím 1° + SNCR	66
6.2	SCR High-Dust	67
6.2.1	Látkové toky	67
6.2.2	Specifikace provozních médií	67
6.2.3	Zásahy do tlakového celku kotle	68

6.2.4	Možné problémy vzniklé užitím 1° + SNCR + SCR	68
6.3	SCR Tail-End.....	69
6.3.1	Látkové toky	69
6.3.2	Specifikace provozních médií.....	69
6.3.3	Zásahy do tlakového celku kotle	70
6.3.4	Možné problémy vzniklé užitím SCR.....	70
6.4	Shrnutí variant	71
7	Ekonomické posouzení a výběr nejvhodnějšího řešení.....	72
7.1	Vstupní údaje	73
7.2	Provozní náklady.....	75
7.3	Katalyzátory	76
7.3.1	Stejně katalyzátory pro High-Dust varianty	78
7.4	Citlivostní analýza.....	80
7.4.1	Změna ceny močoviny	82
7.4.2	Změna ceny elektrické energie	82
7.5	Riziková analýza	83
8	Závěr, výběr vhodné varianty.....	85
8.1	Zhodnocení variant	85
8.1.1	Provozní náklady	85
8.1.2	Technické výhody a nevýhody jednotlivých variant.....	85
8.2	Výběr vhodné varianty.....	87
9	Seznam použité literatury	90
10	Seznam použitých obrázků, grafů a tabulek.....	92
10.1	Obrázky	92
10.2	Tabulky.....	93
10.3	Grafy	94

Přehled použitých zkratek

1°	primární opatření
2°	sekundární opatření
CaO	oxid vápenatý
CFD	Computational Fluid Dynamics (výpočetní model proudění)
CHÚV	chemická úprava vody
CO	oxid uhelnatý
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
deNO _x	denitrifikace
EKO	ekonomizér
ELE	elektrárna
ELTO	extra lehký topný olej
HNO ₂	kyselina dusitá
HNO ₃	kyselina dusičná
(NH ₂) ₂ CO	vodný roztok močoviny
MaR	měření a regulace
MoO ₃	oxid molybdenový
NH ₃	amoniak
NH ₄ OH	čpavek
Nm ³	normální metr kubický plynu při normálních fyzikálních podmínkách
NO	oxid dusnatý
NO ₂	oxid dusičitý
NO _x	oxidy dusíku
OFA	system dohořivacího vzduchu
PNP	Přechodný národní plán
POV	parní ofukovač vzduchu
SCR	selektivní katalytická redukce
SO ₂	oxid siřičitý
SNCR	selektivní nekatalytická redukce
TEP	teplárna
TiO ₂	oxid titaničitý
TOC	total organic carbon (celkový organický uhlík)
TOT	Teplárna Otrokovice
TZL	tuhé znečišťující látky
V ₂ O ₅	pentaoxid vanadičný

VOC	volatile organic compound (těkavé organické látky)
WO ₃	oxid wolframový
ZEL	závazné emisní limity [mg/m ³]
ZES	závazné emisní stropy [t/rok]

0 Úvod

Ochrana životního prostředí je v současné době pojem, který slyšíme ze všech médií. Součástí toho je pak i ochrana ovzduší, která se dá rozdělit na dvě hlavní složky. Ve vyspělé společnosti je neustálý tlak na snižování emisí ze spalovacích motorů a dochází k velkému rozvoji elektromobility. Další důraz je kladen na omezení výroby elektrické energie a tepla ze spalování fosilních paliv. A když má Česká republika nevhodnou geografickou polohou dány horší podmínky pro rozvoj obnovitelných zdrojů energie, je u stávajících zdrojů na fosilní paliva nutné snížit emise škodlivých látek.

V této práci se zabývám jedněmi z nejškodlivějších látek, kterými jsou oxidy dusíku. Zejména pak jde o oxid dusnatý, který velkou měrou přispívá k oslabování ozónové vrstvy, je toxický pro živé organismy a také způsobuje kyselou dešť a městský smog.

Problematika snižování emisí oxidů dusíku je velmi obsáhlá a mým úkolem je zde předvést a porovnat jednotlivé metody snižování NO_x, aplikovat je na Teplárnu Otrokovice a vybrat nejvhodnější řešení pro zadané provozní parametry.

1 Ochrana ovzduší

Ochrana ovzduší dnes patří k základním cílům ochrany životního prostředí. Česká republika se bohužel řadí k nejméně znečištěným oblastem Evropy, a to i přes to, že v posledních letech došlo k výraznému zlepšení kvality ovzduší. Je to dáno vysokou energetickou náročností české ekonomiky, a dále velkým podílem spalování hnědého uhlí s vysokým obsahem síry při výrobě tepla a elektrické energie.

1.1 Základní pojmy

V problematice znečišťování ovzduší rozlišujeme tyto základní pojmy [2]:

Znečišťování ovzduší

Tento pojem označuje činnost nebo děj. Jedná se o vypouštění znečišťujících látek, neboli emisí, do atmosféry. Mírou znečišťování ovzduší je množství emisí.

Znečištění ovzduší

Znečištění označuje stav. Znamená přítomnost znečišťujících látek v ovzduší, které nazýváme imise, v míře a době trvání takové, že se projevuje jejich nepříznivý vliv na životní prostředí. Mírou znečištění je množství imisí jednotlivých látek v daném místě nebo oblasti v přízemní vrstvě atmosféry.

Emisní limit

Tento pojem označuje nejvyšší přípustné množství znečišťující látky nebo skupiny látek, vypouštěné do ovzduší ze zdroje znečišťování. Vyjadřuje se nejčastěji ve formě hmotnostní koncentrace znečišťující látky, a to v mg/m³. Na emisích je založena kontrola zdrojů a na imisích pak preventivní ochrana prostředí.

Emisní strop

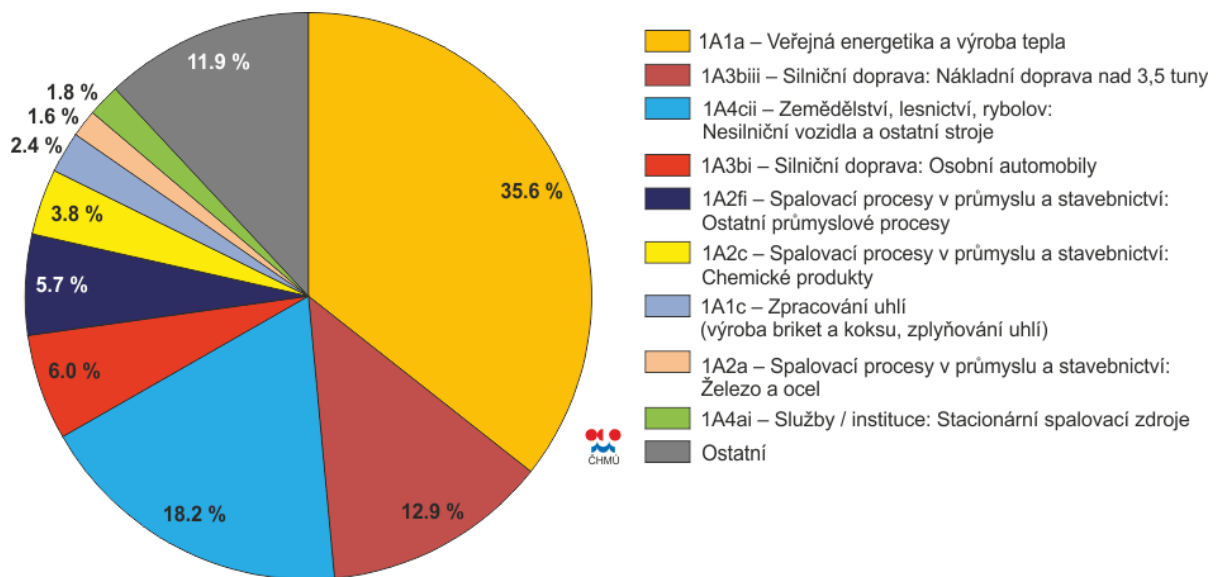
Emisní stropy mohou být zákonem stanoveny pro vybrané znečišťující látky nebo skupiny látek pro vybraná území, pro skupiny nebo jednotlivé stacionární zdroje a lhůty pro jejich dosažení podle národního programu snižování emisí znečišťujících látek za účelem dosažení přípustné úrovně znečištění. Toto nařízení se týká SO₂, NO_x, VOC (těkavé organické látky) a NH₃.

Znečišťující látky

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší stanovuje dle paragrafu 2 znečišťující látky jako: *každou látku, která svou přítomností v ovzduší má nebo může mít škodlivé účinky na lidské zdraví nebo životní prostředí anebo obtěžuje zápachem.*

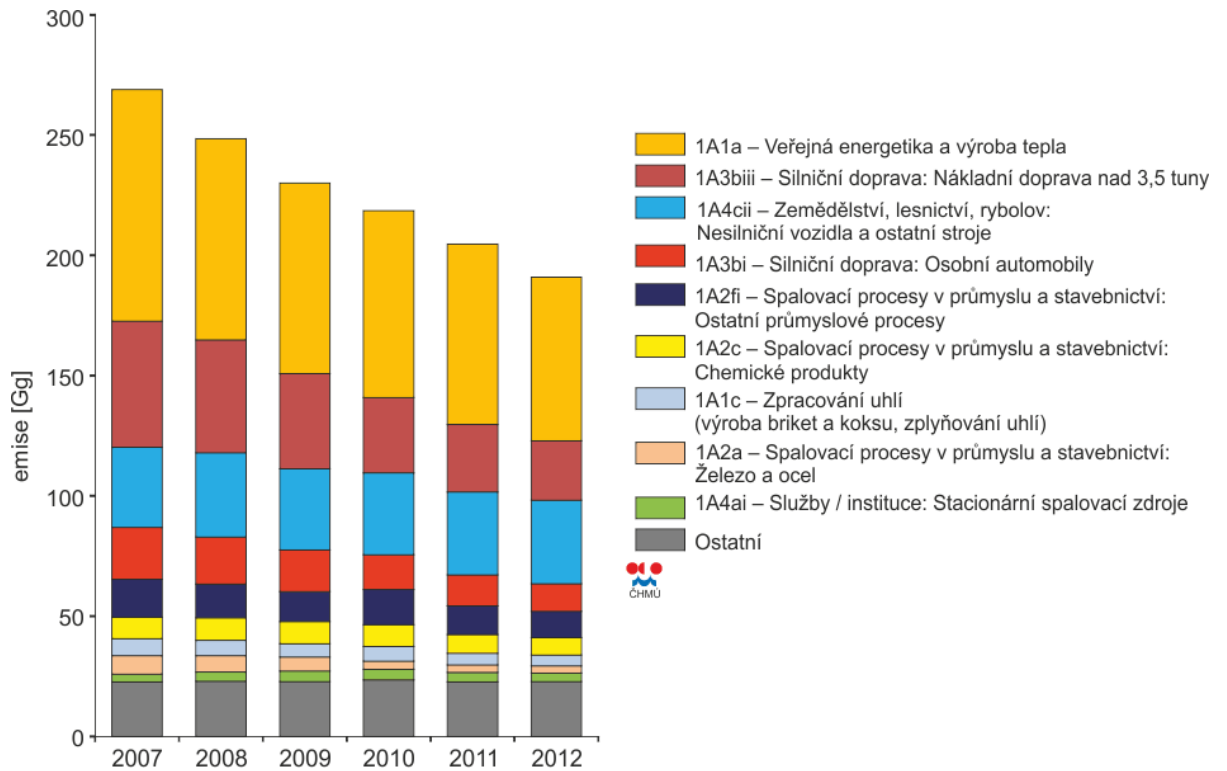
1.2 NO_x v ČR

V problematice ochrany ovzduší se v případě oxidů dusíku bavíme zejména o oxidu dusnatém NO a oxidu dusičitém NO₂. Na emisích NO_x se podílejí zdroje stacionární - teplárny, elektrárny, domácí topeniště a jiné, a zdroje mobilní - motory dopravních prostředků. Rozložení tvorby emisí NO_x je pak pro každý stát odlišné. V České republice vzniká dle ČHMI největší množství NO_x v dopravě. Mobilní zdroje se v roce 2012 podíleli 37,1 % na tvorbě emisí NO_x. V sektoru veřejné energetiky a výroby tepla bylo do ovzduší vneseno 35,6 % emisí NO_x. [1]



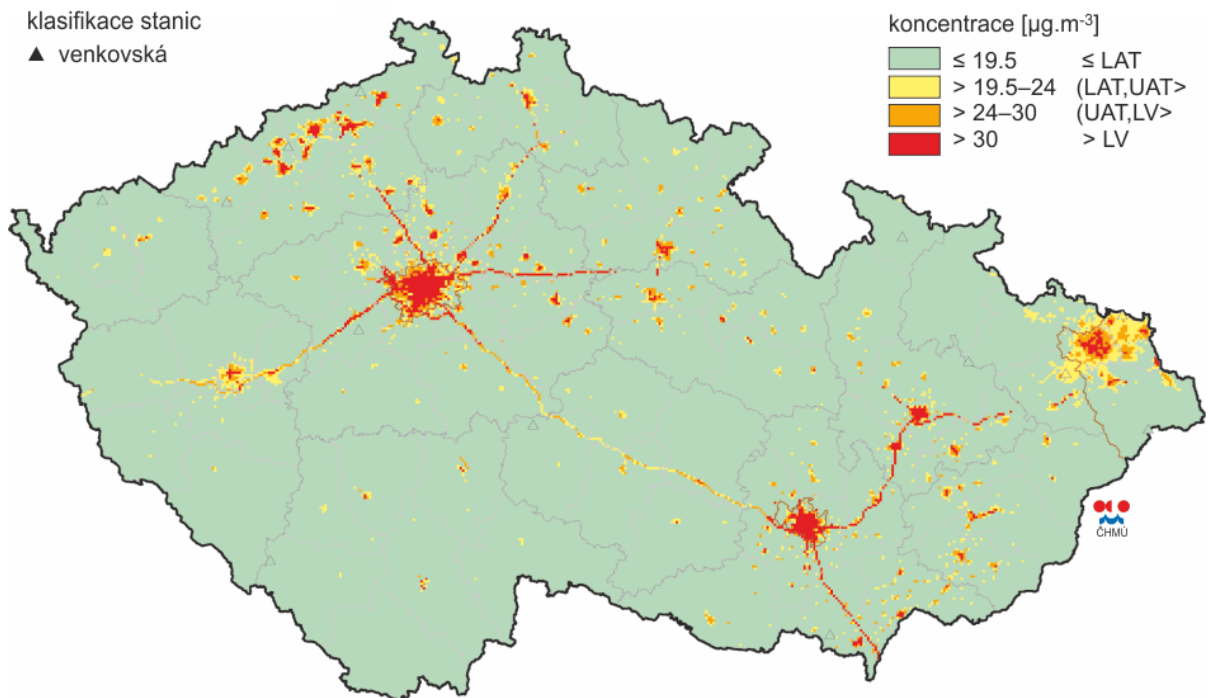
Obrázek 1 - Podíl sektorů na emisích dusíku v roce 2012
Zdroj [1]

Dobrou zprávou je klesající trend emisí NO_x v posledních letech. Tento trend souvisí zejména s obnovou vozového parku a zavedením emisních stropů pro emise NO_x ze zdrojů v sektoru veřejné energetiky a výroby. Přehled o stavu emisí v letech 2007 - 2012 ukazuje následující obrázek 2. [1]



Obrázek 2 – Vývoj emisí NO_x v období 2007 - 2012
Zdroj [1]

Produkce emisí dusíku, jak ukazuje obrázek 3, je především podél dálnic, ve velkých městech a v krajích (zejména Ústecký, Středočeský, Moravskoslezský), ve kterých jsou významné energetické zdroje.



Obrázek 3 – Pole roční průměrné koncentrace oxidů dusíku v roce 2013
Zdroj [1]

2 Denitrifikace spalin

Problematika oxidů dusíku patří mezi hlavní problémy ochrany ovzduší. Zatímco emise oxidů síry jsou již dlouhodobě velmi přísně sledovány a technická řešení jejich omezování jsou na vysokém stupni, emise oxidů dusíku byly dlouhou dobu stranou. Teprve s odhalením jejich škodlivosti došlo k výzkumu jejich tvorby a stejně tak i možností jejich omezování.

Národní program snižování emisí České republiky stanovuje, že je potřeba snížit emise oxidů dusíku do roku 2016 u všech nových spalovacích zařízení, na dosažení emisního stropu 200 mg/m³. U stávajících zařízení to znamená řadu úprav spalovacího procesu a rekonstrukcí.

Dvě základní formy dusíku - NO (oxid dusnatý) a NO₂ (oxid dusičitý) vznikají při spalování fosilních paliv oxidací dusíku chemicky vázaného v palivu a molekulárního dusíku obsaženého ve vzduchu. Imisní limit pro ochranu zdraví lidí je stanoven pro NO₂, limit pro ochranu ekosystémů a vegetace je stanoven pro NO_x. U kotlů větších výkonů jsou oxidy dusíky v poměru cca 95 % NO a 5 % NO₂. Oproti tomu u některých chemicko-technologických procesů (výroba kyseliny dusičné, amoniaku, hnojiv,...) může podíl NO₂ představovat až 100 % emisí NO_x. Oxid dusičitý NO₂, se v imisích a emisích vyskytuje jen zřídka. Je znám jako „rajský plyn“ a vzniká při spalování za nízkých spalovacích teplot u fluidních kotlů.

Denitrifikace je obecný pojem pro omezování emisí NO_x. Rozeznáváme zde primární a sekundární opatření. Primární opatření jsou ta, která u spalovacích zdrojů vedou k omezení emisí NO_x tím, že omezují jejich samotný vznik. Sekundární jsou následná opatření, která vedou ke snížení již vzniklých NO_x.

Při denitrifikaci spalin (ale i desulfurizaci) se setkáváme s následujícími problémy:

- problémy s účinností
- vysoké nároky na korozní odolnost všech komponent
- vysoké pořizovací a provozní náklady
- ekonomicky ztrátová technologie (zvýšení ceny energie). [4]

2.1 Oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO₂

2.1.1 Vznik oxidů dusíku [2]

Oxidy dusíku vznikají při spalování paliv, při výrobě kyseliny dusičné a při jiných chemických procesech. Obecně můžeme říci, že se tvoří v průmyslu všude tam, kde je potřeba vysokých teplot.

Při spalování paliv se ve stacionárních zařízeních tvoří především NO. Podíl NO₂ bývá při spalování tuhých paliv 1 - 5 %. Při ochlazení spalin se NO rychle oxiduje na NO₂ a s vodní parou reaguje na kyselinu dusičnou HNO₃ a kyselinu dusitou HNO₂. Tyto dvě kyseliny jsou přítomny v kyselých deštích. Působením slunečního záření tvoří takzvaný fotochemický smog.

Oxidy dusíku se při spalování v zásadě tvoří třemi způsoby:

- oxidace dusíku ze spalovacího vzduchu za vysoké teploty - vysokoteplotní NO_x
- oxidace chemicky vázaného dusíku v palivu - palivové NO_x
- radikálové reakce z chemicky vázaného dusíku v počáteční fázi hoření - promptní NO_x.

Těmito třemi způsoby vzniká NO, který velmi rychle oxiduje na NO₂. Rychlost této oxidace je úměrná koncentraci NO, kdy při nízkých koncentracích ve spalinách je oxidace velmi pomalá. To je důvod, proč se NO₂ na celkovém obsahu oxidů dusíku podílí jen nepatrně.

Tvorbu NO_x velmi ovlivňuje již typ spalovacích kotlů, jejich konstrukce a stav. Rozhodující vliv na tvorbu emisí má teplota hoření, která je nejvyšší u výtavných kotlů a také rychlost uvolňování tepla v zóně hoření, která je nejnižší u fluidních kotlů. Uhelné kotle můžeme seřadit následovně [2]:

Typ kotle	Emise NO _x [mg/Nm ³]
Výtavný	1600 - 2800
Se stěnovými hořáky	1000 - 1700
S tangenciálními hořáky	800 - 1200
Fluidní	do 800

Tabulka 1 – Průměrné hodnoty emisí NO_x u uhelných kotlů
Zdroj: [2]

2.1.2 Typy oxidů dusíku [4]

Vysokoteplotní NO_x (termické)

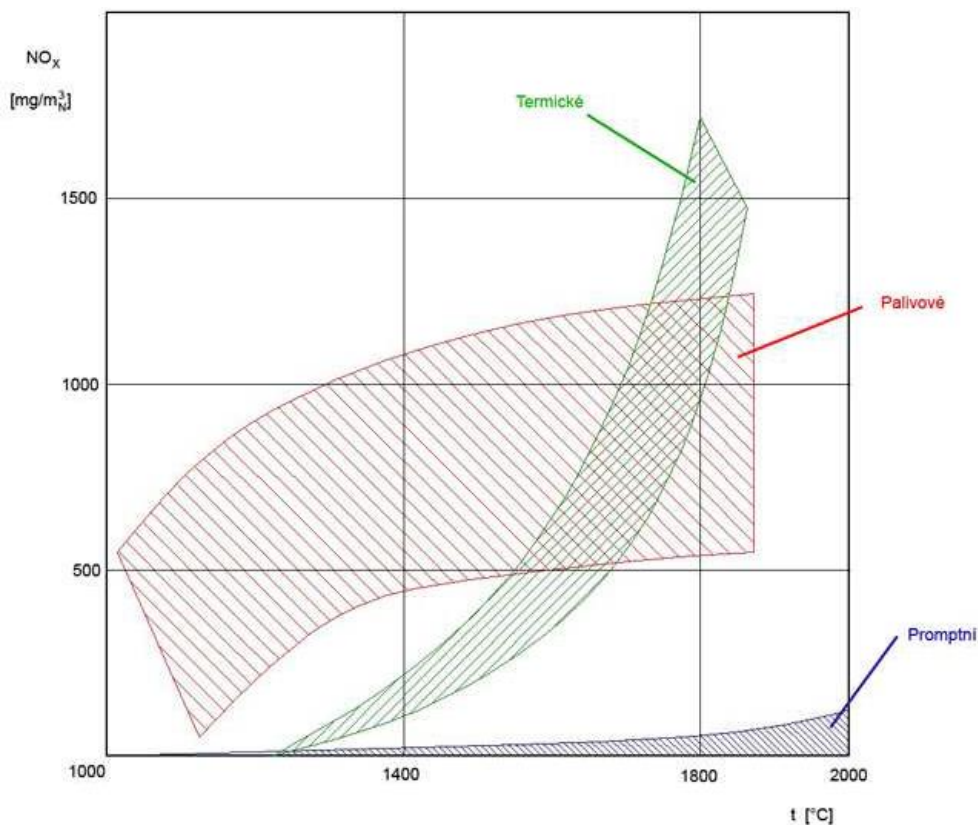
Vysokoteplotní NO_x vznikají za vysokých teplot (nad 1 100 °C) uvnitř spalovací zóny, kde dochází k radikálové reakci mezi dusíkem a kyslíkem z okysličovadla. Obsah dusíku v palivu můžeme jen těžko ovlivnit, a tak je pro nás zásadní teplota, obsah kyslíku a také doba setrvání v oblasti horkého plamene. Z tohoto poznatku plynou 3 základní způsoby omezování tvorby NO_x, jak bude uvedeno dále.

Palivové NO_x

Palivové oxidy dusíku vznikají z dusíku chemicky vázaného v palivu. Vzniklé relativně jednoduché sloučeniny reagují s látkami obsahujícími kyslík za vzniku NO. Při reakcích s látkami obsahujícími dusík vzniká N₂. Rychlost přeměny roste s teplotou ohřevu stejně tak, jako roste v blízkosti plamene s množstvím kyslíku.

Promptní NO_x

Promptní NO_x můžeme nazvat formou palivových NO_x, protože vznikají na okraji plamene přes meziprodukty a to za nejvyšších teplot. Následně oxidují s kyanovodíkem na NO. Jejich podíl na celkovém obsahu NO_x ve spalinách je velmi nízký.



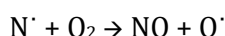
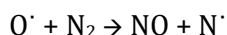
Obrázek 4 – Tvorba NO_x v závislosti na teplotě plamene
Zdroj: [3]

2.2 Primární opatření ke snížení tvorby NO_x

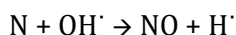
Spalovací proces je velmi složitý a nejsme schopni ho přesně popsat, proto je tak obtížné řídit spalovací proces z hlediska co nejnižší tvorby emisí NO_x. Postupně jsme však schopni snižovat tvorbu oxidů dusíku již při spalování v kotli. Toho můžeme dosáhnout tak, že modifikujeme spalování, aby se tvorba NO_x snížila, nebo aby již vzniklé NO_x konvertovaly ještě uvnitř kotle. Obecně tedy můžeme říci, že primární opatření se zaměřují jak na kvalitu spalovacího procesu a jeho cílené řízení, tak i na volbu vhodného paliva u kapalných a tuhých paliv.

V porovnání provoz starších kotlů bez uplatněných opatření s provozem nových zařízení lze říci, že se daří emise NO_x snížit až o 70 %. Rekonstrukcí spalovacích zařízení získáme zlepšení emisí NO_x o 40 až 60 %. Použití primárních opatření je významnější a levnější než následné použití sekundárních metod denitrifikace.

Radikálové reakce v ohništi za přebytku kyslíku [4]:



Radikálová reakce za přebytku paliva [4]:



Základními způsoby pro snížení tvorby termických NO_x jsou:

- snížení teploty spalovacího vzduchu, což úzce souvisí s teplotou plamene
- snížení přebytku spalovacího vzduchu α , související s koncentrací O₂ při spalování
- rychlé ochlazení plamene, tedy zkrácení pobytu reagentů v oblastech s příznivými podmínkami pro vznik NO_x.

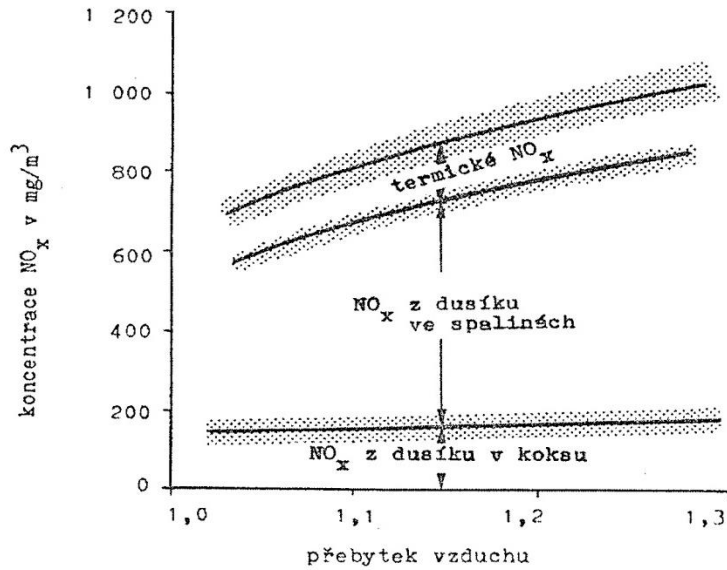
V praxi se většinou používá jejich kombinace, protože při použití jen jednoho způsobu dojde ke snížení oxidů dusíku pod zákonný limit jen výjimečně a kombinace snižuje náklady na provoz sekundárních opatření. [2, 3, 4]

2.2.1 Primární opatření pro snížení tvorby palivových NO_x

Spalování s nízkým přebytkem vzduchu

Oxidy dusíku se ve významném množství začínají tvořit při teplotách nad 1200 °C. Snížíme-li množství spalovacího vzduchu, snížíme tak i teplotu plamene. Tento zásah nevyžaduje žádné úpravy na zařízení, nelze však použít tam, kde je spalovací poměr přesně dán.

Toto opatření není ovšem příliš významné, protože snížení teploty plamene nevyváží vzniklé nevýhody, jako je tvorba sazí, koroze v redukční atmosféře, zvýšená produkce oxidu uhelnatého a ztráty nedopalem.



Obrázek 5 – Vliv přebytku vzduchu na vznik termických a palivových NO_x
Zdroj: [4]

Snížení předehřevu spalovacího vzduchu

Tento zásah je opět nenáročný na technologické změny, avšak není příliš efektivní. Snížení předehřevu spalovacího vzduchu provází velké nevýhody, jako snížení tepelné účinnosti, ztráty nedopalem a problémy se samotným hořením.

Nestechiometrické spalování

Toto opatření představuje dávkování spalovacího vzduchu ve dvou úrovních. V první chvíli spalujeme při nízké teplotě za nedostatku vzduchu, ve druhé se zbytek paliva a zplodiny z nedokonalého spalování spálí s přebytkem vzduchu. Tento způsob lze úpravami realizovat na stávajících zařízeních. Spodní řady hořáků pak nově přivádí palivo se sníženým spalovacím vzduchem a horní řady s přebytkem vzduchu.

Recirkulace spalin

Recirkulace spalin spočívá v odběru části spalin a jejich zavedení zpět do spalovacího prostoru. Dosáhneme tak snížení obsahu kyslíku v plameni a zároveň i snížení teploty. Jako nejúčinnější se osvědčil způsob, kdy spaliny mícháme do spalovacího vzduchu, který sice snižuje účinnost spalování, ale z hlediska omezení emisí NO_x je poměrně účinný. Recirkulací lze dosáhnout až 50% snížení emisí oxidů dusíku. Podrobněji rozepsanou aplikaci recirkulace spalin uvádím v kapitole 5. [2, 3, 4]

2.3 Sekundární opatření ke snížení tvorby NO_x

Tato opatření snižují emise NO_x, které již byly během spalovacího procesu vytvořeny. Dosahujeme toho vstříkáním reagentu, který reaguje s NO_x ve spalinách a redukuje je zejména na dusík a vodní páru. Sekundární opatření se uplatňují tam, kde při primárních opatřeních nejsme schopni dosáhnout požadovaných hodnot. Důležité je říci, že cena těchto opatření je řádově mnohem vyšší než u primárních zařízení.

U energetických zdrojů uvažujeme tyto metody:

- selektivní nekatalytická redukce - SNCR
- selektivní katalytická redukce - SCR
- jiné dočišťovací technologie, jejich kombinace, suché a polosuché metody, mokré procesy nebo procesy současného odstraňování oxidů síry a dusíku.

Mokré metody fungují na bázi rozdílných vlastností NO a NO₂. NO se chová jako inertní plyn, tedy nemá snahu přecházet do roztoku, a NO₂ je naopak reaktivní a ve vodě dobře rozpustný. Koncentrace NO ve spalinách výrazně převyšuje, proto se ho snažíme převést na NO₂ nebo na komplexní soli.

Ve světě je zdaleka nejběžnější metoda SCR a SNCR a jen 2 až 3 % jsou jiné dočišťovací technologie. Postupně získávají na významu procesy současného odstraňování oxidů síry a dusíku. [4]

2.3.1 Selektivní katalytická redukce SCR

Tato denitrifikační metoda, která byla představena v 70. letech v Japonsku, je ve světě nejrozšířenější. Její princip spočívá v redukci NO (resp. NO₂) na N₂ za přítomnosti katalyzátoru. Redukce díky katalyzátoru probíhá v pásmu teplot 250 až 400 °C.

Jako redukční činidlo používáme:

- plynný amoniak NH₃
- vodný roztok amoniaku NH₄OH, tzv. „čpavková voda“, cca 30 % roztok
- vodný roztok močoviny (NH₂)₂CO, cca 40 až 50 % roztok.

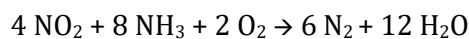
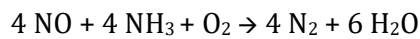
Jsou zde stejná redukční činidla jako v případě SNCR. [4]

Aplikace metody

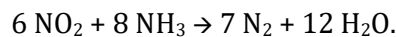
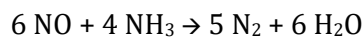
Redukční činidlo se za kotlem vstříkuje s požadovanou teplotou do proudu spalin, které jsou zavedeny do katalyzátorového reaktoru. Oxidy dusíku jsou zde selektivně redukovány, což znamená, že se redukuje pouze oxidy dusíku, plynným amoniakem za přítomnosti kyslíku a vhodného katalyzátoru, na dusík a vodní páru.

Ke správné redukci (probíhající s nejvyšší účinností) je potřeba nalézt správné teplotní okno. Při správné funkci je pak potřeba jen minimální přebytek redukční látky a redukce dosahuje účinnosti vyšší než 90 %. Výsledkem redukce tímto způsobem jsou neškodné plyny dusíku a vodní páry. [4]

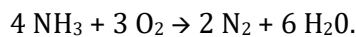
Rovnice popisující SCR [4]:



Obdobné reakce s jinou stechiometrií, bez kyslíku:



Reakce probíhají zpravidla nad 300 °C. Čpavek musíme přidávat v malém stechiometrickém přebytku, protože se ztrácí oxidací [4]:



Nízko a vysokoteplotní SCR

Nízkoteplotní varianta SCR probíhá v teplotním pásmu do 150 °C. Tato varianta je stále ve stádiu vývoje, protože katalyzátory nedosahují dostatečné spolehlivosti a účinnosti. Alternativu tomuto způsobu denitrifikace je SCR na aktivním koksu, která je popsána dále.

Vysokoteplotní varianta probíhá mezi 300 až 450 °C. Má tři modifikace - SCR před odprášením High-Dust, SCR Low-Dust a SCR po odprášení spalin Tail-End. Tyto modifikace budou popsány dále. [3, 4]

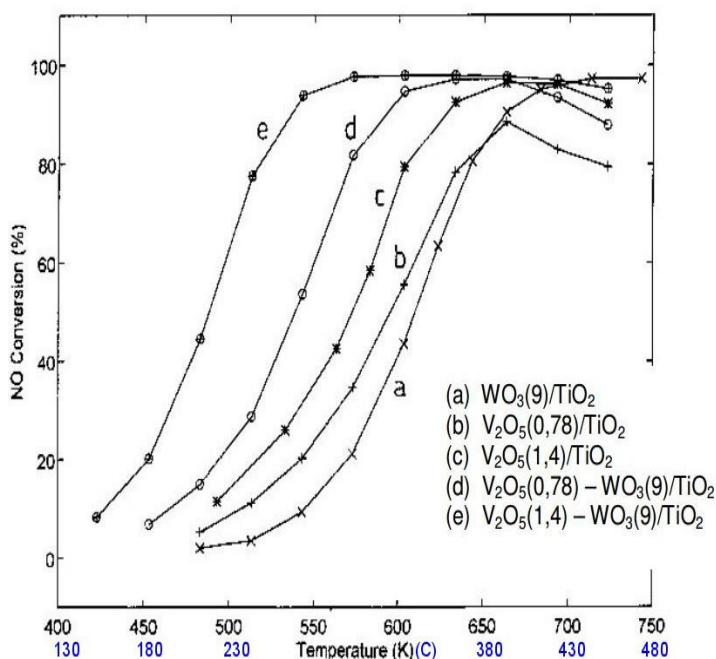
Katalyzátory

Typ katalyzátoru je velmi důležitý pro správnou funkci denitrifikace. Bohužel jejich životnost je poměrně nízká a cena naopak poměrně vysoká. Životnost závisí hlavně na druhu paliva. Nejdelší je 5 - 7 let pro plyn, nejkratší je pak pro uhlí a to přibližně 3 roky. Rychlost výměny katalyzátorů závisí zejména na vlastnostech spalovaného paliva, vstupní koncentraci NO_x, požadované účinnosti denitrifikace a poměru čpavku a močoviny ke koncentraci NO_x ve spalinách. Nosiče katalyzátorů musí obstát v nepříznivých podmínkách, a to v plynu s obsahem oxidů síry a popílku, který působí abrazivně a snižuje aktivitu katalyzátoru. Proto se katalyzátory neustále vyvíjí.

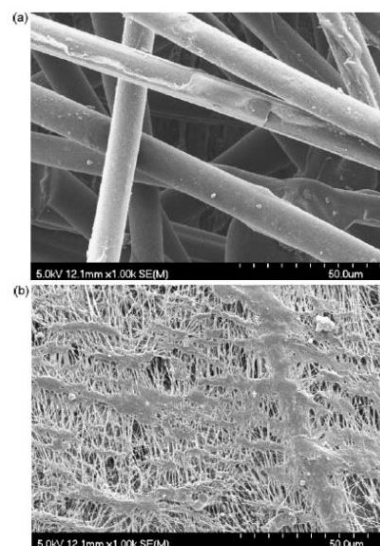
Obecné požadavky na použitý katalyzátor tedy jsou:

- vysoká aktivita při nízké provozní teplotě a v širokém rozmezí teplot
- chemická odolnost
- mechanická odolnost
- odolnost proti změnám teplot
- dlouhá životnost
- nízká cena.

Nejnovější SCR katalyzátory jsou na bázi pentaoxidu vanadičného V₂O₅ s přidavkem oxidu wolframového WO₃ a molybdenového MoO₃, které jsou přidávány z důvodu rozšíření optimálního teplotního okna a kvůli schopnosti učinit katalyzátor odolný vůči katalytickým jedům. Ty jsou naneseny impregnací na nosiči z oxidu titaničitého TiO₂, který dobře odolává oxidům síry. Tento nosič je potažen na keramické kostře tělesa katalyzátoru. Proti usazování popílku působí tvar tělesa, proudění spalin a ofukovače. Vanadové katalyzátory nejlépe pracují při teplotách kolem 350 °C (260 až 427 °C). Při nižších teplotách rychle klesá účinnost a při vyšších zase vznikají problémy z koroze. Katalyzátor V₂O₅/TiO₂ je vysoce stabilní a relativně efektivní. Aktivita vanadu je silně závislá na nosiči a modifikacích s oxidy. Účinnost SCR také závisí na množství naneseného katalyzátoru. Dále se používají katalyzátory na bázi zeolitů pro teploty v rozmezí 455 až 594 °C, pro nižší teploty to pak jsou drahé kovy (rozmezí teplot 177 až 288 °C). [2, 3, 4]



Obrázek 7 – Závislost NO přeměny na teplotě pro různé modifikace katalyzátorů
Zdroj: [7]



Obrázek 6 - Nosič bez katalyzátoru (a) a katalyzátoru V₂O₅-WO₃/TiO₂ s naneseným katalyzátorem (b)
Zdroj: [7]

Nevýhody metody

Katalytický způsob čištění spalin je výrazně dražší než SNCR. Kromě investičních nákladů jsou vyšší i náklady provozní, protože musíme zajistit odloučení prachových částic a sloučenin ovlivňujících funkci katalyzátoru. Vlivem drahého provozu se čpavek dávkuje do spalin pouze v takové míře, aby míra vyčištění spalin splňovala dané emisní limity. Tím se snižuje cena a také se tím prodlouží životnost katalyzátoru.

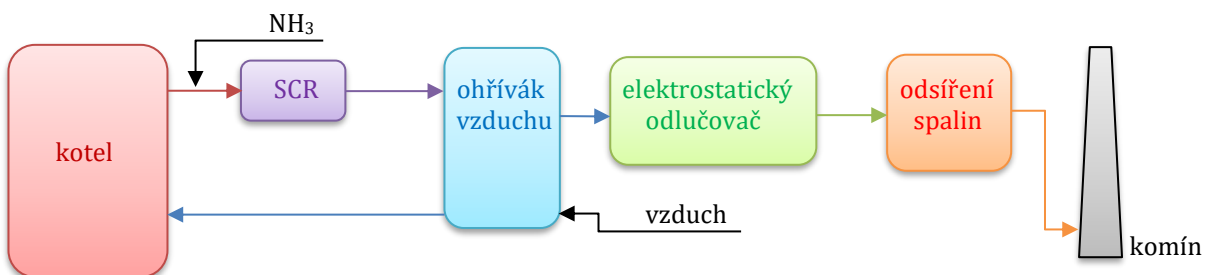
Další nevýhodou je, že musíme rychlost spalin při prostupu katalyzátorem udržovat na určité hodnotě (4 - 8 m/s). Při vyšších rychlostech by došlo k velké tlakové ztrátě, při nižších nezabráníme usazování popílku. To znevýhodňuje použití metody SCR u kotlů s variabilním výkonem.

Výhody metody

SCR má řadu výhod, například to, že konverze nevytváří žádné vedlejší složky znečištění. Emise NO_x se daří snížit až o 90 %. Dále pak umíme spotřebu čpavku přizpůsobovat tak, aby se snížil vliv na odchod čpavku do ovzduší, tzv. čpavkový skluz, a zároveň se prodloužila doba životnosti katalyzátorů. [3, 4, 12, 13]

High-Dust SCR

Tato metoda je v současnosti nejužívanější metodou SCR a je založena na selektivní katalytické redukci v oblasti zadního tahu kotle. Teplotní pásmo pro High-Dust metodu je 320 až 400 °C. Toto je použitelné pro všechna výkonová pásma kotle. Velkou výhodou je velká nezávislost na vlastním provozu kotle - tedy kotel může být provozován stejně, jako tomu bylo před instalací katalyzátoru a to dle aktuální potřeby výkonu kotle. Teoretická účinnost této metody se pohybuje v rozmezí 80 - 90 %. Schéma metody High-Dust je znázorněno na obrázku č. 8.



Obrázek 8 – Schéma SCR metody High-Dust
Zdroj [12]



Obrázek 9 – Katalyzátor užívaný pro metodu High-Dust
Zdroj [13]

Pro tuto metodu se používá katalyzátor, který je více odolný vůči částicím prachu, zvaný „Plate Catalysts“. Ten má ovšem menší užitečnou plochu a je zde i méně katalytického materiálu. [12, 13]

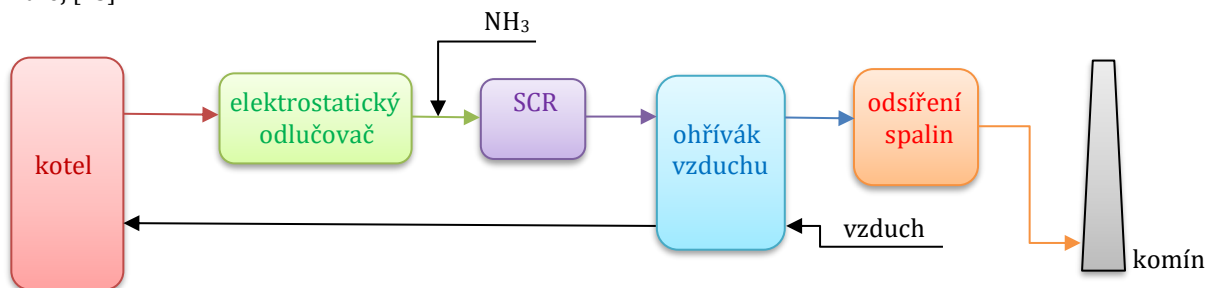
Low-Dust SCR

Rozdíl v metodě High-Dust a Low-Dust, jak už název napovídá, je, že katalyzátor je umístěn až za odprášením spalin. Je tedy vhodnější pro paliva s velkým obsahem popela v palivu a tím zajišťuje lepší životnost katalytických modulů.



Katalyzátor použitý u této metody bývá stejný jako u metody Tail-End a to typu „Honeycombs“. Ten má větší užitnou plochu, avšak díky tenčím stěnám je více náchylný na mechanické poškození a také je třeba použít pokročilé metody čištění. Schéma metody je znázorněno na obrázku č. 11. [12, 13]

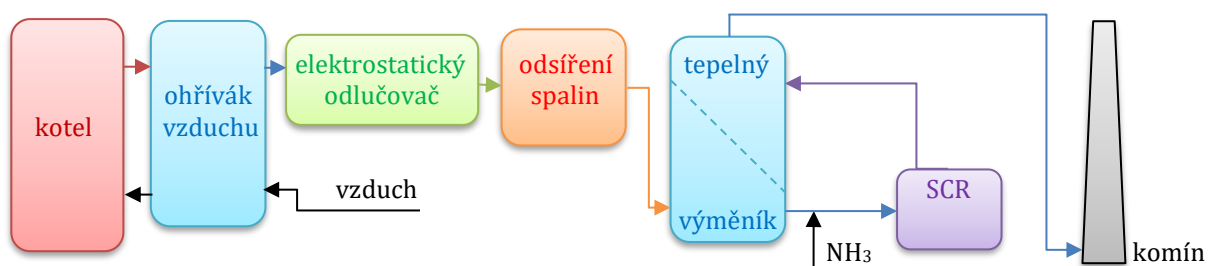
Obrázek 10 – Katalyzátor pro metodu Low-Dust
Zdroj [13]



Obrázek 11 – Zjednodušené schéma SCR metody Low-Dust
Zdroj [12]

Tail-End SCR

Tato metoda používá umístění katalyzátoru až za odsířením spalin. Je zde zpravidla nutnost přehřátí spalin abychom dosáhli požadovaného teplotního okna pro SCR. Přehřívání obvykle spotřebuje až 4 % výkonu. Tato metoda je používána zejména tam, kde není dostatek místa mezi ekonomizérem a ohříváčem vzduchu. Protože tento typ SCR je umístěn až za odsířením a elektroodlučovačem, jsou zde menší problémy s opotřebením a zanášením katalyzátoru a tedy zaručuje jeho delší životnost. Tento benefit je ale vyvážen nutností ohřevu spalin. Schéma metody Tail-End je znázorněno na obrázku 12. [12, 13]



Obrázek 12 – Zjednodušené schéma SCR metody Tail-End
Zdroj [12]

2.3.2 Selektivní nekatalytická redukce SNCR

Tato metoda spočívá v redukci NO (resp. NO₂) na N₂ bez přítomnosti katalyzátoru. Redukce probíhá v pásmu teplot 850 - 1100 °C, toto rozmezí je však značně závislé na použitém reakčním činidle. SNCR má nízké investiční náklady (přibližně 20 % nákladů na SCR) a při realizaci je prostorově nenáročná. Účinnost metody je kolem 30 - 50 %.

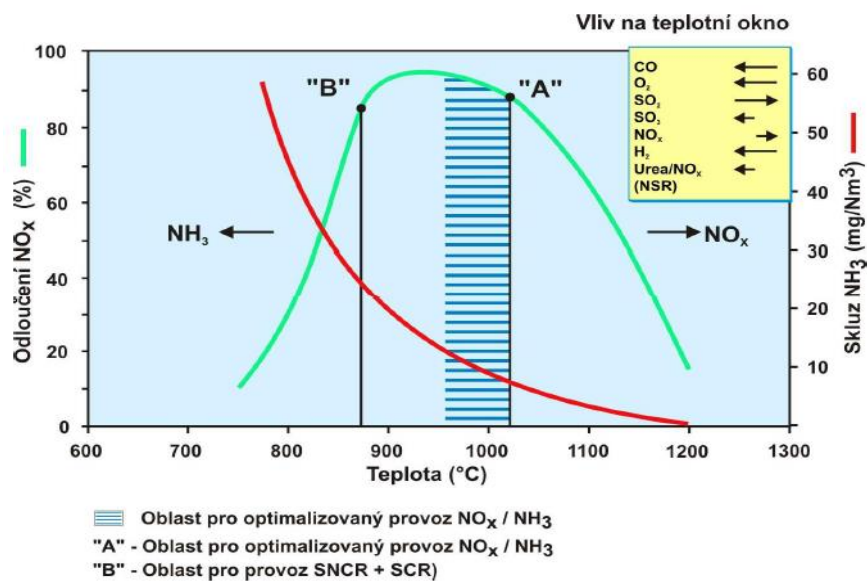
Jako redukční činidlo používáme:

- plynný amoniak NH₃
- vodný roztok amoniaku NH₄OH, tzv. „čpavková voda“, cca 30 % roztok
- vodný roztok močoviny (NH₂)₂CO, cca 40 - 50 % roztok.

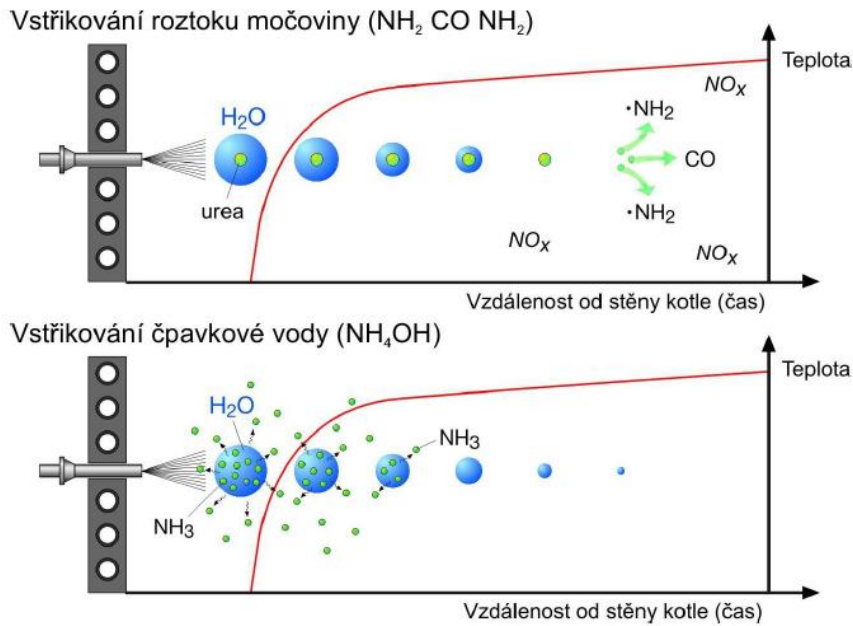
Redukční činidla jsou zde stejná jako v případě metody SCR. [2, 3, 4]

Aplikace metody

Příslušný roztok nebo plynný amoniak se nastříká tryskami do prostoru kotle s požadovanou teplotou. Teploty se ale mění zvláště se změnou výkonu a dochází pak k poklesu účinnosti reakce. Pokud je reagent vstříkován do oblasti s nízkou teplotou, oxidy dusíku nereagují s radikálem NH₂, protože reakční rychlost je nízká a nezreagovaný amoniak uniká do ovzduší. Následkem toho je zvýšená koncentrace čpavku ve spalinách. Na druhou stranu, je-li reagent vstříkován do oblasti vysokých teplot, radikál NH₂ začne přednostně reagovat s kyslíkem, což má za následek zvýšení koncentrace NO_x ve spalinách. Optimální teplota pro reakci se také liší podle použitého redukčního činidla. Například pro amoniak je v rozmezí 850 - 1000 °C a pro močovinu mezi 950 až 1100 °C. Je tedy velmi důležité u každého případu vystihnout správnou teplotu spalin, protože na ní závisí účinnost redukce, jak je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek 13 – Závislost odloučení NO_x na teplotě spalin
Zdroj: [5]



Obrázek 14 – Vstřikování redukčního činidla do plamene
Zdroj: [5]

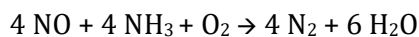
Existují 3 varianty provedení podle místa vstřiku redukčního činidla. V první variantě je redukční látka vstřikována přímo do spalovacího prostoru tryskami zabudovanými v několika úrovních stěn kotle. Místa dávkování jsou volena dle optimálního rozdělení teplot. Druhá varianta spočívá v přidávání redukční látky do prostor za přehřívákem páry. Třetí varianta spojuje obě předchozí dohromady.

Ze všech způsobů vyplývá, že výsledkem je tvorba neškodných plynů dusíku a vodní páry. V případě použití močoviny jako katalyzátoru dochází ještě k tvorbě CO₂.

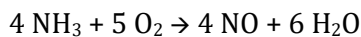
V případě zavádění redukčního činidla ve formě močoviny, musíme dbát také na správnou velikost kapek. Příliš malé kapky se rychle odpaří a reakce pak proběhne nad optimální teplotou, a příliš velké se naopak odpařují pomalu a pak nastane reakce při nižších teplotách, kdy nezreagovaný amoniak uniká do ovzduší.

SNCR vyžaduje vysoký přebytek redukční látky. Podíl odstranění oxidů dusíku podporuje vyšší podíl čpavku, jeho únik do ovzduší se ale s průběhem doby zvyšuje, a to pak vede ke většímu znečištění částí zařízení, jako jsou výměníky tepla, kouřovody atd. Optimální poměr NH₃/NO byl stanoven mezi 1,5 - 2,5. Dosahovaná účinnost redukce závisí na tomto přebytku. Pohybuje se okolo 30 - 50 %. [2, 3, 4, 5]

Rovnice popisující SNCR [4]:



Tato reakce probíhá v teplotním rozmezí 900 - 1000 °C. Její účinnost lze zvýšit přidáním vodíku nebo zemního plynu ke čpavku. Při poměru H₂ ku NH₃ rovno 2:1 tato reakce probíhá již od 700 °C.



Tato reakce je nežádoucí. Probíhá při teplotách nad 1000 °C a působí ztrátou NH₃ a zvyšuje obsah NO_x. [4]

Čpavkový skluz

SNCR je efektivní jen přes malé teplotní pásmo, jelikož při poklesu teplot pod 850°C nastává únik amoniaku do atmosféry. Reakce je pak tedy příliš pomalá a vstříknutý amoniak nestíhá zreagovat s NO_x a odchází se spalinami.

Únik čpavku se zvyšuje se vzrůstajícím poměrem NH₃/NO_x. Hrozí pak reakce s oxidy síry, které vznikají v průběhu spalovacího procesu a vznikají amoniakové soli, které způsobují zanášení a korozi zařízení. Závislost množství uniklého čpavku na teplotě reakce denitrifikace vidíme na již zmíněném obrázku č. 13 „Závislost odloučení NO_x na teplotě spalin“. [4]

Nevýhody metody

Jasnou nevýhodou je již výše zmíněný čpavkový skluz. Dále pak použití čpavku, jakožto zdraví nebezpečné látky, jako katalyzátoru nám přináší odpovědnost za jeho skladování v tlakových nádržích a manipulaci s ním. Při jeho úniku je okolí mimo jiné obtěžováno zápachem. Při reakci se sírou mohou opět vznikat nežádoucí nánosy na zařízení. Z těchto důvodů se místo čpavku používá močovina, která nezapáchá a je dobře rozpustná ve vodě a tak ji lze snadno přechovávat jako roztok v nádržích.

Výhody metody

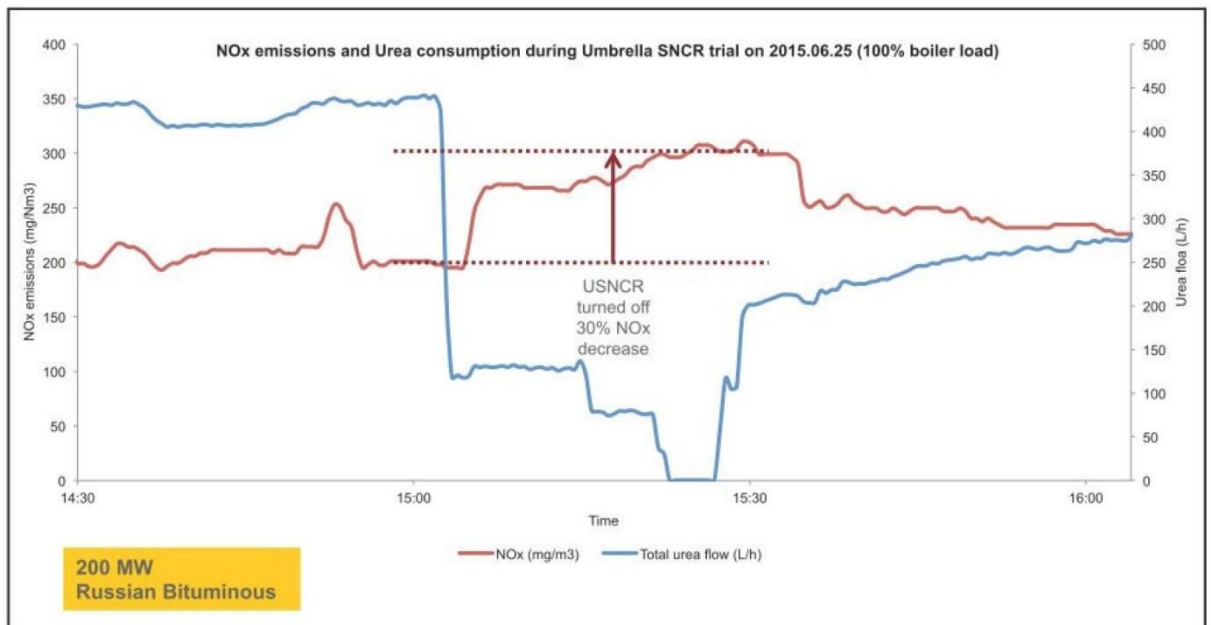
Zařízení pro SNCR je velmi snadno namontovatelné, a nezabírá příliš mnoho prostoru. SNCR snižuje hodnotu NO_x méně než SCR, dá se tedy použít samostatně v kotli, který již má nízkou hladinu NO_x. Metoda však není příliš vhodná pro kotle s kolísající jakostí paliva nebo se střídavým zatížením. SCR se dá dále použít do kotlů vybavených technikou primární redukce.

Jak již bylo zmíněno, účinnost této metody je v rozmezí mezi 50 a 65 %. Náklady na stavbu závisí na stávajícím kotli a činí přibližně 20 % nákladů na SCR. Tato metoda je i provozně výrazněji levnější než SCR. [2, 3, 4, 12]

2.3.2.1 Umbrella SNCR

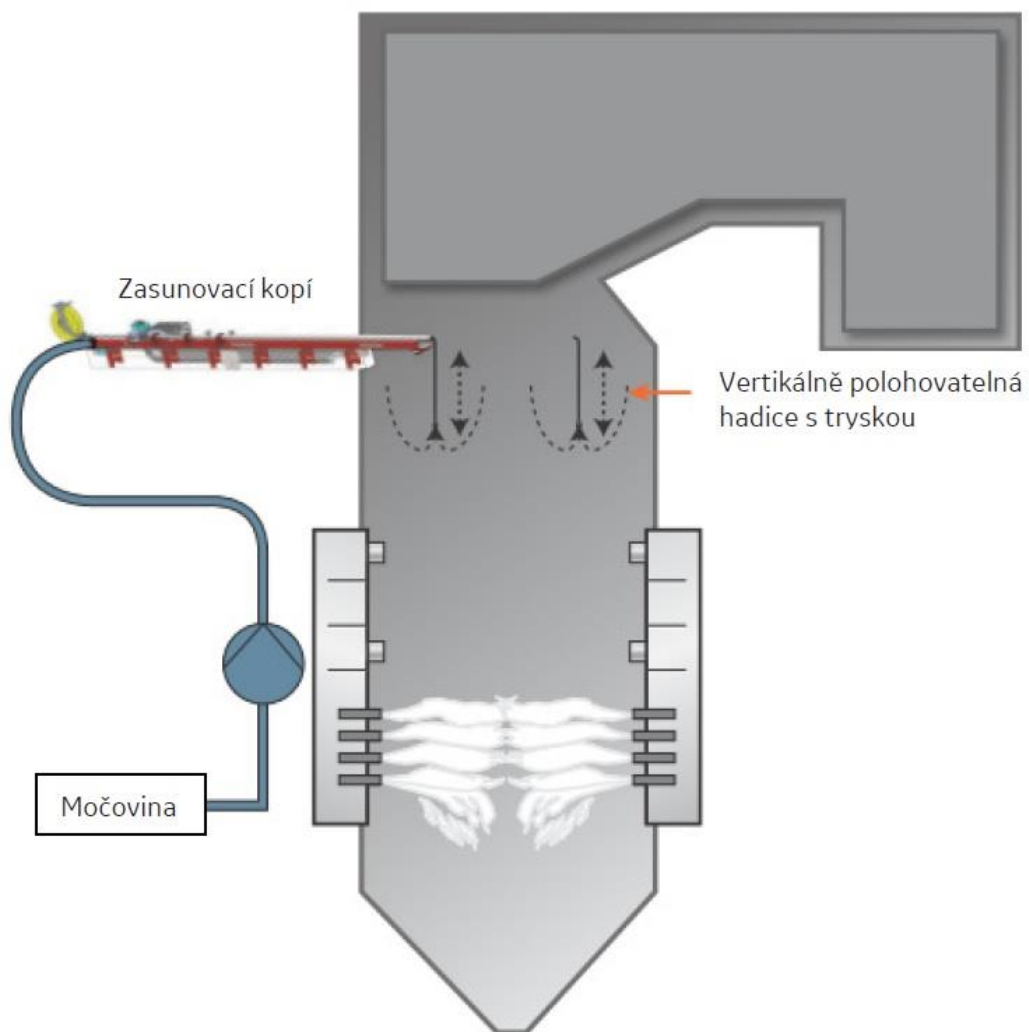
Metoda Umbrella je novou technologií selektivní nekatalytické redukce emisí NO_x od firmy GE Power. Tato technologie je unikátní svou technologií rozstřiku reagentu do spalovací komory. To je realizováno pomocí trysky, která je umístěna uprostřed průřezu spalovací komory a je vertikálně polohovatelná, což umožňuje rychlou změnu na základě změny výkonu kotle. Metoda používá chlazené kopí, které do spalovací komory zavede flexibilní hadici s rozstřikovou tryskou.

Výhodou je, že po technologické stránce nejsou pro tuto metodu omezující rozměry kotle. Metoda je také jednoduchá na ovládání a vhodná pro všechna pevná paliva. Dále je výhodou, že odpadá nutnost instalace velkého množství vstřikovacích trysek reagentu, které jsou ještě na více výškových úrovních, což snižuje dobu odstávky kotle pro instalaci zařízení Umbrella SNCR. Jedno zasunovací kopí s méně tryskami také zajistí menší spotřebu roztoku močoviny, což snižuje provozní náklady. Další výhodou je rozstřík reagentu v relativně větších kapkách, což zajistí méně citlivou reaktivní zónu na změny teplot. Rovnoměrné pokrytí průřezu kotle (oproti vstřiku kapek ze stěn kotle) zajistí vysokou redukci oxidů dusíku a malý čpavkový skluz. [9]

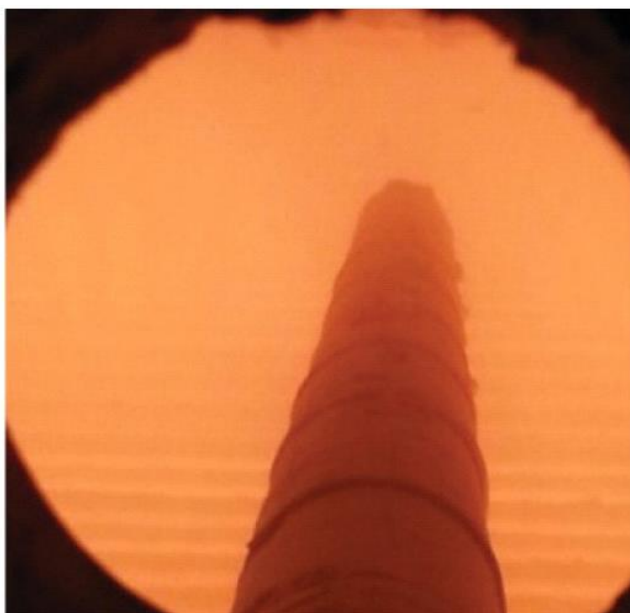


Graf 1 – Umbrella SNCR, graf redukce emisí NO_x
Zdroj [9]

Graf 2 – Umbrella SNCR, graf redukce emisí NO_x



Obrázek 15 – Schéma metody Umbrella SNCR
Zdroj [9]



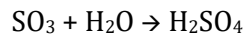
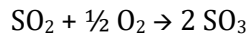
Obrázek 16 – Umbrella SNCR, vstřikovací kopí zasunuté v kotli
Zdroj [9]

2.3.3 Redukce NO_x na aktivním koksu - polokoksu (Bergbau - Forschung - Uhde)

Tato metoda získává na důležitosti v kombinaci s odsířením a denitrifikací spalin, jinak zatím nemá velké uplatnění. V tomto kombinovaném procesu dochází nejprve k adsorpci SO₂ (zachycování plynné látky na povrchu pevné látky) ze spalin na aktivním koksu následovanou denitrifikací typu SCR, kdy katalyzátorem je již zmíněný aktivní koks.

Použitý aktivní koks se získá nízkoteplotnou karbonizací černého uhlí, které musí být kvalitní s nízkým obsahem popela, maximálně do 8 %. Uhlí se zahřívá bez přístupu vzduchu při 600 °C, a dále se rozele a formuje do požadovaného tvaru a reaktivuje parou při 900 °C. Takto upravené černé uhlí (koks) má správnou strukturu pórů, pevnost a odolnost proti oťeru.

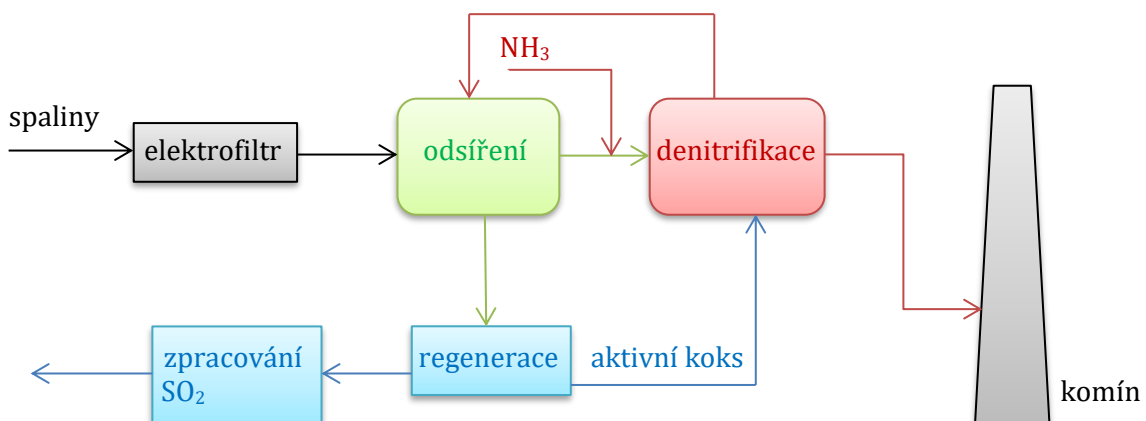
Na tomto koksu pak při teplotě kolem 90 °C probíhá katalytická reakce [2]:



Oxidy síry reagují s kyslíkem a s vodní parou za reakce kyseliny sírové. Neodsířené spalin v reaktoru putují skrze zvolna se pohybující vrstvu aktivního koksu. Po průchodu se vstříkne do spalin NH₃ a ty pak odsířené postupují s obsahem SO₂ menším jak 100 mg/Nm³ k denitrifikaci. K té dochází v horní části reaktoru, taktéž průchodem spalin kolmo na vrstvu aktivního koksu při teplotách kolem 80 °C. Následuje odvod spalin do komína. Vedlejším produktem denitrifikace je NH₃ a síran amonný, který se tvoří na povrchu aktivního koksu reakcí zbytkovým SO₂. Aktivní koks pak prochází vibračními sítí, kde se rozdělí a putuje buď na spálení do kotle, nebo do regenerace.

Při odsíření v pórech aktivního koksu vzniká kyselina sírová, která způsobuje deaktivaci jeho povrchu pro selektivní katalytickou redukci. Z uvedeného vyplývá, že pro dobrou účinnost denitrifikace, musí být spalin téměř dokonale odsířené.

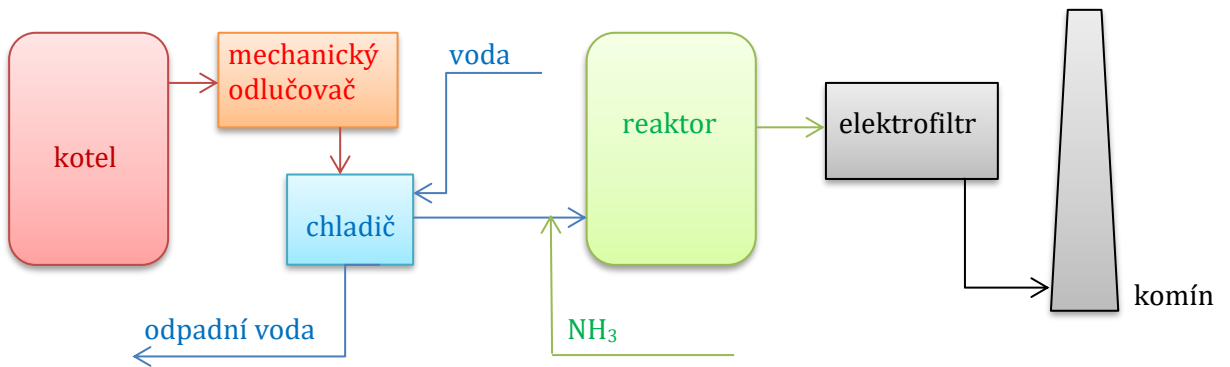
Výhodou této metody je nízká pracovní teplota, nevýhodou pak menší prostorové rychlosti, což má za následek potřebu mnohonásobně větších spalovacích prostor. [2]



Obrázek 17 – Schéma metody redukce NO_x aktivním koksu
Zdroj [2]

2.3.4 Radiační metoda

Jedná se opět o metodu, která odstraňuje oxidy síry i dusíku současně. Katalyzátor je zde však nahrazen působením urychlených elektronů. Spaliny procházejí mechanickým odlučovačem a vodním chladičem do ozařovací jednotky, kde jsou ozářeny zmíněnými urychlenými elektrony. Dochází k vytvoření radikálů, které v reakci se čpavkem a kyslíkem tvoří síran amonný a dusičnan amonný. Tyto soli se odlučují v elektroodlučovači. Spaliny pak odchází do komína.



Obrázek 18 – Schéma radiační metody
Zdroj [2]

Metoda byla účinně ověřena v Japonsku. Prokázala vysokou účinnost - 95 % na odsiřování a 80 % na denitrifikaci spalin. Její výraznou nevýhodou je bohužel vysoká energetická náročnost, která dosahuje až 5 % z výkonu kotle (metoda SCR spotřebuje 2 - 2,3 % výkonu kotle). [2]

2.3.5 Kombinovaný způsob Walther

Tato metoda je opět kombinace odsiřování a denitrifikace spalin. Princip spočívá v oxidaci NO ozónem, kde následuje vypírka čpavkovým roztokem, ve kterém se NO₂ zachycuje jako dusičnan amonný. Roztok z absorberu se nastříkuje do rozprašovací komory, kde se odpaří voda. Hnojivo se po odpaření roztoků peletkuje a prodává se s vyšším uplatněním, než palivo obsahující pouze síran amonný. Tato metoda je jednou z nejperspektivnějších metod oxidace NO na NO₂. [2]

2.3.6 Proces SNO_x (Haldar-Topsøe)

Proces SNO_x také patří mezi kombinované procesy odsiřování a denitrifikace spalin. Prvním krokem je odprášení spalin v tkaninovém odlučovači při 190 °C. Cílem je dosáhnout koncentrace popílku pod 5 mg/Nm³. Dále se spaliny ohřejí na 380 °C ve výměníku tepla a přidá se NH₃. Společně s amoniakem vstupují plyny do reaktoru s katalyzátorem, kde proběhne SCR oxidů dusíku. Dále se plyn ohřeje na 420 °C nepřímým spalováním zemního plynu a prochází reaktorem s oxidačním katalyzátorem, kde proběhne oxidace SO₂ na SO₃. Zároveň zde dochází ke zneškodnění úniku amoniaku, který prošel denitrifikací - oxiduje zde na NO a organické látky ve spalinách. Plyn prochází výměníkem tepla, kde se ochlazuje, následuje průchod skleněným chladičem a

elektrostatickým odlučovačem, kde se vylučuje kyselina sírová a dále pokračuje komínem do ovzduší. Touto metodou můžeme dosáhnout účinnosti odsíření i denitrifikace až 95 %. Ale díky dvojitému přehřívání je energeticky poměrně náročná. [2]

2.4 Ekonomické aspekty denitrifikace spalin

Obecně můžeme říci, že veškerá ekologická opatření vždy způsobují zatížení výroby investicemi a provozními náklady. Z hlediska vlastní výroby energií jsou tak neefektivní. Musíme proto volit technologii, která při daných podmínkách výslednou cenu energií pro spotřebitele zvyšuje jen minimálně. V dnešní době není problém technické řešení denitrifikace jako takové, ale správná volba technologií, která splňují i ekonomické, ekologické a hospodářsko-politické požadavky.

Ekonomická hlediska

Z ekonomických hledisek mám na mysli hlavně investiční a provozní náklady. Dále musíme brát v úvahu dostupnost potřebných surovin, jejich cenu a problémy spojené s jejich dovozem. Také musíme myslet na možnost využití a prodeje vzniklých produktů. Existují denitrifikační metody, které jsou výhodné z hlediska investičních i provozních nákladů, ale vzniklý produkt je téměř nepoužitelný pro další zpracování. S tím nám vznikají další problémy jako uskladnění vzniklého produktu, či přeměnu na jiný produkt, který je dále použitelný.

Ekologická hlediska

Z ekologických požadavků sledujeme zejména účinnost dané metody. Neméně důležitá je však nezávadnost produktů a odpadních vod.

Hospodářsko-politické požadavky

Požadavky hospodářsko-politické obsahují velké množství hledisek. Například musíme myslet na dostupnost potřebných surovin, nároky na jejich dopravu, možnost jejich nahrazení atd. Dovolují si sem zahrnout i náročnost metody na počet pracovníků. Významnou roli hraje také uplatnění produktů. Jejich uplatnění nemůže pokrýt náklady na denitrifikaci, ale může je částečně snížit. Například kombinovaný způsob Walther produkuje hodnotnější hnojivo, se kterým není takový problém odbytu jako se síranem amonným.

2.5 Shrnutí variant SCR a SNCR

V tabulce 2 uvádím přehled a shrnutí dvou světově nejrozšířenějších způsobů denitrifikace spalin.

Metoda	SCR	SNCR	Jednotka
Teplotní okno	250 - 400	850 - 1 100	°C
Katalyzátor	✓		-
Redukční činidlo - plynný amoniak NH ₃	✓	✓	
- čpavková voda NH ₄ OH	✓	✓	-
- vodný roztok močoviny (NH ₂) ₂ CO	✓	✓	
Vzniklé produkty - N ₂	✓	✓	
- vodní pára	✓	✓	-
- CO ₂		✓	
Investiční náklady	100	20	%
Provozní náklady	nižší	vyšší	-
Účinnost	až 90	50 - 65	%
Zastavěný prostor	větší	menší	-

Tabulka 2 - Porovnání SCR a SNCR metody
Zdroj [2, 3, 4, 5, 9, 12, 13]

Rozmezí teplotních oken se u různých zdrojů u obou variant liší. SCR metoda má sice vyšší účinnost konverze, ale není vhodná pro kotle s variabilním výkonem, protože je nutné dodržet vhodné rozmezí rychlosti proudu spalin. Provozní náklady jsou zde z hlediska spotřeby reagentu a ostatních provozních médií nižší než u SNCR.

U SNCR metody, při použití močoviny jako redukčního činidla, vzniká kromě plynného dusíku a vodní páry také oxid uhličitý. Také je nutno dávat pozor na hodnoty nezreagovaného čpavku, který působí ve formě amoniakových solí korozivně ve spalinovém traktu kotle.

Podrobnější popis výhod a nevýhod obou variant denitrifikace spalin při použití na konkrétní kotle jsou popsány v kapitole 8.

3 Použité technologie v ČR a SR

V této kapitole jsou uvedeny příklady již instalovaných způsobů denitrifikace na českých a slovenských teplárnách. [9, 11]

3.1 Teplárna Karviná, primární opatření

V Teplárně Karviná, která patří společnosti Veolia Energie ČR, a.s., došlo k denitrifikaci kotlů K2 a K4. Dále jsou popsána primární opatření na kotli K4, jejichž realizace probíhala v letech 2015 a 2016.

Popis zařízení

Kotle v Teplárně Karviné jsou parní a provedením bubnové. Komora je granulační s foukáním uhelného prášku ze zásobníků. Vodní část tlakového systému je tvořena z ohříváku vody, výparníku a bubnu, odkud separovaná pára prochází třemi stupni přehříváku páry. Parametry kotle jsou dány v následující tabulce.

Jmenovitý parní výkon	85 t/h
Jmenovitý tepelný výkon	62,5 MW
Tlak přehřáté páry	7,45 MPa
Teplota přehřáté páry	490 °C
Teplota napájecí vody	180 °C

Tabulka 3 – Teplárna Karviná, parametry kotle K4
Zdroj: [9]

Na konci spalovací komory je teplota spalin 1 109 °C, která byla vypočtena z měření pro parní výkon kotle 83 t/h, ve výšce 19,60 m. Hlavním palivem je směs černouhelných prachů a kalů z produkce OKD s výhřevností 19 ÷ 25 MJ/kg.

Průměrné hodnoty emisí pro roky 2013, 2014 jsou:

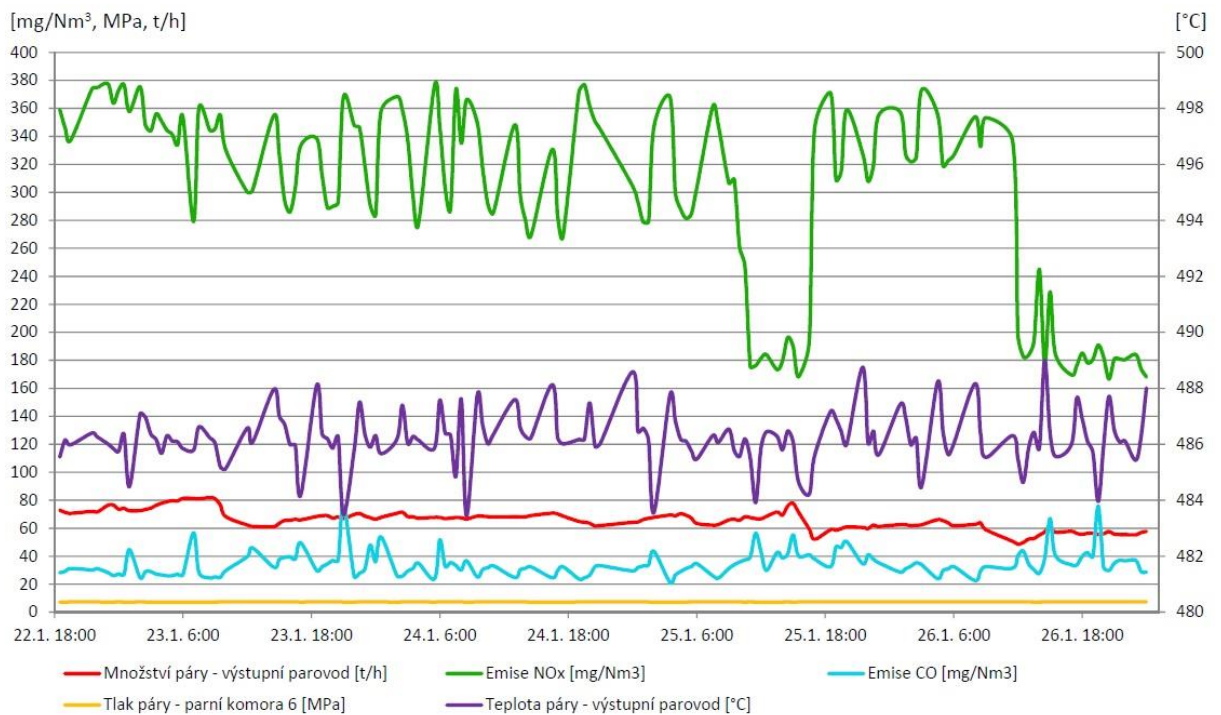
Rok - průměr	NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
2013	458	46
2014	452	37

Tabulka 4 – Teplárna Karviná, K4, emise před rekonstrukcí
Zdroj: [9]

Aplikace primárních opatření

Pro zlepšení stavu kotle a vytvoření vhodných podmínek pro další užití sekundárních opatření byla použita úprava horní části skříně za mlýnským ventilátorem a použití naváděcích plechů. Tím bylo dosaženo optimalizace zrovnoměnění průtoku primárního vzduchu. Sledovanými parametry bylo rozložení teplotního profilu po výšce a v jednotlivých řezech spalovací komory a dále rozložení koncentračního pole CO, NO a O₂. Došlo také k výměně uhelných a brýdových hořáků včetně potrubních rozvodů, podavače uhelného prášku a práškovody. Dále byl upraven průtok primárního a sekundárního vzduchu.

Na následujícím grafu jsou ukázány hodnoty dosažené při komplexním vyzkoušení nově zavedených opatření.



Graf 2 – Teplárna Karviná, K4, komplexní vyzkoušení
Zdroj: [9]

Sledovaný parametr	Požadovaná hodnota	Výsledné hodnoty	Splněno
Analýza procesní NO _x [mg/Nm ³]	390 pro jmenovitý parní výkon 85 t/h 380 pro jmenovitý parní výkon 52 t/h	maximum: 377,51	Ano
Okamžitá přepočtená koncentrace CO [mg/Nm ³]	80	maximum: 76,19	Ano
Teplota páry, výstupní parovod [°C]	490 ± 10	průměr: 486,22 minimum: 483,44 maximum: 489,00	Ano
Tlak páry, parní komora [MPa]	7,45 ± 0,2	průměr: 7,36 minimum: 7,29 maximum: 7,41	Ano

Tabulka 5 – Teplárna Karviná, K4, vyhodnocení komplexního vyzkoušení
Zdroj: [9]

Garantované hodnoty emisí po provedení primárních opatření

Hodnoty emisí jsou vztaženy na suchý plyn za normálních stavových podmínek. Tedy tlaku 101,325 kPa a teplotě 273,15 K a při referenčním obsahu kyslíku 6 %.

Parní výkon [t/h]	NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
85	390	80
52	380	80

Tabulka 6 – Teplárna Karviná, K4, garantované hodnoty emisí
Zdroj: [9]

Dalšími garantovanými hodnotami pro Teplárnu Karviná jsou:

- nezhoršení provozních technických parametrů kotle
- nepřekročení hodnoty nedopalu v popílku 6,0 % a ve škváře 2,0 %
- vytvoření příznivých podmínek pro následnou aplikaci sekundárního opatření SNCR - zejména vhodné teplotní okno.

3.2 Košická teplárna, primární a sekundární opatření

Tepláren Košice je kogenerační zdroj tepla se spalováním zemního plynu a černého uhlí. Zemní plyn je použit pro zapalování a stabilizaci kotle. Černé uhlí je o výhřevnosti 25 ÷ 27 MJ/kg. V teplárně došlo k rekonstrukci a denitrifikaci kotle PK4s. Rekonstrukcí kotle rozumíme hlavně změnu konstrukce druhého tahu a aplikaci primárních i sekundárních opatření pro snížení emisí dusíku. Došlo zde k instalaci trubkového ohříváku vzduchu (výměnou za rotační), nízkoemisních práškových a plynových hořáků a k výměně vzduchových i spalinových ventilátorů.

Popis zařízení

Rekonstrukce se týkala parního kotle, který je řešen jako dvoutahový, bubnový a s přirozenou cirkulací. Spalovací komora je výtavná se čtyřmi práškovými hořáky. Spaliny z kotle procházejí přes elektrostatické odlučovače a spalinové ventilátory do komína.

	NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
Provoz kotle na uhlí	cca 900	max. 100
Provoz kotle na plyn	200	max. 50

Tabulka 7 – Teplárna Košice, PK4s, stav emisí NO_x před rekonstrukcí
Zdroj: [9]

V Košické teplárně došlo k výměně hořáků na uhelný prášek i zemní plyn a také potrubí uhelného prášku. Dále bylo obměněno potrubí studeného i horkého vzduchu a byly dodány nové parní a trubkové ohříváky vzduchu, dále pak vzduchové a spalinové ventilátory.

Aplikace sekundárních opatření

Denitrifikace spalin kotle PK4s je nově provedena sekundární selektivní katalytickou metodou SCR. DeNO_x systém je umístěn ve druhém tahu kotle, kde je ideální teplotní okno v rozmezí 320 ÷ 400 °C. Katalyzátor je vybaven akustickým systémem čištění. Reagentem pro denitrifikaci je 24% roztok čpavku, který je rozprašován před katalyzátor. Spaliny jsou po průchodu katalyzátorem vedeny do následného odsíření.

Dosažené výsledky

Při komplexním vyzkoušení, které trvalo 72 hodin, všechny sledované emisní látky byly v rozsahu, který je dán zákonem - tedy 200 mg/Nm³.

3.3 Elektrárna Počerady, primární a sekundární opatření

Elektrárna Počerady snížila emise NO_x na 5 uhelných blocích za současného zachování výkonových parametrů a také hodnot nedopalu ve škváře a popílku a nízkých emisí CO. Práce započaly v prosinci roku 2013 a o 2 roky později bylo zařízení předáno provozovateli po garančních testech.

Popis zařízení

Kotle Elektrárny Počerady jsou tvořeny jako dvoutahové. Hnědé uhlí je odebíráno z mostecké uhelné pánve. Každý kotel má 8 uhelných vířivých hořáků, a byl řešen individuálně, protože po 30 letech provozu byl každý v jiném technickém stav.

	NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
Emise před rekonstrukcí	480 - 500	50 - 80
Garantovaná hodnota	200	50

Tabulka 8 – Elektrárna Počerady, emise před rekonstrukcí
Zdroj: [9]

Primární opatření

Ke snížení vzniku oxidů dusíku došlo v první řadě správným nastavením práškových hořáků a přidáním nové úrovně dohořivacích vzduchů. Primární opatření měla snížit hodnotu emisí NO_x na 350 - 330 mg/Nm³. To se povedlo díky prodloužení času setrvání částic v redukční atmosféře, která byla vytvořena díky podstechiometrickému spalování v pásmu hořáků. Při realizaci primárních opatření nedošlo k zásahu do tlakového systému kotle, ale byly pouze upraveny hořáková ústí, do kterých byl přiveden sekundární vzduch.

Sekundární opatření

Jako sekundární opatření je použita selektivní nekatalytická redukce. Redukčním činidlem je zde 40% vodný roztok močoviny. Vstřík reagentu je realizován na čtyřech hladinách - 2 jsou ve dvou různých výškách na čelní straně kotle a další 2 na stranách bočních a zadní. Dávkování močoviny je řízeno teplotou spalin ve spalovací komoře.

Dosažené výsledky

Všechny emisní limity jsou dodrženy. Při provozu jsou však kladeny vysoké nároky na udržení přesného vzduchového režimu na každém jednotlivém hořáku a na jemnost mletí mlýnů. Dalšími faktory, které komplikují vstřík reagentu do potřebných podmínek, jsou například velké rozměry spalovacích komor, kolísání teplot a nutnost udržení nízkého čpavkového skluzu. To klade vyšší nároky na provozní personál.

		NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]		NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
K2	Elektrický	180	47	Elektrický	185	47
K3	výkon	181	42	výkon	173	42
K4	bloku 190	178	47	bloku 130	170	35
K5	MW _e	185	40	MW _e	182	40

Tabulka 9 – Elektrárna Počerady, emise po rekonstrukci

Zdroj: [9]

3.4 Elektrárna Poříčí, primární opatření

V Elektrárně Poříčí došlo ke stabilizaci a optimalizaci spalování ve fluidním kotli. Ta byla primárně zaměřena na zvýšení účinnosti a snížení emisí NO_x. Cílem bylo spalovací proces přizpůsobit spalování více druhů uhlí a jejich směsí, kdy se výhřevnosti liší od 11 až po 18,8 MJ/kg. Změna řízení kotle byla provedena primárně pomocí stávajícího měření a výpočtů na straně paliva za provozu kotlů, bez zásahů do strojní technologie. Zásahy operátorů do řízení paliva klesly téměř o 90 % oproti počtu v letech 2013, 2014. Optimalizace měla také za úkol snížit emise NO_x o 25 %. Díky optimalizaci se účinnost kotle zvýšila o 1 %.

Popis zařízení

Fluidní kotle v Elektrárně Poříčí byly postaveny v letech 1996-1998. Regulace přísunu paliva byla nutná díky změně palivové základny v roce 2013, do kdy bylo spalováno hnědé uhlí prakticky o konstantních parametrech, kdy výhřevnost byla garantována na 18,61 MJ/kg. Nové palivo je směsí 3 druhů hnědého uhlí a černouhelných kalů aditivovaných vápencem o výhřevnostech [MJ/kg]: 18,82, 12,70, 15,12 a 11,04. Zejména díky nižším výhřevnostem pak postupně docházelo ke snižování účinnosti kotle, jak je ukázáno na grafu 3.



Graf 3 – Elektrárna Poříčí, účinnost kotle K8

Zdroj [9]

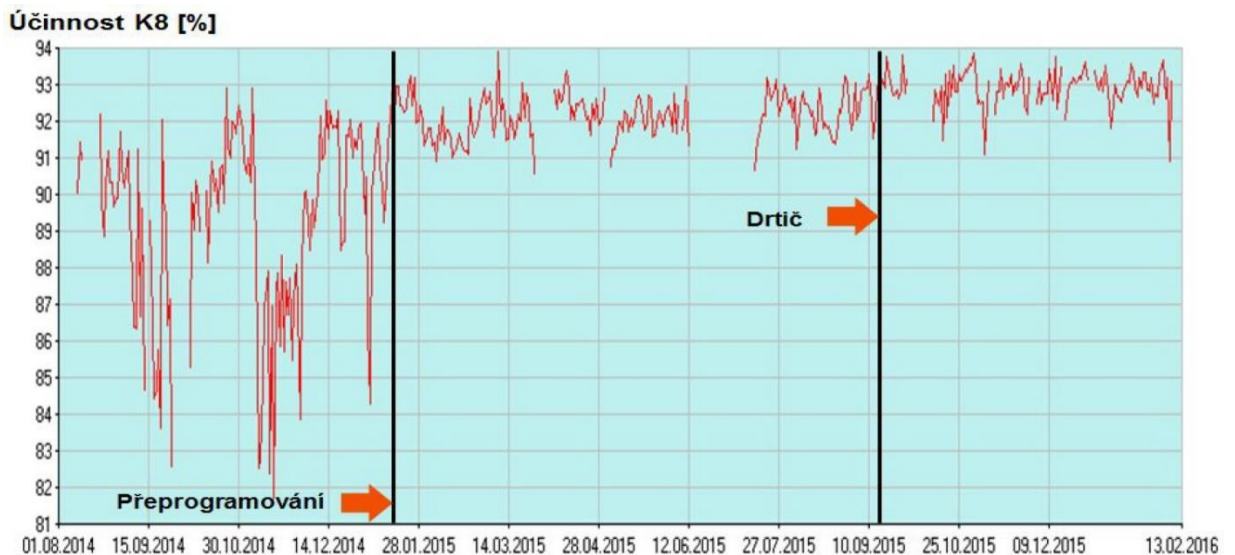
Původní regulace přísunu paliva do kotle byla nastavena na spalování paliva s malým rozptylem parametrů. Bylo ovšem stále možné spalovat palivo o různých výhřevnostech, k čemuž slou-

žila regulace kompenzace výhřevnosti paliva, která regulovala množství uhlí a otáčky dopravníků. Postupně se tento způsob regulace začal ukazovat jako nevhodný, protože čím více bylo paliva o menší výhřevnosti, tím více rostly otáčky dopravníků. Více tun uhlí do kotle znamenalo přidávání množství vzduchu, který byl ovšem nadbytečný a ochlazoval fluidní lože.

Aplikace primárních opatření

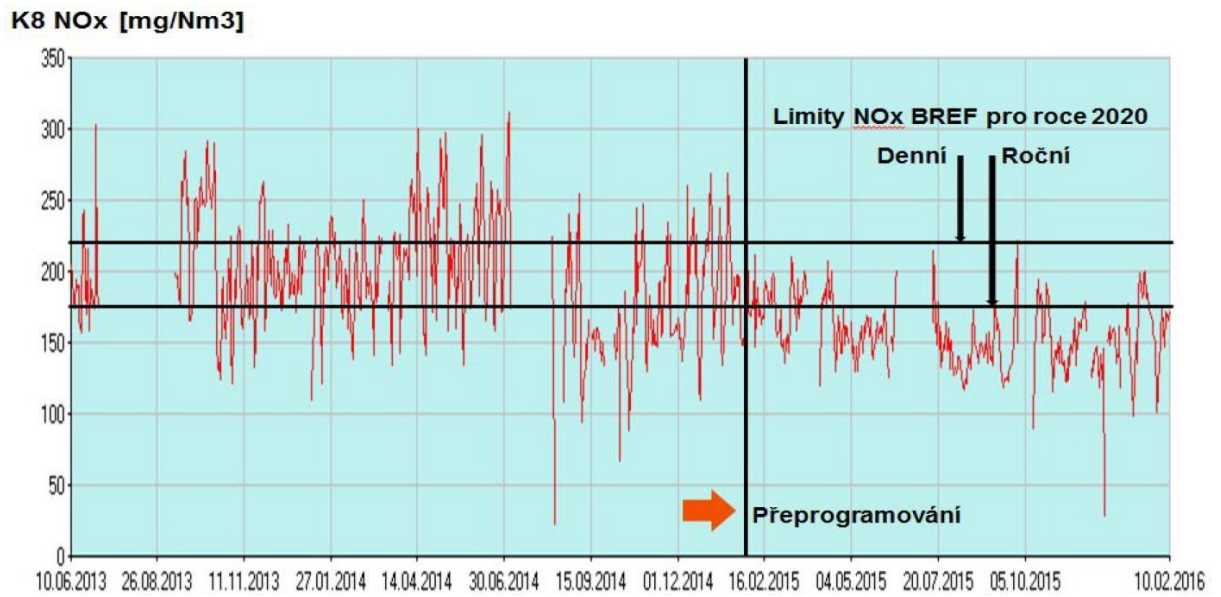
Nově se problém řízení kotle při spalování více druhů paliva vyřešil cestou řízení toku energie paliva. Pro výpočet energie v palivu je potřeba vědět množství paliva a jeho výhřevnost. Množství uhlí do kotle se nastavuje dle potřebné energie k dosažení určitého výkonu kotle. Množství uhlí se přepočítává na energii v palivu a až ta je využívána pro regulaci vzduchů.

Spolu ze změnou řízení kotle a instalací nového drtiče se zvýšila účinnost kotle K8 jak vidíme na grafu 4.



Graf 4 – Elektrárna Poříčí, účinnost kotle K8 po změně řízení
Zdroj [9]

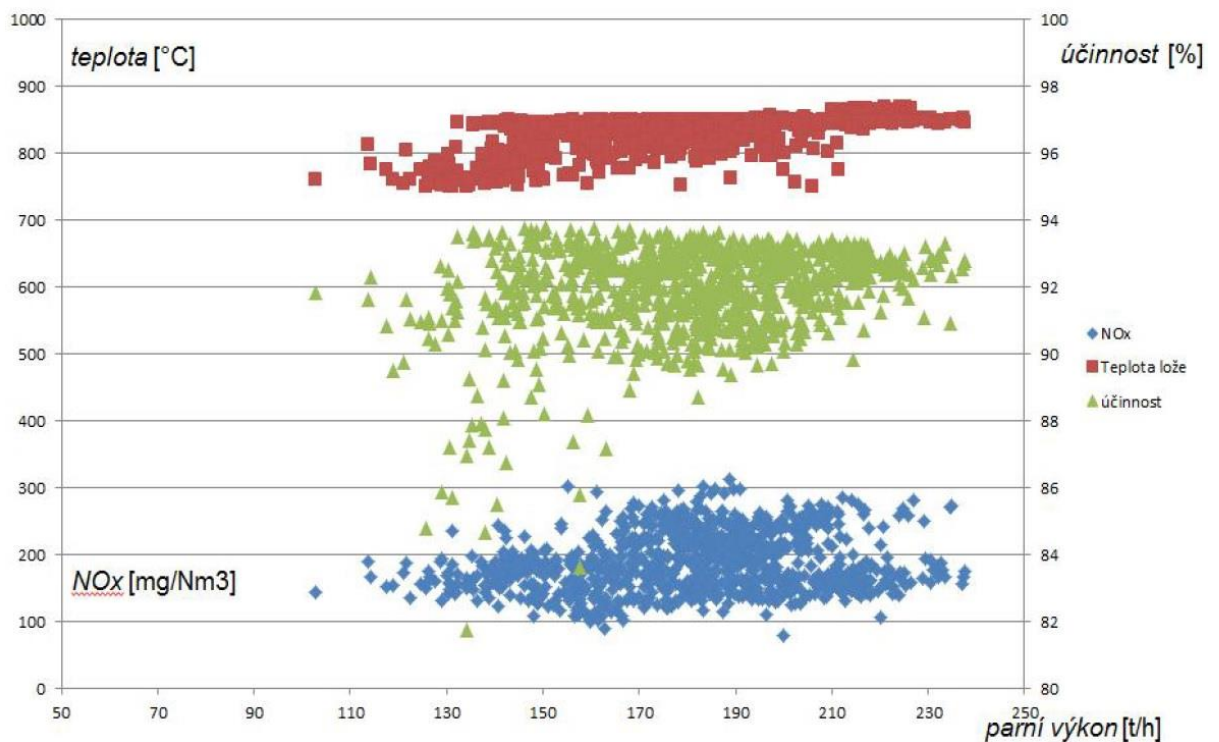
Zlepšením procesu spalování došlo k optimalizaci přívodu vzduchu do kotle, a tím došlo i ke snížení emisí NO_x. Na následujícím grafu je porovnání emisních limitů platných po roce 2020 a dále z něj vyplývá, že sekundární opatřená již nejsou třeba. Průměrná hodnota emisí dusíku na kotlích K7 i K8 je nově 150 mg/Nm³.



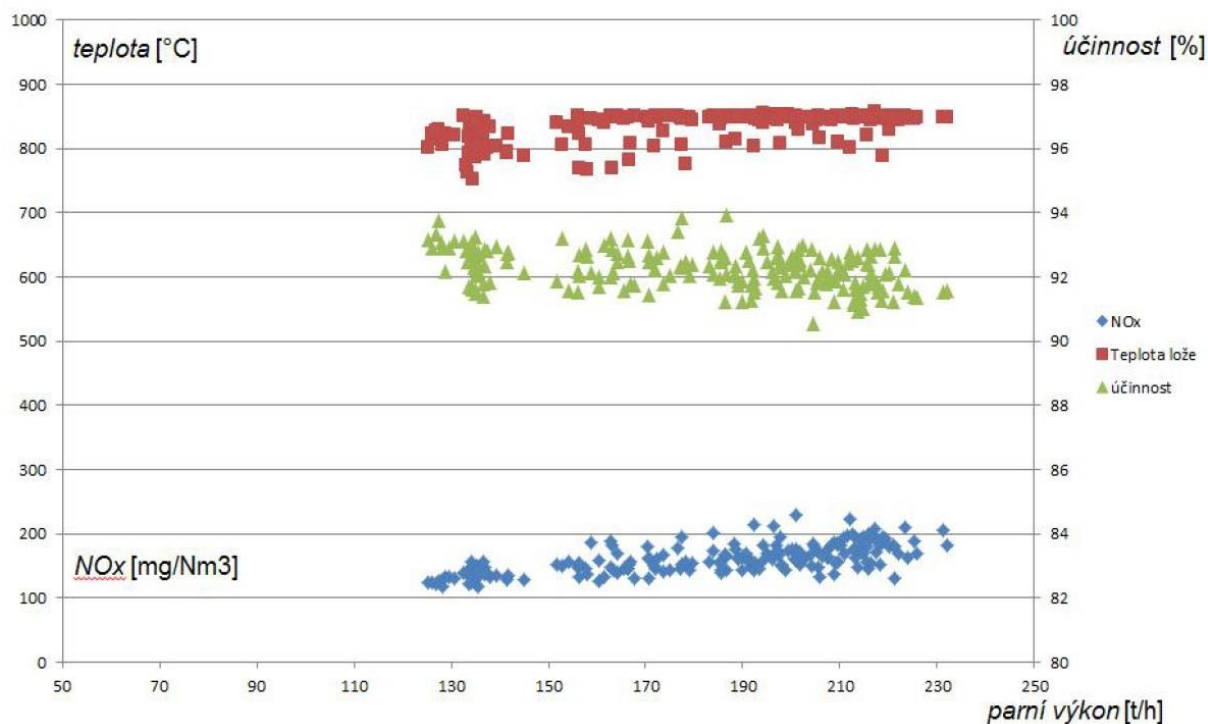
Graf 5 – Elektrárna Poříčí, NO_x
 Zdroj [9]

Dosažené výsledky

Na následujících grafech vidíme stav provozu kotle (účinnost, teploty lože a množství NO_x) před novou regulací a po ní. Jsou zde porovnány roky 2012 - 2014 a téměř celý rok 2015.



Graf 6 – Elektrárna Poříčí, K8, 2012 - 2014
 Zdroj [9]



Graf 7 – Elektrárna Pořčív, K8, 02/2015 - 02/2016
Zdroj [9]

3.5 Elektrárna Prunéřov II, primární opatření

V Elektrárně Prunéřov II došlo k celkové obnově kotlů K3, K4 a K5. Během této rekonstrukce došlo nově k aplikaci primárních opatření pro snížení emisí NO_x pod úroveň 200 mg/Nm³. Uhel-
né bloky byly kompletně vyměněny za nové o výkonu 250 MW, které se navrhly tak, aby na od-
stranění emisí NO_x stačily pouze primární opatření a to díky jejich menším investičním a pro-
vozním nákladům.

Popis zařízení

Nové kotle využívají nosné konstrukce kotlů původních, a jsou to kotle průtlačné, dvoutahové, s granulačním ohništěm. Každý kotel má 8 mlecích okruhů, kdy ke každému patří jeden proudový hořák a dva hořáky vířivé. Najížděcí a stabilizační plynové hořáky jsou zabudovány do středu spodních vířivých hořáků. Průřez spalovací komory byl zvětšen na maximum - tedy 15 x 15 m, přičemž byl limitován stávající nosnou konstrukcí.

V následující tabulce vidíme porovnání emisí na starých a nově instalovaných kotlích.

	NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
Emise před rekonstrukcí	530	19
Nově garantované hodnoty	200	200

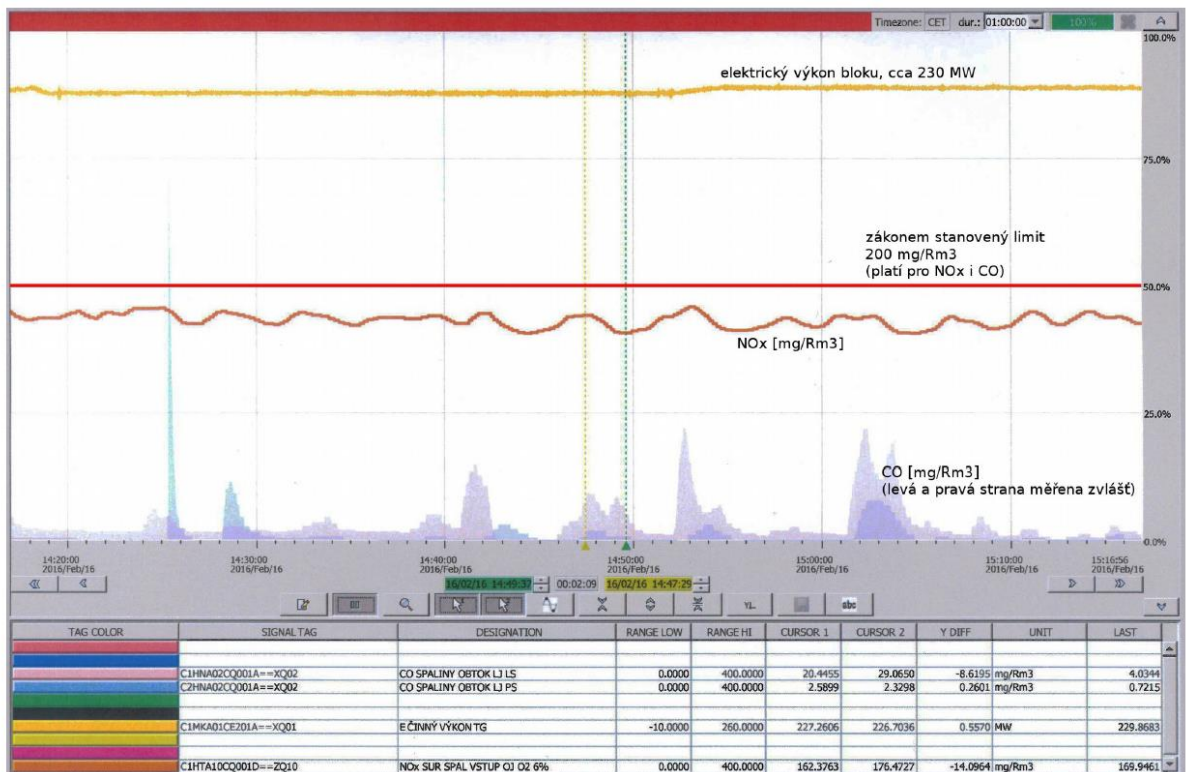
Tabulka 10 – Elektrárna Prunéřov II, emise před rekonstrukcí a nově garantované
Zdroj: [9]

Primární opatření

Základem těchto opatření je bilance mlecích okruhů a spalování, ze kterých vychází výpočet spalovací komory. Tak se ověřil počet hořáků a jejich rozmístění společně s optimálním množstvím přebytku vzduchu ve spalovací komoře. Nové vířivé hořáky jsou konstruovány tak, aby příznivě ovlivňovaly rozložení spalovacích teplot spolu se snížením emisí NO_x a nedopalu paliva. Návrh takového hořáku je prováděn nejprve v teoretické spalovací komoře, kde jsou posuzovány jeho vlastnosti hlavně z hlediska stability spalování a minimální produkce oxidů dusíku. Dále se přechází k návrhu celé spalovací komory.

Dosažené výsledky

Při zkušebním provozu na kotli K23 se reálné hodnoty emisí NO_x, jak vidíme na následujícím obrázku, pohybovaly kolem 180 mg/Nm³.



Obrázek 17 – Elektrárna Pruněv II, obrazovka řídicího systému zachycující stav emisí K23
 Zdroj [9]

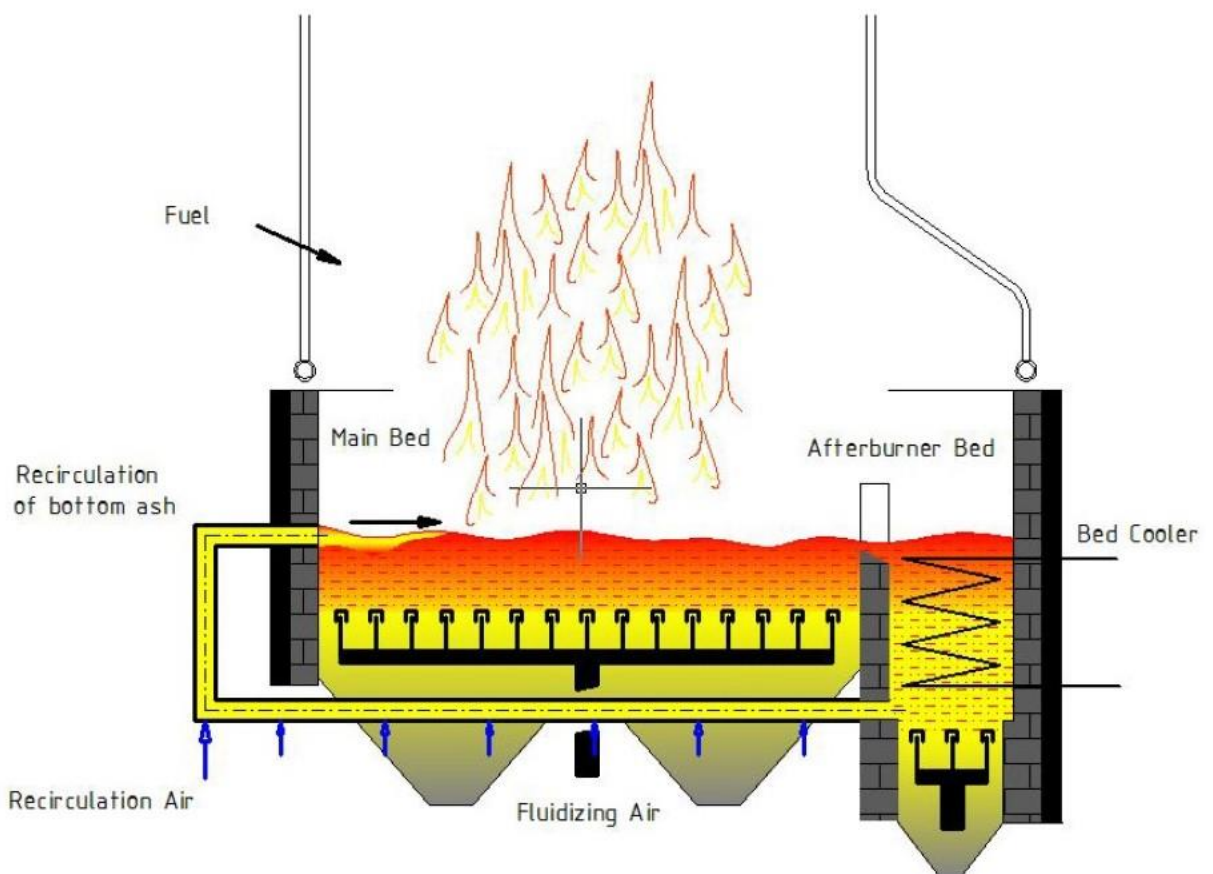
3.6 Teplárna Strakonice, primární a sekundární opatření

V Teplárně Strakonice jsou dva nové fluidní kotle K1 a K2, které umožňují spolu spalovat hnědé uhlí a biomasu. Došlo k významnému snížení emisí SO₂ již v kotli a také se zvedla účinnost spalování. Kotle využívají technologii fluidního spalování, která kombinuje výhody stacionární a cirkulující fluidní vrstvy. Jejich zkušební provoz byl ukončen v roce 2015.

Během zkušebního provozu byly prováděny optimalizační činnosti jako nastavení vhodné výšky fluidní vrstvy, recirkulace, optimalizace množství vzduchu vstupujícího do komory a také optimalizace teplotního rozložení ve spalovací komoře pro snížení emisí NO_x a SO₂ díky primárním opatřením.

Popis zařízení

Kotle jsou vodotrubné s přirozenou cirkulací a jedním bubnem. Fluidní lože se skládá ze dvou částí - hlavní a dohořivací lože. Hlavní lože má bublající vrstvu o hloubce cca 400-500 mm a dohořivací lože má hloubku fluidní vrstvy 1400 - 1600 mm. Fluidní vrstva se přepouští z dohořivacího lože do hlavního pod přívod paliva, kdy dochází k udržování žádané teploty ve fluidní vrstvě. Tento typ technologie je poprvé instalován v Teplárně Strakonice a při prvních najetích kotlů se objevily problémy, které však byly postupem času odladěny.



Obrázek 20 – Teplárna Strakonice, fluidní lože
Zdroj [9]

Palivem kotlů ve Strakonické teplárně je hnědé uhlí nebo jeho směs s biomasou v poměru 60 : 40 %.

Primární a sekundární opatření

Při nastavování vzduchů se dbalo na zohlednění optimálního přebytku vzduchu s ohledem na minimalizaci tvorby NO_x. Zároveň bylo dosaženo optimálních teplot pro SNCR, tedy teplotní okno v rozmezích 800 až 950 °C. Nástřik reagentu je prováděn ve dvou výškových úrovních. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty emisí z garančního měření. Emise oxidů dusíku by neměly překročit hranici 200 mg/Nm³ a oxidu uhelnatého hranici 250 mg/Nm³.

	NO _x [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
Emise při minimálním výkonu		
Provoz kotle na uhlí	192	47
Provoz kotle na 60 % uhlí a 40 % biomasa	185	42
Emise při maximálním výkonu		
Provoz kotle na uhlí	200	127
Provoz kotle na 60 % uhlí a 40 % biomasa	198	148

Tabulka 11 - Teplárna Strakonice, emisní limity NO_x při garančním testu
Zdroj: [9]

3.7 Elektrárna Dětmarovice, primární a sekundární opatření

V Elektrárně Dětmarovice došlo jako u jedné z prvních v ČR k denitrifikace spalin pomocí CSR metody. Jako redukční činidlo je zde použit vodný roztok čpavku.

Primární a sekundární opatření

Jako primární opatření je opět využito zejména správného seřízení spalovacího procesu. Dále zde byla nově provedena recirkulace spalin, úprava a doplnění spalovacího vzduchu a snížení přísávání falešného vzduchu díky novému utěsnění práškových a plynových hořáků.

Při instalaci selektivní katalytické metody došlo k úpravě druhého tahu kotle K3 a K4, kde je umístěn katalyzátor. Došlo zde k i rozdělení EKA a to z důvodu dodržení správného teplotního pásma. Byla přepočtena geometrie usměrňujících lopatek pro správné proudění spalin přes katalytické vrstvy. Čištění katalyzátoru od prachových částic je provedeno akusticky. Účinnost této metody dosahuje v Elektrárně Dětmarovice 80 až 90 %.

Přehled výsledků garančních testů vybraných garantovaných parametrů				
Parametr	Průměrná hodnota		Maximální hodnota	Garantovaný parametr
	K3	K4		
Emisní koncentrace NO _x [mg/Nm ³]	190	196	199	200
Emisní koncentrace CO [mg/Nm ³]	22,4	19,7	25	50
Skyluz NH ₃ za kotlem [ppm]	1,8	3,6	4,6	5
Spotřeba čpavku (kapalná fáze - 100%) [kg/h]	27,1	25,17	36,3	41
Množství celkového NH ₃ v popílku [ppm]	29	41,9	-	100

Tabulka 12 – Elektrárna Dětmárovice, emisní koncentrace vybraných látek
 Zdroj: [11]

3.8 Shrnutí použitých metod

V následující tabulce č. 13 uvádím přehled výše zmíněných variant.

Zdroj	TEP Karviná	TEP Košice	ELE Počerady	ELE Poříčí
Palivo	ČU	ČU	HU	HU a ČU
Kotel	granulační	výtavný	granulační	fluidní
Jmenovitý parní výkon [t/h]	85	-	640	240
Použití metoda	1°	1°, SCR	1°, SNCR	1°
Dosažené výsledky NO _x [mg/Nm ³]	390	200	185	150
Další plánované úpravy	SNCR	-	-	-
Zdroj	ELE Prunéřov	TEP Strakonice	ELE Dětmarovice	
Palivo	HU	HU, Biomasa	ČU	
Kotel	granulační	fluidní	granulační	
Jmenovitý parní výkon [t/h]	350	36	650	
Použití metoda	1°	1°, SNCR	1°, SCR	
Dosažené výsledky NO _x [mg/Nm ³]	180	200	199	
Další plánované úpravy	-	-	-	

Tabulka 13 - Shrnutí použitých metod
Zdroj: [9, 11, 17]

Z výše zmíněného přehledu je nutno si uvědomit, že jednotlivé teplárny a elektrárny používají různá paliva, různé technologie spalování uhlí a liší se i pružností provozu. Z těchto a mnoha dalších důvodů je proto nutné používat individuální přístup ke každému jednotlivému zdroji. Každá metoda totiž funguje jinak na konkrétním kotli a při konkrétních podmínkách provozu. Dále je zde vidět, že pokud se opět sníží emisní limity pro oxidy dusíku (což je velice pravděpodobné), většina zařízení bude muset naplánovat další zásahy do svých kotlů.

4 Teplárna Otrokovice

Teplárna Otrokovice (TOT) se zabývá výrobou a rozvodem tepla a s tím souvisejícími službami, dále pak výrobou elektřiny a obchodem s ní. Tepelnou energii ve formě páry dodává průmyslovým odběratelům. Domácnostem je pak teplo pro vytápění a ohřev teplé vody dodáváno ve formě horké vody. Teplárna Otrokovice vyrábí elektrickou energii v režimu kombinované výroby elektřiny a tepla.

Celá tato kapitole čerpá ze zdroje :[8].

4.1 Historie Teplárny Otrokovice

Ve 30. letech vybuodoval Tomáš Baťa elektrárnu, která energií zásobovala areál Baťových závodů v Otrokovicích, a spolu s tím sídliště, hotel a obchodní centrum. Již v počátcích patřila elektrárna k průkopníkům mezi výrobci kombinované výroby tepla a elektřiny. S příchodem druhé poloviny 20. století a zvyšujícími se nároky na dodávky energií a ekologii se elektrárna rozšířila. V roce 1976 do provozu byly uvedeny 3 nové parní kotle a 2 protitlaké turbíny.

V roce 1992, kdy byla založena akciová společnost Teplárna Otrokovice, proběhla modernizace centrálního zásobování teplem. Byla vybudována horkovodní síť pro dodávky tepla zákazníkům v Otrokovicích a Zlíně - Malenovicích. V roce 2012 se působnost Teplárny rozšířila do Napajedel.

Rokem 2013 se stala Teplárna Otrokovice a.s. součástí skupiny Lama Energy Group, což je uskupení ryze českých firem, podnikajících ve středoevropském, asijském a severoamerickém regionu. Do skupiny patří LAMA energy a.s., specializující se na prodej plynu a elektřiny a LAMA GAS & OIL, zabývající se těžbou ropy a plynu a výstavbou těžební infrastruktury na Jižní Moravě.

4.2 Výroba tepla

Teplárna má instalovaný tepelný výkon 348,6 MWt (v provozu jsou 3 práškové uhelné kotle a 2 záložní kotle na ELTO) a dodávky tepla se pohybují kolem 1,68 mil. GJ ročně. Tepelná energie se vyrábí spalováním hnědého a černého uhlí, k podpoře využívání obnovitelných zdrojů energie se zde spaluje i biomasa.

Dodávky tepla pro průmyslové podniky tvoří 74 % celkové výroby, kam je tepelná energie dodávána ve formě páry. Největším odběratelem je Continental Barum s.r.o., největší světový výrobce pneumatik a z průmyslových podniků dále pak TOMA a.s. nebo FATRA a.s. Do bytových jednotek jde 13 % vyrobeného tepla, což pokrývá kolem 9 300 domácností v Otrokovicích, Napajedel.

jedlech a městské části Zlín – Malenovice. Stejně množství, tedy 13 %, jde i do nebytových objektů. Celková délka horkovodních a parovodních sítí je 53 kilometrů. Teplonosnými médii jsou pára a horká voda, přičemž pára slouží zejména pro technologické účely a horká voda pro zabezpečení dodávek tepla pro domácnosti.

4.3 Výroba elektřiny

Elektřina je vyráběna kogenerací (kombinovaná výroba tepla a elektrické energie), což je ekonomický a zároveň ekologický způsob. V teplárně je jedna protitlaká turbína se dvěma regulovanými odběry a jedna kondenzační turbína taktéž se dvěma regulovanými odběry. Instalovaný elektrický výkon je 50 MW. Největším odběratelem je opět společnost Continental Barum.

4.4 Ekologizace

Teplárna Otrokovice neustále investuje do své ekologizace, tj. do obnovy zařízení, zvyšování efektivity provozu a snižování dopadu na životní prostředí. V letech 2004 - 2013 dosáhla výše investic cca 1 mld. Kč. Tento centrální zdroj splňuje všechny ekologické limity, které se týkají emisí do ovzduší i dalších složek životního prostředí (vody, půdy či hlukové limity).

Teplárna Otrokovice je zařazena do Přejídného národního plánu, který stanovuje přechodné období (2016 - 2020) pro plnění zpřísněných emisních limitů a emisních stropů. Od roku 2014 tedy dochází k plánům na další rozsáhlé investice do ekologizace.

4.4.1 Přejídný národní plán – nové emisní limity a stropy

Teplárna Otrokovice byla zařazena do Přejídného národního plánu. Spalovací stacionární zdroje zařazené do PNP musí podle § 37 odst. 2 Zákona o ochraně ovzduší od 01. 01. 2016 plnit stanovené emisní limity a stropy. Do toho plánu má TOT zařazené emise NO_x a SO₂. V tabulce 5 jsou tyto nové limity uvedeny. Emise TZL a CO nebyly do přechodného plánu zařazené a musí plnit své limity od 1. 1. 2016 v plném rozsahu.

	Do 31. 12. 2015	2016	2017	2018	2019	2020
Emisní strop pro NO _x [t/rok]	864,60	864,60	864,60	626,46	376,56	188,28
Emisní strop pro SO ₂ [t/rok]	2 343,00	2 321,44	1 703,74	1 086,04	468,33	234,17

Tabulka 14 – Emisní stropy NO_x a SO₂ pro TOT dle PNP
Zdroj: [8]

4.4.2 Stávající emisní limity a stropy

V následující tabulce 15 uvádím přehled emisí za období 2012 až 2014 vykazovaných v Teplárně Otrokovice spolu s porovnáním s platnými emisními stropy a limity podle přílohy č. 2 k vyhlášce č. 415/2012 Sb. V tabulce č. 16 jsou pak uvedeny poplatky za vypouštění emisí do ovzduší.

		2012	2013	2014	ZES, ZEL
SO ₂	Vstup SO ₂ do odsíření [mg/Nm ³]	3 039	2 943	2 706	
	Výstup SO ₂ z odsiřovacího zařízení [mg/Nm ³]	1 363	1 400	1 288	1 650
	Množství naměřených emisí SO ₂ vstup [t/rok]	5 015	4 590	3 857	
	Množství naměřených emisí SO ₂ výstup [t/rok]	2 249	2 170	1 846	2 343
TZL	Vstup TZL do odsíření [mg/Nm ³]	348	561	392	
	Výstup TZL z odsiřovacího zařízení [mg/Nm ³]	4	7	10	80
	Množství naměřených emisí TZL vstup [t/rok]	577	894	570	
	Množství naměřených emisí TZL výstup [t/rok]	5	11	14	19
NO _x	Vstup NO _x do odsíření [mg/Nm ³]	405	424	457	
	Výstup NO _x z odsiřovacího zařízení [mg/Nm ³]	372	397	439	650
	Množství naměřených emisí NO _x vstup [t/rok]	671	654	650	
	Množství naměřených emisí NO _x výstup [t/rok]	612	612	625	864,6
CO	Vstup CO do odsíření [mg/Nm ³]	14	19	28	
	Výstup CO z odsiřovacího zařízení [mg/Nm ³]	12	17	25	200
	Množství naměřených emisí CO vstup [t/rok]	23	29	40	
	Množství naměřených emisí CO výstup [t/rok]	21	26	35	-

Tabulka 15 – Emise TOT za rok 2012 až 2014
Zdroj: [8]

	Rok 2012	Rok 2013	Rok 2014
Emise TZL [Kč]	16 000	45 000	59 000
Emise SO ₂ [Kč]	2 248 000	2 930 000	2 492 000
Emise NO _x [Kč]	490 000	673 000	687 000
Emise CO [Kč]	12 418 000	-	-
Celkem bez CO [Kč]	2 766 000	3 648 000	3 238 000

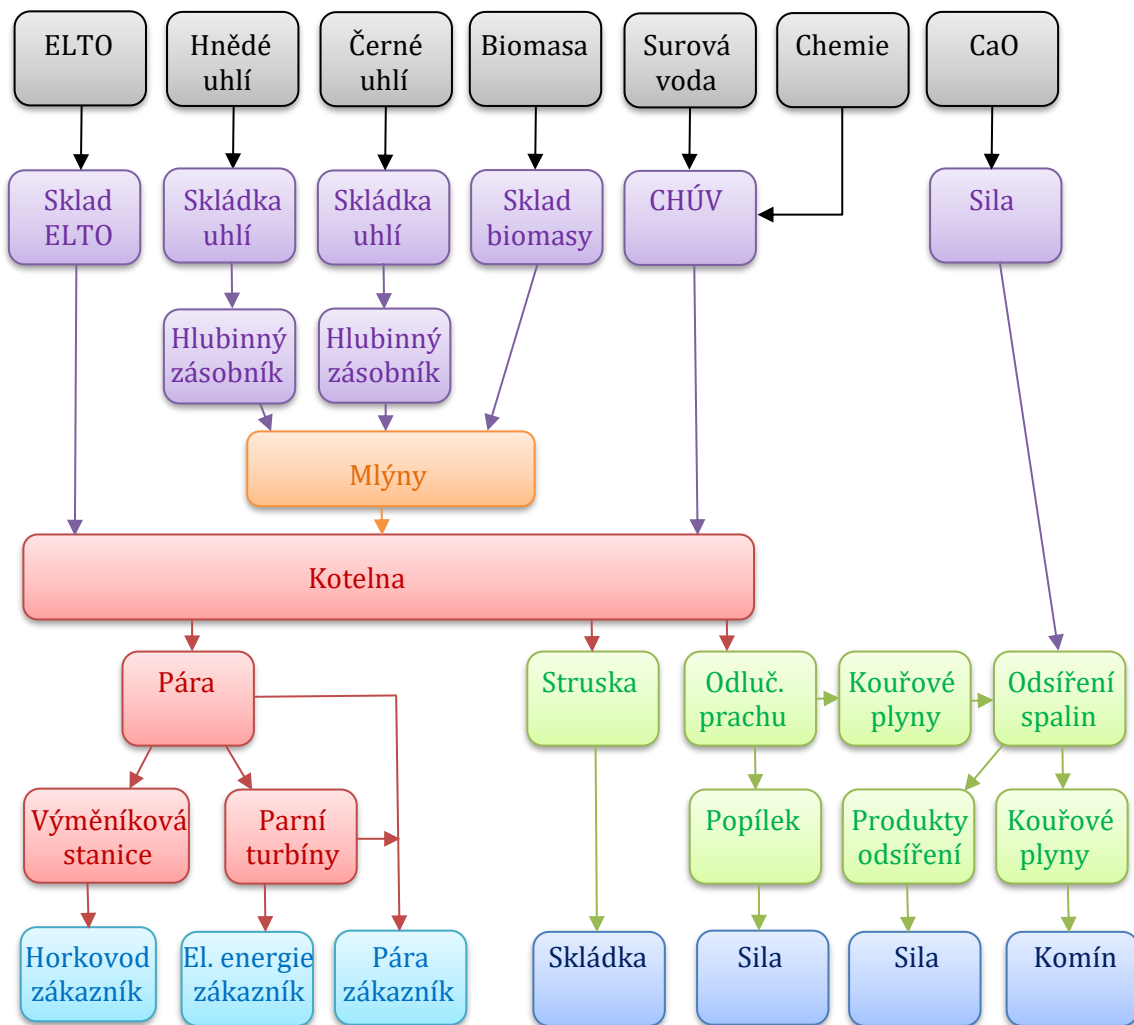
Tabulka 16 – Poplatky za emise do ovzduší za rok 2012 až 2014
Zdroj: [8]

4.5 Stávající provoz Teplárny Otrokovice

4.5.1 Stávající technologické schéma provozu

Teplárna Otrokovice funguje na třech parních uhelných práškových kotlích – označené K3, K4 a K5. Dále jsou zde instalovány dvě parní turbíny pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Jedna parní turbína je protitlaká odběrová o jmenovitém výkonu 25 MW_{EL} a druhá je kondenzační odběrová o stejném jmenovitém výkonu. TOT má také záložní zdroje na ELTO - kotle K6 a K7, které jsou vodotrubné s přirozeným oběhem. Ty mají jmenovitý výkon 2 x 18,3 MW_t.

Základní technologické schéma provozu je uvedeno na obrázku 21:



Obrázek 21 – Základní technologické schéma TOT
Zdroj: [8]

4.5.2 Zauhlování

Primárním palivem v TOT je hnědé uhlí, které je dopravováno vlakovými soupravami a ukládáno do hlubinného zásobníku s kapacitou 500 t uhlí. Odsud je soustavou pásových dopravníků dopravováno buď na otevřenou uhelnou skládku anebo do zásobníků jednotlivých kotlů. Kapacita těchto zásobníků je 240 t paliva pro jeden kotel. Spolu s hnědým uhlím je spalováno i uhlí černé (v poměru 85 : 15), které spolu tvoří palivový mix, který je spalován ve všech třech granulačních kotlích. Celkové množství spáleného uhlí je v rozmezí 250 000 až 300 000 t/rok.

Energetické uhlí

Hnědé uhlí je standardním energetickým palivem, pro které byly kotle původně navrženy. Konkrétně pro hnědé uhlí třídy HP1 435, typu Mostecký hruboprach 1 o výhřevnosti 16,5 (garantováno minimálně 14,5) MJ/kg.

Spalované černé uhlí je dvou typů. KHW od Katowicki Holding Weglowy S.A. s výhřevností 17,5 MJ/kg a OKD od Ostravsko-karvinských dolů, a.s. s výhřevností 17,3 MJ/kg.

4.5.3 Extra lehký topný olej

ELTO je u velkých granulačních kotlů K3, K4 a K5 používán jen k najetí a stabilizaci kotlů při provozu na minimálních výkonech. Čtyři olejové hořáky jsou umístěny v bočních stěnách kotle. ELTO dále slouží jako hlavní palivo pro záložní kotle K6 a K7. Do TOT je dopravován v palivových cisternách a skladován ve dvou zásobních nádržích o celkovém objemu 2 x 100 m³. Spotřeba ELTO se pohybuje v rozmezí cca 120 až 180 t/rok a jeho výhřevnost je 39,7 MJ/kg.

4.5.4 Kotle

Hlavní tři provozní kotle K3, K4 a K5 byly vyrobeny v letech 1973, 1974 a 1975 společností První brněnská strojírna, a.s. a Tenza, a.s. Do provozu byly uvedeny v roce 1976 a v letech 2008 až 2011 prošly K3 a K4 generální opravou. Kotle jsou jednobubnové, strmotrubné s přirozenou cirkulací. Z hlediska spalování jsou to kotle granulační, dvoutahové v polovenkovním provedení. Spalovací komora má čtvercový průřez a je chlazena varnými trubkami. Regulace teploty přehřáté páry je prováděna pomocí vstřikování napájecí vody.

Každý kotel má čtyři ventilátorové mlýny (průměr kola 1550 mm), které jsou dimenzovány tak, aby jmenovitého výkonu bylo docíleno jen se třemi běžícími mlýny. Primární směs s uhelným práškem proudí přes třídič, kde je hrubší frakce vracena zpět do mlýna. Dále je primární směs smíchávána se spalovacím vzduchem a vedena k práškovým hořákům (každý se

šesti hubicemi obdélníkového průřezu), které jsou umístěny v rozích spalovací komory. Spaliny jsou z kotle odváděny vzduchovým ventilátorem a přes elektronické odlučovače.

Jak již bylo řečeno, tak k najíždění a stabilizaci spalování jsou užity čtyři olejové hořáky na ELTO s plynovým zapalováním. Tyto jsou umístěny v bočních stěnách kotle. Každý hořák je vybaven přívodem horkého spalovacího vzduchu a vzduchovým ventilátorem na přívod studeného primárního vzduchu.

V následující tabulce uvádím současné parametry kotlů K3, K4 a K5.

		jednotka
Rok generální opravy kotle K3	2008, 2009	
Rok generální opravy kotle K4	2010, 2011	
Jmenovitý průtok přehřáté páry	125	t/h
Hospodárný průtok přehřáté páry	100	t/h
Minimální průtok přehřáté páry bez stabilizace	50	t/h
Jmenovitý přetlak přehřáté páry	9,32	MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	540	°C
Jmenovitá teplota napájecí vody	225	°C
Teplota spalin za kotlem	160	°C
Účinnost při jmenovitém tepelném výkonu vztážená na teplotu nasávaného vzduchu 20 °C	85	%
Jmenovitý tepelný příkon kotle	97	MW _t
Jmenovitý výkon kotle	88,3	MW _t
Mlecí okruhy	ventilátorové mlýny typ MV 155 x 36	
Počet a typ práškových hořáků	4 práškové hořáky se šesti hubicemi obdélníkového průřezu	
Zapalovací a stabilizační hořáky	4 hořáky typ SAACKE	
Výkon hořáků	cca 10 (průtok LTO 850 kg/h)	MW _t

Tabulka 17 – Parametry kotlů K3, K4 a K5
Zdroj: [8]

4.5.5 Odstruskovací zařízení

Pod spalovací komorou každého kotle je ocelová výsypka a mokrý vynašeč škváry. Těsnost spodní části spalovací komory je zajištěna tím, že ve vynašeči škváry je udržována trvalá výška hladiny vody, pod kterou je ponořena spodní část ocelové výsypky. Mokrý škvára je pak tlačnými hrably posouvána do drtiče. Odtud padá do dopravníku, který ji dopraví do zásobníku strusky. Vlhká struska je odvážena nakladačem na manipulační plochu, která je umístěna v areálu TOT o rozloze 2 370 m². Roční produkce strusky se pohybuje mezi 5 000 až 5 500 t/rok. Množství

uloženého materiálu se pohybuje kolem 4 360 t. Konstrukce dna a stěn skládky zabraňuje úniku vod do okolní půdy. Struska zde stále obsahuje asi 50 % vody a u skládky je rovněž postřikovací systém, což dohromady zabraňuje prášení. Ze skládky je struska dopravována do míchacího centra nebo do nákladních automobilů.

4.5.6 Elektroodlučovače, manipulace s popílkem

Spaliny jsou z kotlů K3 a K4 vedeny kouřovody přes elektrostatické odlučovače tuhých částí. Popílek, který je zde zachycen, je pneumaticky dopravován do mezisila a pak dále do expedičních zařízení. Roční produkce popílku je přibližně 40 000 t/rok. Množství popílku stejně jako strusky je závislé na množství spáleného uhlí a jeho kvalitativních parametrech.

4.5.7 Odsiřování spalin

Spaliny z kotlů K3 a K4 se homogenizují ve směšovací komoře, která je umístěna za elektroodlučovači. Výstupní spaliny z této komory se pak mísí se spalinami z kotle K5 v další směšovací komoře. V kouřovodu vedoucím z této komory je umístěna odběrová sonda kontinuálního měření pro zjištění koncentrace oxidu siřičitého a kyslíku před odsiřováním. Pomocí těchto hodnot (spolu s hodnotami emisí před vstupem do komína) je řízen průtok a koncentrace odsiřovací suspenze do trysek odsiřovacího reaktoru. Homogenizované spaliny za druhou směšovací komorou se dělí na dvě odsiřovací linky, kde každá z nich má průtočné množství 297 600 Nm³/h spalin.

TOT používá technologii polosuchého odsiřování spalin. Tato odstraňuje ze spalin plyny jako oxid siřičitý, oxid sírový, zčásti oxidy dusíku a chlorovodík. Odsiřovací látkou je vápenné mléko připravené z nehašeného vápna. Odsiřovací reakce je dokončena ve tkaninovém filtru, který slouží k omezení emisí vzniklých tuhých částí produktu odsiřování a zbytkového popílku. Ročně z odsiřování vzniká 7 000 až 10 000 t produktu.

Odsiřovací reaktor

V odsiřovacím reaktoru jsou pomocí vstřikování vápenného mléka do spalin snižovány emise oxidu siřičitého. Spaliny do reaktoru vstupují společným kouřovodem sedmi vstupními otvory. Ve středu každého otvoru je soustava rozprašovacích trysek, které vytváří jemnou mlhu kapiček odsiřovací suspenze. Smícháním spalin s touto mlhou nastává chemická reakce, kdy plynné sloučeniny reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku směsi vápenných solí.

Zařízení pro skladování vápna

Mleté vápno je do areálu TOT dopravováno v cisternových železničních vagonech anebo v autocisternách. V areálu je pak stáčeno do dvou příjmových sil. Užitečný objem jednoho sila je

240 m³, který je dostatečný přibližně pro 2 x 100 hodin plného provozu tří kotlů teplárny (při obvyklém obsahu síry v palivu). Ze sil je vápno dopravováno pneumatickými podavači do sil na střeše objektu, ve kterém se připravuje odsiřovací suspenze. Sila jsou v nejvyšším bodě spojena potrubní spojkou. Obě jsou vybavena třemi hladinoměry, vibrační výsypkou a bezpečnostní klapkou. U sila č.1 je také umístěn kapsový tkaninový odprašovací filtr s odsávacím ventilátorem.

Linka pro přípravu vápenného mléka

Vápenné mléko se vyrábí hašením ve dvou automatických linkách, které jsou schopny zpracovat 2 500 kg/h vápna. Obě jsou zapínány a vypínány podle hladiny zásob vápenného mléka. Každá linka stačí pro plný provoz tří kotlů teplárny (opět při průměrném obsahu síry v palivu). Druhá linka tedy slouží jako záložní pro případ poruchy nebo pro spalování uhlí se zvýšeným obsahem síry. Roční spotřeba nehašeného vápna je přibližně 5 000 t.

4.5.8 Tkaninový filtr

Tkaninový filtr zajišťuje zachycení zbytkových tuhých částic ze spalování a produkty z odsíření. Také zde dobíhá odsiřovací reakce. Filtr se skládá ze 4 oddělení výsypek a systému čistících rukávců, kde v každém oddělení je 396 rukávců, které jsou rozděleny do 22 řad. Rukávce jsou 8 m dlouhé a jejich oporu zajišťuje drátěná klec. Pro čištění filtru je použito pulzů stlačeného vzduchu. Spaliny se za tkaninovými filtry spojují do jednoho kouřovodu, kde je umístěno zařízení pro jednorázové měření a také pro kontinuální měření emisí – pro výpočet poplatků za produkci znečišťujících látek do ovzduší a k prokazování plnění emisních limitů.

4.5.9 Komín

Spaliny zbavené většiny emisí a po průchodu kontrolním kontinuálním měřením jsou vedeny kouřovodem do komína, který má výšku 172,2 m. Komín je železobetonový s vnitřní kyselinovou keramickou vložkou o průměru 3,5 m. Vložka je také vně opatřena minerální izolací o tloušťce 100 mm. Mezi izolací a dříkem komínu je vzduchová mezera.

4.5.10 Emisní monitoring

Na kotlích K3, K4 a K5 je prováděno emisní kontinuální měření. První odběrové místo je před odsiřovacím zařízením, kde jsou měřeny plynné škodliviny (SO₂, NO_x, CO), obsah kyslíku a teplota spalin. Druhé místo je za odsiřovacím zařízením před zaústěním do komína, kde se měří TZL a opět plynné škodliviny (SO₂, NO_x, CO), obsah kyslíku a teplota spalin.

4.6 Použitá primární opatření v Teplárně Otrokovice

4.6.1 Recirkulace spalin

V Teplárně Otrokovice došlo na přelomu roku 2015/16 k realizaci recirkulace spalin na kotli K3 a na přelomu roku 2016/2017 na kotli K4 (konec 5/2017). Studené spaliny z prostoru za kouřovým ventilátorem byly přivedeny zpět do mlýnských okruhů a rozvodů sekundárního vzduchu. Cílem bylo snížit tvorbu NO_x při procesu spalování o 100 mg/Nm³ a současně zlepšit podmínky při přípravě paliva a udržení koncentrace CO do 80 mg/Nm³. Teplotu a obsah kyslíku za ventilátorovými mlýny bylo třeba udržet na úrovni teploty směsi maximálně do 200 °C a do 11 % kyslíku (objemově) a to při jakémkoli provozu a s jakýmkoli definovaným palivem v definované směsi černé/hnědé uhlí. Dále je požadováno, aby nová instalace recirkulace spalin vydržela pracovat alespoň 160 000 provozních hodin s tím, že požadavek na roční využití zařízení je 8 100 hodin. [10]

Provedení recirkulace

Samotné zařízení recirkulace spalin se skládá z několika segmentů - recirkulační ventilátor, kouřovody, klapky poháněné elektropohony, kompenzátory, uložení a měření. Klapky jsou vybaveny regulačními pohony proto, aby bylo možné regulovat toky recispalin dle potřeby. Ventilátor je radiální s měřením teploty ložisek a hladina hluku 1 m od zařízení nepřekračuje hodnotu 75 dB. Kouřovody jsou kruhového průřezu a dimenzovány tak, aby v žádné jejich části nebyla překročena rychlost 15 m/s. Ke každému mlýnskému okruhu je dále přiveden rozvod inertizační páry. Ta snižuje riziko exploze v mlýnském okruhu v případě mimořádných provozních stavů a má příznivý vliv na tvorbu NO_x ve spalovací komoře. Měření emisí je prováděno před elektroodlučovačem, za spojením spalin z levého a pravého tahu.

Množství recirkulovaných spalin

Množství recirkulovaných spalin je bráno z množství spalin při nominálním provozu, které je rovno 120 000 Nm³/h. Množství spalin je samozřejmě do jisté míry závislé na spalovaném palivu. Uvedené množství 120 000 Nm³/h odpovídá množství spalin při spalování směsi černého a hnědého uhlí v poměru 30/70 % až 50/50 % při přebytku vzduchu za LUVO přibližně 1,22.

Z tohoto množství spalin je recirkulováno 10 %, tj. 12 000 Nm³/h a je jmenovitou hodnotou výkonu recirkulačního ventilátoru. Jeho pohon je řízen frekvenčním měničem, který je spolu s pohonem dimenzován na krátkodobé přetížení o 15 % nad uvedenou jmenovitou hodnotu.

Recirkulované spaliny jsou rozděleny na dvě části - první část je dopravována do mlýnských okruhů (7 200 - 8 000 Nm³/h) a druhá část do potrubí sekundárního vzduchu, tj. trasa do hořáků (4 000 - 4 800 Nm³/h).

Výsledky recirkulace

Měření emisí za kotlem je prováděno za elektroodlučovačem a před kouřovým ventilátorem. Teplota a obsah kyslíku v primární směsi jsou měřeny ve 4 potrubích za třídičem. Garanční měření na kotli K3 proběhlo v březnu 2016 na výkonnostních úrovních od 60 do 125 t/h páry a to s těmito výsledky:

	Měřící místo	Průměr z 6 měření [°C]		Měřící místo	Průměr ze 7 měření [%]
Maximální teplota primární směsi za třídičem	1	188,98	Minimální obsah kyslíku v primární směsi	1	10,41
	2	190,68		2	10,40
	3	190,44		3	11,98
				4	12,48
	Naměřená koncentrace NO ₂ bez recirkulace spalin [mg/Nm ³]	Naměřená koncentrace NO ₂ recirkulace spalin v provozu [mg/Nm ³]	Rozdíl koncentrace NO ₂ [mg/Nm ³]		
Emise NO _x ve spalinách	533,2	384,1	149,1		
	527,9	422,3	105,5		
	397,9	283,5	114,4		
	531,1	322,0	209,1		
	508,9	364,5	144,3		
	Průměr z 5 měření [mg/Nm ³]		Výsledná hodnota L _{pA} [dB]		
Koncentrace CO recirkulace spalin v provozu	53,24	Hladina akustického tlaku	69,05		

Tabulka 18 – Garanční měření po instalaci recirkulace spalin na K3

Zdroj: [10]

Z uvedených výsledků můžeme hovořit o zdařilém provedení recirkulace spalin na kotli K3. Koncentrace NO_x vznikajícího při procesu spalování se snížila v průměru o 140 mg/Nm³.

5 Výběr a návrh vhodných opatření pro snížení emisí NO_x kotlů TOT

Pro další posouzení se budu věnovat jen kotlům K3 a K4, které se TOT rozhodla zahrnout do ekologizace teplárny. Souhrnně se jedná o denitrifikaci a intenzifikaci odsíření spalin a s tím spojené zásahy do kotle. Kotel K8 z rozhodnutí provozovatele bude sloužit jako záložní na spalování zemního plynu.

Pro Teplárnu Otrokovice se mi jako vhodná varianta nabízí denitrifikace spalin pomocí úpravy spalovacího procesu podpořené selektivní nekatalytickou redukcí. Pro porovnání vhodnosti, účinnosti a ekonomičnosti této varianty ji dále srovnávám spolu s metodami SCR High-Dust a Tail-End.

Technické údaje, které uvádím v dalších kapitolách, jsou stanoveny po konzultacích s pracovníky Teplárny Otrokovice, úseku výrobního ředitele, a s vedoucím diplomové práce. Ekonomické údaje, které používám v následujících kapitolách jsou pak stanoveny na základě odhadů odborníků z TOT, oddělení investic, pro varianty, které teplárna momentálně zvažuje a jsou odvozeny z obdobných řešení na trhu. Reálná čísla se můžou měnit o 15 až 20 %, takže jsou to vypovídající hodnoty.

5.1 Zopakování dvou hlavních sekundárních metod SCR a SNCR

Selektivní nekatalytická redukce SNCR

SNCR funguje na bázi vstřikování redukčního činidla do proudu spalin v teplotním pásmu 850 - 1 100 °C. Má výrazně nižší investiční náklady než SCR a při realizaci je prostorově nenáročná. Nevýhodami této metody jsou vyšší snížení účinnosti kotle a zvýšení čpavkového skluzu. Tato metoda také není vhodná pro kotle s kolísající jakostí paliva a se střídavým zatížením.

Naproti tomu dokáže technologie SNCR obecně splnit dané emisní limity dle BAT. Současně je možno korigovat čpavkový skluz na únosných hodnotách a to jak plynného ve spalinách tak i jako obsah amonných solí v popílku, aby byl stále dále prodejný jako přísada do stavebního materiálu. Je zde velké riziko, že díky budoucímu spříšňování limitů bude tento popílek již dále neprodejný a s tím se zvednou i náklady na ukládání popílku.

Technologie SNCR v tuzemských podmínkách dosahuje účinnosti kolem 35 %. Průměrné emise oxidů dusíku po instalaci recirkulace spalin v TOT se pohybuje kolem 350 mg/Nm³. Snížení

emisí o zmíněných 35 % je tedy nedostačující a dosahuje hodnoty kolem 245 mg/Nm³. Při nevhodném seřazení SNCR metody by také mohlo dojít ke komplikacím se splnění požadavku na emise NH₃. Tuto metodu je vhodné uvažovat ve spolupráci s ostatními primárními opatřeními, na což se zaměřím v další kapitole.

Selektivní katalytická redukce SCR

SCR zaručuje dosažení žádaných emisních limitů a to při použití nástřiku redukčního činidla do spalin v rozmezí teplot 250 - 400 °C, které dále procházejí katalyzátorem. Redukce oxidů dusíku probíhá až s 90 % účinností. Dále zde umíme lépe korigovat spotřebu čpavku a dochází tak k menšímu čpavkovému skluzu. Zároveň zde dochází k menší degradaci teplosměnných ploch.

Nevýhodou SCR metody jsou zejména vyšší náklady, díky poměrně časté obměně katalyzátorů, které vydrží v průměru 3 - 4 roky. Na tomto místě je ale vhodné upozornit na to, že za posledních 10 let se cena katalyzátorů snížila přibližně o 1/3. Také musíme dbát na správné odlovení prachových částic a jiných sloučenin, které ovlivňují správnou funkci katalyzátoru a na správnou rychlost spalin (všechny tyto důvody již byly objasněny v kap. 2.3.1).

Účinnost

Z hlediska vlivu na účinnost celého oběhu je na tom lépe metoda SNCR. Zde se vlivem nástřiku vodního roztoku, zejména močoviny, do spalovací komory kotle snižuje účinnost o zhruba 0,4 až 0,8 procentního bodu. U technologie SCR Tail-End (více v kapitole 2.3.1) je vlivem zvýšení teploty spalin na konci oběhu zvýšena také komínová ztráta a to snižuje účinnost o přibližně 1,1 procentního bodu. Přívodem reagentu u této metody dále snižujeme účinnost o 0,15 procentního bodu. [12]

5.2 Technické provedení primárních opatření + SNCR

Pod pojmem primární opatření obvykle chápeme činnosti spojené s výměnou/úpravou třídičů ventilátorových mlýnů, optimalizací práškovodů a v případě nutnosti výměna samotných hořáků. Dále sem řadíme úpravy rozvodů spalovacího vzduchu a dohořivacího vzduchu a systémy měření a regulace. Systém dohořivacího vzduchu je na kotli K4 nainstalován ale nepoužíván, a na kotel K3 je nutno ho nově instalovat. Pro spalování se sníženým přebytkem vzduchu se také provádí kontrola (a náprava) netěsností výsypky kotle a vynašečů škváry, spalinového traktu, mlýnů a veškerých průzorů, kontrolních okének a průlezů do ohniště.

V Teplárně Otrokovice již došlo k instalaci recirkulace spalin na kotli K3 a nově i K4 (viz. kapitola 4.6.). K dosažení emisních limitů toto můžeme doplnit o vhodnou úpravu hořáků.

5.2.1 Úprava hořáků

Správnou regulací hořáků a spalovacího vzduchu se dají snížit emise NO_x. Nové hořáky by měly umožnit spalovat zároveň LTO i zemní plyn, a zároveň také příznivě rozložit spalovací teploty spolu se snížením emisí NO_x a nedopalu paliva.

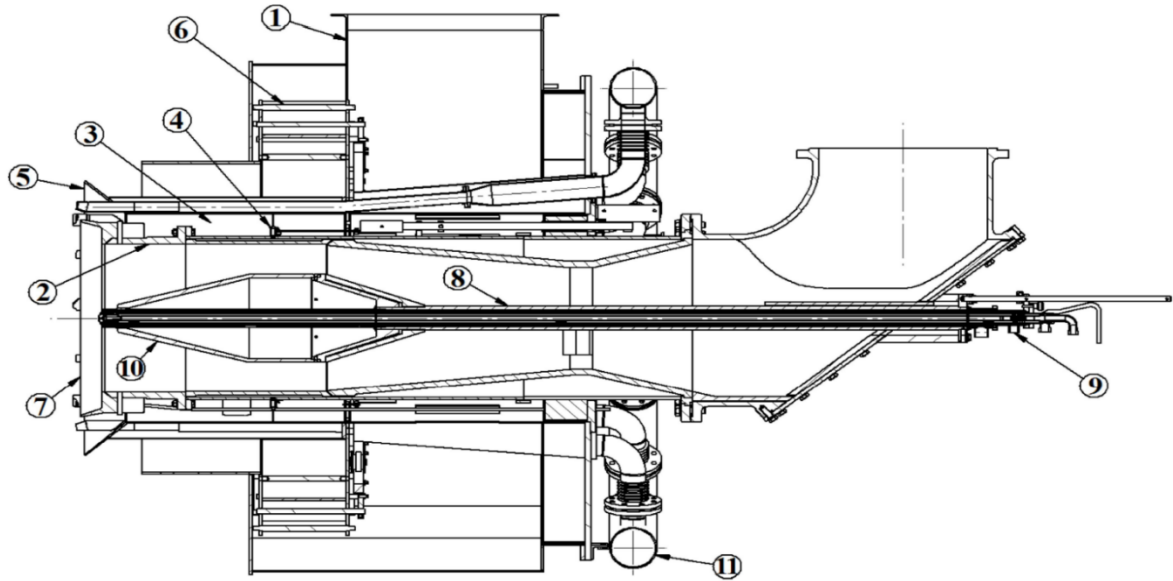
Teplárna Otrokovice počítá s variantou instalace nových nízkoemisních hořáků spolu se systémem dohořivacího vzduchu, které budou dimenzovány na spoluspalování hnědého a černého uhlí a to v již zmíněném poměru 70 : 30. Při této variantě by došlo ke snížení množství horkých spalin, protože teplota za uhelnými mlýny by se zvedla. Rozdělení vzduchu na spalovací a dohořivací by bylo nastaveno pravděpodobně v poměru 60 : 40 %. Při provozu 3 hořáků však hrozí velká nerovnováha uvnitř ohniště. To by se dalo vyřešit správným nasměrováním dohořivacího vzduchu na ten roh kotle, kde je hořák odstaven. Dále se zvedne podíl nedopalu ve strusce, což se ovšem dá doladit další optimalizací ohniště. V ohništi by se touto regulací získalo vhodné teplotní okno pro případný vstřík reagentu u SNCR metody denitrifikace. Díky vyšší výstupní teplotě spalin z ohniště bychom se dále museli zaměřit na její vliv na odpařování a přehřívání páry. Celková účinnost kotle se tímto konstrukčním řešením dle varianty A zvedne o cca 0,6 %.

Kombinované spalování uhlí a plynu

Ze strategických důvodů, díky kterým TOT zavedla přípojku zemního plynu, je žádoucí, aby nové hořáky umožňovaly jeho spoluspalování s uhlím. A to tak, že jmenovitý výkon kotle je možno dosáhnout pouze spalováním plynu.

Nové hořáky, které jsou nabízeny na trhu, jsou konstruovány tak, že plynové hořáky jsou instalovány kolem trysky s uhelným práškem. Plynové hořáky je nutno chladit vzduchem nebo spalinami a nemusí pak být při provozu kotle jen na uhlí vysouvány z prostoru ohniště. Dále je možno je užít i jako najížděcí a stabilizační hořáky. Hořák lze provozovat v podstechiometrickém provozu, což zajišťuje nižší emise dusíku o 15 až 25 % a dosahují životnosti cca 100 000 provozních hodin.

Samotná konstrukce hořáku, kdy je potřeba menší víření vzduchu, napomáhá ohništi v menší náchylnosti k vysokoteplotní korozi. Plamen je ve vzdálenosti 2 až 3 metry od ústí hořáku užší, díky čemuž se dá předcházet narážení plamene do bočních stěn kotle. Zjednodušená konstrukce hořáku pak také napomáhá jednodušší údržbě a delší životnosti. [8]



Obrázek 22 – Kombinovaný nízkoemisní NO_x hořák na uhlí a zemní plyn
Zdroj [8]

Legenda:

- 1 vzduchová skříň a nosná konstrukce
- 2 tryska uhelného prášku (primární směsi)
- 3 tryska sekundárního vzduchu
- 4 víříč sekundárního vzduchu
- 5 tryska terciálního vzduchu
- 6 víříč terciálního vzduchu
- 7 stabilizační kroužek plamene
- 8 ochranná trubka olejového hořáku
- 9 olejový hořák (je-li potřeba)
- 10 koncentrátor uhelného prášku
- 11 prstenec rozvodu plynu

5.2.2 Systém dohořivacího vzduchu

Pro uspokojivé výsledky při použití primárních opatření je třeba výměnu hořáku spojit i se správným nastavením systému dohořivacího vzduchu, tzv. OFA, společně se zlepšením regulace spalovacího procesu. Systém dohořivacího vzduchu spočívá v přívodu vzduchu nad hlavní spalovací zónu. Tento dohořivací vzduch činí 35 - 45 % z celkového množství spalovacího vzduchu. Napomáhá k vyhoření nespálených částic ve středové zóně ohniště, ke snížení emisí oxidu uhelnatého CO v přechodových provozních stavech, k urychlení spalovacího procesu a také k omezení zanášení stěn spalovací komory nad přívodem spalovacího vzduchu. Pro dobrou

funkci, tedy hlavně snižování oxidů dusíku, je potřeba dobré smíšení proudů dohořivacího vzduchu a horkých spalin. Toho je dosaženo díky speciálním OFA tryskám, které jsou navrženy tak, že není nutné přidávat pomocné ventilátory.

Teplárna Otrokovice má systém OFA nainstalován na kotli K4, přičemž se zavedením na K3 se samozřejmě počítá. Průtok vzduchu spalovacího a dohořivacího je v součtu stejný jako před instalací OFA.

5.2.3 Regulace spalovacího procesu

Správná regulace spalovacího procesu napomáhá k zajištění stabilních provozních podmínek kotlů. Touto problematikou se zabývá řada firem. Díky dnešním technologiím se dá zlepšit spalovací proces zejména v následujících dílčích fázích:

- rozdělení paliva
- kompenzace výhřevnosti paliva
- snížení vlastní spotřeby kotle
- snížení přebytku spalovacího vzduchu
- snížení rozdílů hodnot kyslíku mezi jednotlivými stranami kotle
- optimalizace CO
- regulace tlaku v kotli
- regulace výkonu při najíždění
- regulace teploty páry díky vstříkům
- regulace napájecí vody.

Všechna tato zlepšení a optimalizace přispívají ke zlepšení spalování, provozu a regulaci a také ke snížení emisí NO_x. Největší vliv na emise dusíku má snížený obsah kyslíku ve spalovací zóně.

Firmy zabývající se touto problematikou mají své vlastní systémy regulace. Obvykle jde ale o podobný rozsah zásahů do řízení spalovacího procesu.

5.2.4 Kombinace SNCR a primárních opatření

Očekávaná hodnota emisí u varianty A při použití regulace spalovacího procesu je 180 mg/Nm³. Přičemž očekávaná provozní hodnota je ve výši 170 mg/Nm³.

Při neustálém legislativním snižování emisních limitů NO_x je dále možno použít selektivní nekatalytickou metodu SNCR, kdy se očekává pokles oxidů dusíku až na hranici 120 mg/Nm³. To platí při dodržení garantovaných hodnot emisí amoniaku NH₃ ≤ 5mg/Nm³, obsahu amoniaku

a amonických solí NH₃ ≤ 100 mg/Nm³, nedopalu ve strusce max. 10 % a nedopalu v popílku max. 3 %. Pro SNCR je na výstupu z ohniště vhodné teplotní okno.

Instalace SNCR je relativně jednoduchá. Technologie SNCR zahrnuje zejména dvouplášťovou nádrž roztoku močoviny spolu s potřebnými čerpadly, potrubím a armaturami potřebnými pro stáčení močoviny. Tato nádrž je společná pro oba kotle. Dále je zde na každém kotli nutno vybudovat směšovací stanice s rozvody médií (močovina, tlakový vzduch, voda) a následný vstřikovací systém spolu s prostupy ve stěnách kotle pro vstřik reagentu, které jsou ve dvou až třech úrovních. Tyto úrovně vstřiku se přepínají v závislosti na teplotě spalin, a to tak, že je v provozu vždy jen jedna vstřikovací hladina. Teplota spalin je měřena akusticky - tento systém je téměř bezúdržbový a funguje plně automaticky. Množství směsi redukčního prostředku s vodou je regulováno tak, že v případě, kdy v oblasti jednoho vstřikovacího kopí není vhodné teplotní okno, může se toto samostatně odstavit. V případech kdy je snížená vstupní hodnota NO_x šetří toto řešení reagent, kdy vypnutím jednotlivých trysek regulujeme vstřik tak, že reagent není zbytečně nadměrně spotřebováván.

5.3 Technické provedení SCR High-Dust

Technologie High-Dust se umísťuje přímo do spalinového tahu kotle. V dnešní době je nejpoužívanějším způsobem ze SCR metod na světě a je s ní tedy nejvíce zkušeností. Tato metoda je spolehlivá a umožňuje i spalování uhlí s větším obsahem dusíku.

Protože má TOT již zpracovanou projektovou dokumentaci na technologii stáčení a skladování reagentu ve formě močoviny, budu s ní jako s reagentem počítat. Močovina se na místo dopravuje pomocí autocisteren. Velikost plánovaného zásobníku je 50 m³ což vystačí na 12 dní provozu při maximálním výkonu jednotky SCR. Ze zásobníku je dopravována do řídicí jednotky, která je řízena dle aktuálně měřených parametrů spalin před a za katalyzátorem (teplota, tlak) a úrovně NO_x na měřící mříži.

Řídicí jednotka na základě výše zmíněných parametrů ovlivňuje množství vstřikované močoviny a horkého vzduchu do tzv. odpařovacího modulu. Ten je instalován vertikálně a jsou v něm rozmístěny rozprašovací dýzy. Ty močovinu pomocí stlačeného vzduchu rozprašují do malých kapiček, které jsou unášeny proudem přiváděného horkého vzduchu (tzv. ředící vzduch). Horký vzduch je přiváděn ventilátorem a je odebírán z potrubí horkého vzduchu za ohřívákem. Vždy se instaluje ještě druhý záložní ventilátor.

Interakce horkého vzduchu a drobných kapek zajistí jejich rychlé a dokonalé odpaření, kdy se odpaří až 96 %. Směs je přiváděna na rozprašovací mříž, kde je rovnoměrně distribuována do proudu spalin. Rozprašovací mříž je umístěna mezi přehřívákem a ekonomizérem ve druhém tahu kotle.

Vlastní katalyzátor je navržen jako dvouvrstvý a je umístěn ve spalinovém traktu kotle. Vrstvy katalyzátoru se čistí akusticky. Dále jsou v katalyzátoru umístěny testovací elementy, které slouží pro sledování opotřebení a stupně vyčerpání životnosti katalyzátoru. V TOT je požadované teplotní okno mezi posledními dvěma bloky ohříváku vody. Proto je třeba upravit stávající plochy EKA tak, aby vznikl prostor pro instalaci katalyzátoru. Sníží se tím tedy celková výhřevná plocha ekonomizéru. Vzhledem k prostorům kotelny by se výstupní blok ohříváku vzduchu demontoval a přesunul do venkovního prostoru za zeď kotelny.

Nové uspořádání II. tahu kotle by tedy bylo následující:

- vstupní přehřívák páry
- vstřikovací mříž SCR
- katalyzátor
- vstupní část EKA
- výstupní díl ohříváku vzduchu
- vstupní díl ohříváku vzduchu - bude tvořit III. tah kotle.

Toto se neobejde bez velkých úprav zejména II. tahu kotle a to hlavně v oblasti spalinovodů, které umožní nové napojení přemístěného bloku ohříváku vzduchu vně kotelny. Dále je třeba instalovat nový spalinovod mezi třetím tahem kotle a vstupem do elektrostatického filtru. Tato změna si vyžaduje i změnu umístění vzduchových ventilátorů. Vzhledem k tomu, že v prostoru za kotlem není mnoho místa, musely by být umístěny uvnitř kotelny. Sací potrubí ventilátorů projde také změnou umístění. Veškeré ocelové konstrukce vně kotelny (v prostoru, kde bude instalováno přesunutě LUVO) budou odstraněny. Dojde tedy i k vybudování zcela nových ocelových konstrukcí pro uložení přesunutých bloků včetně obsluhovacích plošin přístupů. Změnou EKA dojde i ke změně vedení potrubí napájecí vody.

Druhou možnou variantou technického řešení je, že prostřední díl ekonomizéru (kde je optimální teplotní okno) by se odstranil bez náhrady a místo něj se nainstaluje katalyzátor. Zbývající EKO 1 a EKO 3 se propojí převodními trubkami. Tímto odstraněním EKA 2 dojde k mírnému posměnění tepelných poměrů v kotli, a tedy i k cca 1 % poklesu účinnosti kotle, což vede ke zvý-

šené spotřebě paliva. Proti tomu stojí metoda SNCR, při které se zvyšuje nedopal v popílku, což opět snižuje účinnost až o 1 %.

Obecně je metoda High-Dust bez velkých zásahů do tlakového celku kotle omezena malým prostorem ve druhém tahu kotle, není zde mnoho místa pro rozprašovací mříž a vhánění reagentu. Metoda může tedy být navržena tak, že je SCR doplněno o metodu SNCR. Vstřik močoviny do kotle je v sekci přehříváku v horní části spalovací komory a je navržen tak, aby zde byl jistý regulovaný únik čpavku, který pak působí jako činidlo v technologii SCR. Tímto tedy odpadá instalace vstřikování reagentu ve druhém tahu kotle. SNCR metoda v kotli sníží emise NO_x o cca 30 % a následná konverze v katalyzátoru o dalších 30 %.

Nabízí se ještě jiné řešení problému umístění katalyzátoru, a to dodat nový 1. díl ekonomizéru, který je rozměrově menší, a na uvolněné místo nainstalovat katalyzátor. Ten pomáhá udržet čpavkový skluz na zadané úrovni 5 mg/Nm³.

5.4 Technické provedení SCR Tail-End

Technologie selektivní katalytické redukce Tail-End se umísťuje mezi odsíření spalin a komín a dosahuje emisních hodnot menších jak 150 mg/Nm³. Nevyžaduje úpravy tlakové části kotle, ale je zde nutnost přehřátí spalin abychom dosáhli požadovaného teplotního okna. Přehřívání má relativně velkou spotřebu, může dosáhnout až 4 % výkonu kotle. Ohřátí spalin z teploty 75 °C na požadovanou teplotu 230 - 250 °C je provedeno pomocí regeneračního ohříváku spalin (ohřátí na cca 200 °C) následováno parním ohříváčem, který odebírá páru ze současných rozvodů v kotelně. Teplota spalin na výstupu z jednotky SCR je přibližně o 20 °C vyšší než na výstupu z odsíření, tj. cca 95 °C.

Velkou výhodou této metody je, že spaliny jsou zde již odprášené a odsířené, což má pozitivní vliv na životnost katalyzátoru. Chemické reakce probíhají v katalytickém reaktoru typu Honeycomb se dvěma katalytickými vrstvami na bázi oxidů vanadu. Odparem roztoku močoviny ve výparníku dostáváme plynný čpavek. Tento reagent je dopravován pomocí horkého vzduchu (teplota cca 250 °C) a stejně jako u metody High-Dust se vstřikuje pomocí vstřikovací mříže před katalyzátor. Pomocí směšovače spalin, který vytváří vířivé proudění, je zajištěno dostatečné promíchání reagentu a spalin. Pro usměrnění toku spalin na první katalytickou vrstvu jsou v kouřovodech instalovány usměrňovací plechy.

Díky zvětšenému odporu proudění je potřeba doplnit přídatný spalinový ventilátor, který je dimenzován na maximální možný průtok jednotkou SCR 320 000 Nm³/h. Ten je pro TOT dosta-

tečný, množství spalin při nominálním provozu jednoho kotle je rovno 120 000 Nm³/h. Dále se provádí by-pass mezi vstupním a výstupním kouřovodem, aby bylo možno jednotku SCR odstavit. Nízká teplota krystalizace močoviny vyžaduje, aby veškerá venkovní potrubí s reagentem byla elektricky ohřívána a izolována. Řízení SCR je napojeno do řídicího systému kotle.

Instalace Tail-End typu denitrifikace do Otrokovické teplárny by si vyžádala jen krátkou odstávku kotle, a to na zapojení nových kouřovodů. Dále při výměně katalytických vrstev je potřebný čas pro výměnu cca 1 týden. Předpokládaná garantovaná aktivita katalytických vrstev je 24 000 h. Množství nezreagovaného čpavku na výstupu z katalyzátoru je garantováno na hodnotě < 5 mg/Nm³. S časem se díky klesající aktivitě katalyzátoru tato hodnota zvyšuje. Když dosáhne maximální garantované hodnoty NH₃ skluzu, je katalyzátor deaktivovaný a je třeba ho vyměnit za nový, popř. zregenerovat. Aktivita zregenerovaného katalyzátoru je přibližně 80 - 95 % nového.

6 Vliv navržených opatření na provozní ukazatele Teplárny Otrokovice

Při výběru vhodného řešení je pro mě nutné přihlížet hlavně k dodržení emisních limitů, které jsou uvedeny v následující tabulce, a to za dodržení jmenovitých parametrů kotle:

- jmenovitý výkon 125 t/h
- jmenovitý přetlak 9,32 MPa
- jmenovitá teplota přehřáté páry 540 ± 8 °C.

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Emise oxidu dusíku	NO _x	≤ 180	mg/Nm ³
Emise oxidu uhelnatého	CO	≤ 100	mg/Nm ³
Emise amoniaku	NH ₃	≤ 5	mg/Nm ³
Obsah amoniaku a amonných solí	Soli NH ₃	≤ 100	mg/kg
Nedopal struska	Nedopal struska	≤ 10	%
Nedopal popílek	Nedopal popílek	≤ 3	%

Tabulka 19 – Požadované emisní limity
Zdroj: [8]

6.1 Primární opatření + SNCR

Použití primárních opatření obecně zvyšuje kvalitu spalovacího procesu a konkrétnímu úpravami lze dosáhnout zlepšení účinnosti kotle až o cca 1 %. Díky optimalizaci spalování nedochází ke zvětšení podílu nedopalu ve strusce.

Co se týče technologie SNCR, největším zásahem do tlakového celku kotle je zavedení vstřikovacích kopí. Vstřik reagentu do kotle zvyšuje nedopal v popílku a tedy dochází ke zhoršení účinnosti až o 1 %. Vlastnosti kouřových plynů však nejsou množstvím vstřikované vody a vzduchu měřitelně měněny.

6.1.1 Látkové toky

Při samostatné instalaci primárních opatření nepředpokládám žádnou změnu látkových toků v kotli. Systém dohořívacího vzduchu funguje na poměrově stejném průtoku vzduchu jako bez, a odebíráme ho ze vzduchu spalínového. Není zde potřeba přídatné procesní vody ani reagentu.

Protože několik variant řešení je s použitím sekundárních opatření formou SNCR, uvádím v následující tabulce č. 21 spotřebu jednotlivých médií. Data jsou pro jmenovitý výkon kotlů K3 a K4. U všech tří variant jsou jako primární opatření navrhovány nové nízkoemisní hořáky, systém dohořívacího vzduchu a regulace spalovacího procesu.

Varianta A garantuje požadovanou koncentraci NO_x 180 mg/Nm³, přičemž se předpokládají reálné provozní hodnoty kolem 170 mg/Nm³. Díky regulaci spalovacího procesu dojde ke 200 kW úspoře na vlastní spotřebě elektrické energie při jmenovitém výkonu.

Varianta B předpokládá snížení emisí NO_x úpravou spalovacího procesu a primárními opatřeními na hodnotu 300 mg/Nm³. Na požadovanou hodnotu 180 mg/Nm³ se dostane díky instalaci SNCR.

Varianta C počítá s předpokladem, že původní hodnotu koncentrace NO_x ve spalinách 480 mg/Nm³ sníží primárními opatřeními na 340 mg/Nm³. Další snížení je stejně jako u varianty B pomocí SNCR.

Varianta	A	B	C	Jednotka
Technologie	1° opatření	1° + SNCR	1° + SNCR	
Procesní vzduch	0	700	60	[kg/h]
Elektrická energie	- 200	10	80	[kW/h]
Reagent	0	200	220	[kg/h]
Procesní voda	0	3200	1900	[kg/h]

Tabulka 20 – Materiálové toky primárních opatření

Zdroj: [17]

6.1.2 Specifikace provozních médií

Procesní vzduch

Procesní vzduch slouží k rozstříku zředěného redukčního prostředku. Tlak se pohybuje mezi 5,5 - 9 bary v přetlaku, teplota je mezi 10 - 50 °C. Kvalitou odpovídá suchému vzduchu bez obsahu pevných částic a chemických a biologických usazenin.

Řídící vzduch

Řídící vzduch slouží k řízení pneumatických regulačních ventilů a uzavíracích armatur. Tlak: 5,5 - 9 bar v přetlaku, teplota je mezi 10 - 50 °C. Kvalita je požadována tak, aby rosný bod byl níže než 3 °C, kdy je to suchý vzduch bez obsahu pevných částic a oleje.

Procesní voda

Voda slouží k ředění redukčního prostředku. Tlak: 5 - 9 bar v přetlaku, teplota 10 - 30 °C. Kvalitou je to voda filtrovaná bez obsahu pevných částic a chemických a biologických usazenin.

Redukční prostředek

Redukčním prostředkem uvažujeme močovinu ve formě 45 % roztoku. Čpavek sice lehce zvyšuje účinnost sekundárních opatření a je zde možnost snížení investičních nákladů, ale při úniku je zdraví nebezpečný. Dalším faktorem je to, že TOT již postupuje určité legislativní kroky k možnosti používání močoviny.

Elektrická energie

Největší položka ve spotřebě elektrické energie je její užití pro akustické měření teploty ve spalovací komoře.

6.1.3 Zásahy do tlakového celku kotle

Všechny varianty jsou navrženy tak, aby se maximálně využilo stávající konstrukce a zařízení pro minimalizaci pracovních a stavebních činností. Nikdy se ale nevyhneme zásahům do tlakové části kotlů K3 a K4. Varianty také počítají se zprovozněním systému dohořivacího vzduchu na kotli K4 a s jeho novým zavedením na kotel K3. To si žádá zásahy v oblasti výparníku, a to pro umístění nových trysek a také nových nízkoemisních hořáků.

6.1.4 Možné problémy vzniklé užitím 1^o + SNCR

Protože počítáme s výkonem kotle od 60 do 125 tun páry za hodiny, mohlo by dojít k problému s udržení emisí NO_x pod 180 mg/Nm³ a současném dodržení čpavkového skluzu menším jak 5 mg/Nm³. V případě většího skluzu by mohly být problémy s využitím produktu po denitrifikaci. To je možno vyřešit instalací přídatného katalyzátoru do druhého tahu kotle, který bude fungovat v režimu SCR. Toto řeším v kapitole 6.2., kde to zařazuji vedle varianty E, která počítá s použitím primárních opatření a SCR High-Dust.

Použitím SNCR metody také často dochází k problémům s dodržení požadavku nedopalu v popílku a může tak dojít ke snížení účinnosti kotle až o 1 %.

6.2 SCR High-Dust

Hlavní výhodou SCR metody je velká nezávislost na provozu kotle a menší spotřeba reagentu. Protože je vhodné teplotní okno v druhém tahu mezi dvěma díly ekonomizéry, instalace této SCR metody je značně složitá. Instalace katalyzátoru nám ale zaručí udržení čpavkového skluzu v požadované normě.

6.2.1 Látkové toky

SCR metoda High-Dust značně snižuje spotřebu reagentu - močoviny. Opět v následující tabulce č. 21 uvádím spotřeby jednotlivých médií. Varianty D a E jsou vedeny jako primární opatření, nástřik močoviny do kotle a instalace katalyzátoru pro snížení/korigování čpavkového skluzu, čímž odpadá vstřikovací mříž reagentu.

Varianta	D	E	F	Jednotka
Technologie	1° + SNCR + SCR	1° + SNCR + SCR	1° + CSR High-Dust	
Procesní vzduch	40	900	170	[kg/h]
Elektrická energie	20	40	40	[kW/h]
Reagent	120	150	130	[kg/h]
Procesní voda	1900	1800	1800	[kg/h]

Tabulka 21 – Materiálové toky primárních opatření + SCR
Zdroj: [17]

Porovnáním výše zmíněných hodnot s hodnotami v tabulce č. 20, vidíme, že spotřeba močoviny je oproti SNCR metodě zhruba 63 %, počítám-li s průměrnými hodnotami z obou technologií. Tato úspora výrazně ovlivní provozní roční náklady, jak bude uvedeno v kapitole 7.

6.2.2 Specifikace provozních médií

Procesní vzduch

Procesní vzduch slouží k rozstříku zředěného redukčního prostředku. Tlak se pohybuje mezi 6 - 9 bary v přetlaku, teplota je mezi 10 - 50 °C. Kvalitou odpovídá suchému vzduchu bez obsahu pevných částic a chemických a biologických usazenin. Vzduch je odebírán z potrubí horkého vzduchu za ohřívacem vzduchu. Dále slouží k ofukování katalyzátoru proti hromadění popela v jeho horní části.

Řídicí vzduch

Řídicí vzduch slouží k řízení pneumatických regulačních ventilů a uzavíracích armatur. Tlak: 6 - 9 bar v přetlaku, teplota je mezi 10 - 50 °C. Kvalita je požadována tak, aby rosný bod byl níže než 3 °C, kdy je to suchý vzduch bez obsahu pevných částic a oleje.

Procesní voda

Voda slouží k ředění redukčního prostředku. Tlak: 6 - 8 bar v přetlaku, teplota 10 - 30 °C. Kvalitou je to voda filtrovaná bez obsahu pevných částic a chemických a biologických usazenin.

Redukční prostředek

Redukčním prostředkem uvažujeme močovinu ve formě 45 % roztoku.

6.2.3 Zásahy do tlakového celku kotle

Jak bylo popsáno v kapitole 5.2 instalací katalyzátoru dojde ke značné změně 2. tahu kotle. Ve variantě D je navrženo úplné odstranění EKA 2, což vede až k 1 % snížení účinnosti kotle. Varianta E počítá s umístěním katalyzátoru mezi stávající ekonomizéry s tím, že LUVO bude přemístěno za stěnu kotelný. Je nutno rozměrově předělat 1. a 2. EKO tak, aby vznikl potřebný prostor pro katalyzátor. Varianta F počítá se zmenšením plochy EKA.

Všechny 3 způsoby vedou k menšímu ochlazení spalin, což má za následek snížení účinnosti kotle.

6.2.4 Možné problémy vzniklé užitím 1° + SNCR + SCR

Díky instalaci katalyzátoru dojde k navýšení tlakové ztráty na straně spalin. Zvýšením aerodynamického odporu dojde k situaci, kdy by byl spalinový ventilátor provozován blízko svého maxima. Je tedy nutno udělat testy a v případě nutnosti upravit provozní bod ventilátoru, a nebo ho zcela vyměnit za nový, výkonnější.

6.3 SCR Tail-End

Při instalaci katalyzátoru mezi odsíření spalin a komín je nutné ohřívat spaliny. Na výstupu z odsíření mají teplotu cca 75 °C a teploty vhodné pro chemickou reakci na katalyzátoru jsou v rozmezí 230 až 250 °C. Výhodou je však delší životnost katalyzátoru, díky tomu, že není omílán prachovými částicemi. Tento fakt se zásadně projeví v ekonomické rozvaze v kapitole 7. Instalace sekundárních opatření neovlivní nedopal ve strusce a ani v úletovém popílku, ani O₂.

6.3.1 Látkové toky

Varianta G počítá s použitím pouze metody SCR, tedy bez použití primárních opatření. Jako jediná bude katalyzátor provozovat na snížení oxidů NO_x z 450 mg/Nm³ na požadovanou hodnotu, přičemž se očekávají výsledky až 150 mg/Nm³.

Varianta	G	Jednotka
Technologie	SCR Tail-End	
Procesní vzduch	200	[kg/h]
Elektrická energie	700	[kW/h]
Reagent	180	[kg/h]
Procesní voda	1000	[kg/h]

Tabulka 22 – Materiálové toky SCR Tail-End
Zdroj: [17]

Spotřeba páry na SCR činí při jmenovitém výkonu obou kotlů až 11 t/h, tedy 4,4 % z celkového množství páry. U této metody odpadá čištění katalyzátoru parním ofukovačem, a to díky malému množství popílku ve spalinách.

Zvýšené množství elektrické energie je z části dáno nutností elektrického ohřevu veškerých venkovních tras dopravního potrubí močoviny. Dopravní vzduchu je ohříván až na 250 °C.

6.3.2 Specifikace provozních médií

Procesní vzduch

Procesní vzduch slouží k rozstříku zředěného redukčního prostředku. Tlak se pohybuje mezi 6 - 9 bary v přetlaku, teplota je mezi 10 - 50 °C. Kvalitou odpovídá suchému vzduchu bez obsahu pevných částic a chemických a biologických usazenin. Vzduch je odebírán z potrubí horkého vzduchu za ohříváčem vzduchu.

Řídicí vzduch

Řídicí vzduch slouží k řízení pneumatických regulačních ventilů a uzavíracích armatur. Tlak: 6 - 9 bar v přetlaku, teplota je mezi 10 - 50 °C. Kvalita je požadována tak, aby rosný bod byl níže než 3 °C, kdy je to suchý vzduch bez obsahu pevných částic a oleje.

Procesní voda

Voda slouží k ředění redukčního prostředku. Tlak: 6 - 8 bar v přetlaku, teplota 10 - 30 °C. Kvalitou je to voda filtrovaná bez obsahu pevných částic a chemických a biologických usazenin.

Redukční prostředek

Redukčním prostředkem uvažujeme močovinu ve formě 45 % roztoku.

6.3.3 Zásahy do tlakového celku kotle

Instalace katalyzátoru je až za tlakovým celkem kotle.

6.3.4 Možné problémy vzniklé užitím SCR

Díky instalaci katalyzátoru dojde k navýšení tlakové ztráty na straně spalin. Zvýšením aerodynamického odporu dojde k situaci, kdy by byl spalinový ventilátor provozován blízko svého maxima. Je tedy nutno udělat testy a v případě nutnosti upravit provozní bod ventilátoru, a nebo ho zcela vyměnit za nový výkonnější.

Dlouhé nahřívání ohříváku vzduchu způsobuje, že najetí na ustálené parametry emisí trvá delší dobu a to od desítek minut až po hodiny. Porucha elektrického nahřívání venkovního potrubí s močovinou může způsobit velké problémy. Teplota krystalizace močoviny je cca 20 °C. To samé se týká i nádrže reagentu. Teplota spalin na výstupu ze SCR je o 20 °C vyšší než při stávajících opatřeních (tj. 95 °C).

6.4 Shrnutí variant

V tabulce 24 uvádím přehled a shrnutí jednotlivých řešení. Ta jsem opět rozdělila do 3 skupin, které jsou seskupeny jako: skupina primárních opatření s variabilním nástřikem močoviny do kotle SNCR - A, B, C, druhá skupina obsahuje varianty s primárními opatřeními a sekundárními ve formě katalyzátoru High-Dust - D, E, F, a poslední skupinu tvoří pouze jedna varianta, a to sekundární opatření formou SCR katalyzátoru typu Tail-End. Z předchozího technického vysvětlení je vidět, že porovnávat Tail-End katalyzátor s Typem High-Dust objektivně nelze.

Nabídka	A	B	C	D	E	F	G	jednotka
Primární opatření	✓	✓	✓	✓	✓	✓		-
Předpokládaný obsah NO _x před vstupem do 2° opatření	180	300	340	300	300	350	450	mg/Nm ³
Sekundární opatření		✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
SNCR		✓	✓	✓	✓			-
SCR katalyzátor				✓	✓	✓	✓	-
SCR katalyzátor kvůli čpavkovému skluzu				✓	✓			-
Garantovaná hodnota NO _x po denitrifikaci	180	180	180	180	180	180	150	mg/Nm ³

Tabulka 23 - Shrnutí jednotlivých variant
 Zdroj: [17]

Všechny varianty splňují závazek emisních limitů pod hranici 200 mg/Nm³, u varianty G se dle zkušeností očekává snížení oxidů dusíku až na hranici 150 mg/Nm³. Stejně tak se u varianty A očekávají nižší provozní hodnoty, a to kolem 170 mg/Nm³.

Druhá skupina řešení kombinuje použití High-Dust katalyzátoru hlavně kvůli čpavkovému skluzu, protože hodnoty NO_x sníží díky nástřiku močoviny do spalovacího prostoru spolu s použitím primárních opatření. Hodnota emisí dusíku na vstupu do katalyzátoru u varianty F je tedy vyšší – dá se očekávat jeho rychlejší vyčerpání a častější regenerace. To ovšem z hlediska zkušeností z provozu katalyzátorů nesouhlasí, protože jak je vidět z tabulky č. 25 v kapitole 7.1, varianta F počítá s nejdelsí životností z použitých katalyzátorů. Tomuto problému se dál věnuji v kapitole 8.

7 Ekonomické posouzení a výběr nejvhodnějšího řešení

V této kapitole jsem zpracovala vstupní hodnoty variant A až G, které jsou zmíněny v kapitole č. 6 a v tabulce č.25. Dále jsem pomocí konkrétních cen elektrické energie, stlačeného vzduchu a procesní vody z Teplárny Otrokovice vypočetala materiálové toky pro kotle K3 a K4. Pro další porovnání jsem udělala i procentuální porovnání jednotlivých položek nákladů u každé varianty, jak je vidět v grafu č. 9. Tato data jsem pak použila pro citlivostní a rizikovou analýzu.

Pro dlouhodobé porovnání jsem vybrala dobu 20 let, která je pro investice ve „velké“ energetice odpovídající dobou. Dalším mým krokem pak je výpočet cen katalyzátorů v průběhu 20 let, jejich výměny a vlivu na celkovou investici. Podrobný výpočet je zobrazen v tabulce č. 26. Vše jsem počítala s 2 % inflací, která přibližně odpovídá průměru za období od 10/2016 do 4/2017.

U katalyzátorů jsem dále pro citlivostní analýzu použila stejnou cenu pro katalyzátory u varianty High-Dust, kterou jsem vypočetala z průměrných cen. Podrobnosti jsou v kapitole 7.3.2.

Pro porovnání projekčních variant jsem použila hodnocení z hlediska investora a taková, která mi pomohla při sestavování pořadí posuzovaných variant. Jsou to takzvaná hodnotící kritéria technicko-ekonomické efektivity, ze kterých jsem použila cash flow a kumulované cash flow projektu s diskontní sazbou 0,05 %, která je oficiální úrokovou sazbou ČNB již od 31. 12. 2012. [15]. Vnitřní výnosové procento a dobu návratnosti jsem nepoužila z důvodu, že kromě varianty A jsou všechny neziskové. Možným problémům s variantou A se věnuji dále v kapitole 8.

7.1 Vstupní údaje

Pro ekonomické hodnocení denitrifikace spalin jsem použila následující vstupní hodnoty. Varianty jsem opět rozdělila do 3 skupin – první skupina obsahuje metody primárních opatření a případné katalyzátory na čpavkový skluz, druhá skupina jsou 3 řešení na bázi technologie SCR High-Dust a poslední, třetí skupina, je metoda SCR Tail-End.

Základní provozní údaje		
Doba provozu K3 a K4 na jmenovitý výkon	h/r	6 800, 5 100
Průtok spalin K3, K4	Nm ³ /h	320 000
Průtok páry	t/h	250
Obsah NO _x na vstupu do 2 ^o	mg/Nm ³	dle varianty
Garantovaná hodnota NO _x	mg/Nm ³	dle varianty
Potřeba páry na SCR	t/h	dle varianty
Jednotkové ceny		
Reagent, 40 % vodný roztok močoviny	Kč/t	5 000
Elektrická energie	Kč/MWh	980
Stlačený vzduch	Kč/Nm ³	0,20
Procesní voda	Kč/kg	0,012

Tabulka 24 – Vstupní údaje pro ekonomické hodnocení
 Zdroj: [8]

Předpokládaná doba provozu kotlů K3 a K4 dle TOT je 11 800 až 12 000 hodin provozu. V roce 2016 byla na kotli K3 reálná doba provozu 6 352 hodin a na kotli K4 byla 4 656 hodin. Provozní počet hodin pro mé výpočty jsem stanovila tak, že jsem k reálnému provozu přičetla 450 hodin, tj. 11 900 provozních hodin v součtu pro oba kotle.

Cenu technické močoviny jsem použila 5000 Kč/t (včetně dopravy). Trend ceny močoviny je dlouhodobě klesající. Producenti močoviny jsou pouze ze zahraničí a obchod tedy probíhá v eurech. Díky ukončení intervencí ČNB se kurz Eura vůči koruně snížil a je otázka, jaký trend nabere v budoucnu. Kurz koruny ku Euru ve výpočtech je k 20. 5. 2017 26,50 Kč/Eur [15]. Firmy nabízející močovinu spekulují až o ceně 4 500 Kč/t.

Dále jsem pro celkové hodnocení použila materiálové toky (procesní vzduch, elektrická energie, reagent, procesní voda) za rok a jejich roční ceny pro TOT, které jsou vidět v tabulce č. 24. Odhadnuté ceny dodávek spolu s cenami materiálových toků jsou zobrazeny v tabulce č. 25.

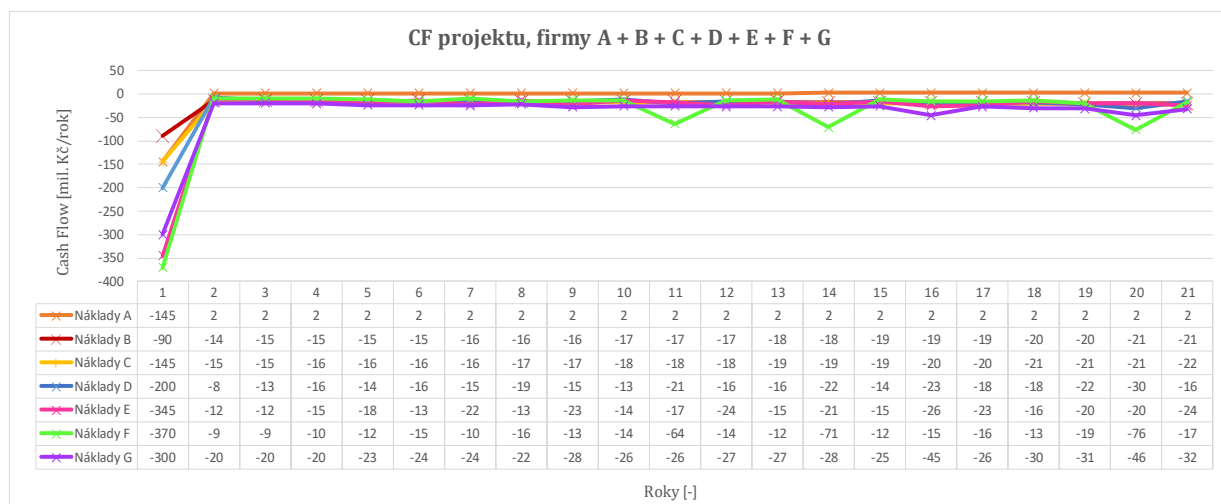
		1°, dohořivací vzduchy, spalovací proces, regulace řídícího systému	1°+ SNCR	1° + SNCR	1° + SNCR + SCR na čpavkový skluz High Dust	1° + SNCR + SCR na čpavkový skluz High- Dust	1° + SCR High Dust, EKO vně kotelnu	Tail End SCR	
Základní provozní údaje		A	B	C	D	E	F	G	
Doba provozu K3 na jmenovitý výkon	h/r	6 800	6 800	6 800	6 800	6 800	6 800	6 800	
Doba provozu K4 na jmenovitý výkon	h/r	5 100	5 100	5 100	5 100	5 100	5 100	5 100	
Průtok spalin K3, K4	Nm ³ /h	320 000	320 000	320 000	320 000	320 000	320 000	320 000	
Pára	t/h	250	250	250	250	250	250	250	
Obsah NOx před denitrifikací	mg/Nm ³	450	430	480	430	450	400	450	
Obsah NOx na vstupu do 2°	mg/Nm ³	180	300	340	300	300	350	450	
Garantovaná hodnota NOx	mg/Nm ³	180	180	180	180	180	180	150	
Jednotkové ceny		A	B	C	D	E	F	G	
Reagent, 40 % vodný roztok močoviny	Kč/t	0	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	
Elektrická energie	Kč/MWh	980	980	980	980	980	980	980	
Stlačený vzduch	Kč/Nm ³	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
Procesní voda	Kč/kg	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	
Materiálové toky pro oba kotle		Materiálové toky pro oba kotle							
Procesní vzduch	kg/r	0	8 330 000	714 000	476 000	10 710 000	2 023 000	2 380 000	
Elektrická energie	MWh/r	-2 380	119	952	238	476	476	8 330	
Reagent pro 2 kotle	t/r	0	2 380	2 618	1 428	1 785	1 547	2 142	
Procesní voda	kg/r	0	38 080 000	22 610 000	22 610 000	21 420 000	21 420 000	11 900 000	
Náklady		Náklady							
Reagent, 40 % vodný roztok močoviny	Kč/r	0	11 900 000	13 090 000	7 140 000	8 925 000	7 735 000	10 710 000	
Elektrická energie	Kč/r	-2 332 400	116 620	932 960	233 240	466 480	466 480	8 163 400	
Procesní voda	Kč/r	0	456 960	271 320	271 320	257 040	257 040	142 800	
Stlačený vzduch	Kč/r	0	1 296 498	111 128	74 086	1 666 926	314 864	370 428	
Regenerace katalyzátorů, průměr	Kč/r	0	0	0	7 183 844	3 812 705	10 582 277	3 738 128	5 875 291
Cena provozních médií + katalyzátory	Kč/r	-1 646 857	14 270 078	14 905 408	15 402 489	15 628 151	19 855 661	23 624 756	
Údržba a provoz	Kč/r	685 543	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	
Cena dodávky od zhotovitele	Kč	145 000 000	90 000 000	145 000 000	200 000 000	345 000 000	370 000 000	300 000 000	

Tabulka 25 - Náklady
Zdroj: [17]

7.2 Provozní náklady

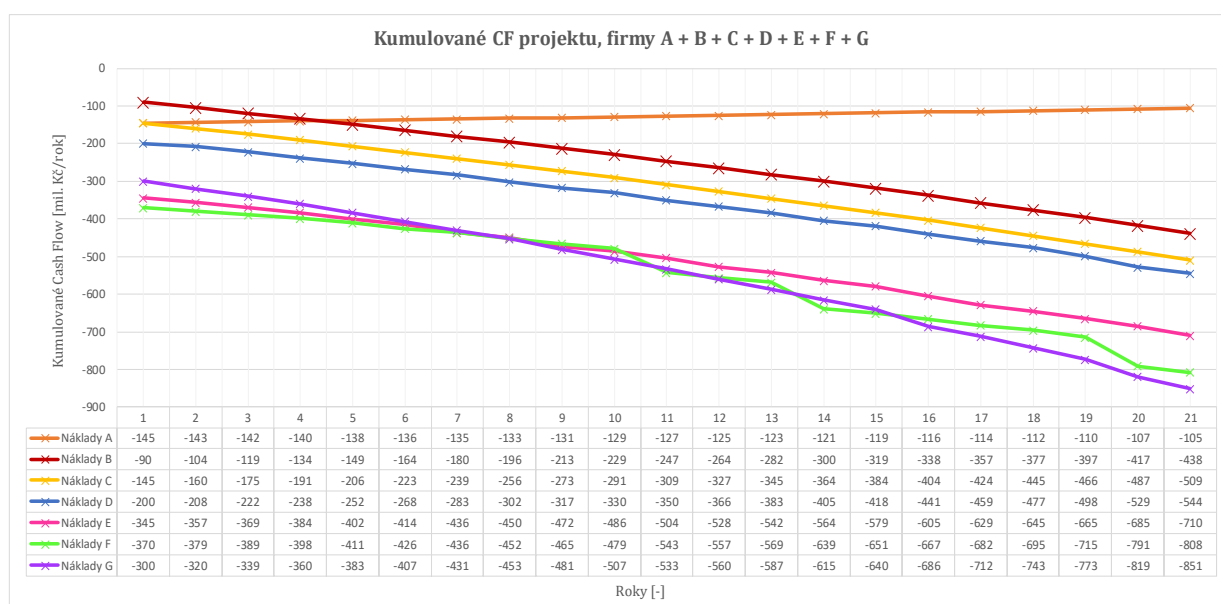
Na následujícím grafu je vidět prosté cash flow projektu. Náklady jsou počítané na 20 let a s 2 % inflací. Liší se zejména vstupní náklady. Dále můžeme sledovat vývoj provozních nákladů, které se v prvním roce pohybují mezi 8 a 19 miliony Kč a v poslední roce se díky inflaci pohybují mezi 16 a 32 mil. Kč.

Jediná varianta, která šetří provozní náklady je varianta A, kdy se očekává snížení vlastní spotřeby elektrické energie. To dává úsporu 2 mil. Kč ročně.



Graf 8 – Cash flow projektu
 Zdroj: [17]

Na dalším grafu 9 je znázorněno kumulované cash flow pro všechny varianty. Vidíme, že největší celkové náklady má varianta G, tedy Tail-End. Ty dosahují po 20 letech provozu výše až 843 mil. Kč. Je to dáno zejména velkou spotřebou elektrické energie, která je potřebná na ohřev veškerého venkovního potrubí s močovinou, a také pro zvýšený výkon ventilátoru.



Graf 9 – Kumulované cash flow projektu
 Zdroj: [17]

Jediná varianta, která není v porovnání jen dle cash flow čistě minusová, je varianta A - tedy použití jen primárních opatření. Samozřejmě při reálném porovnání variant by se počítalo i s rozdělením odpisů do cen tepla a elektrické energie a výsledky by pak byly jiné. Na takové porovnání bohužel nemám přístupná data.

7.3 Katalyzátory

Velkou položkou nákladů, jak pořizovacích, tak i ročních provozních, jsou katalyzátory. Týkají se samozřejmě 2. a 3. skupiny řešení, která používají sekundární opatření pro snížení oxidů dusíku. Pro vyhodnocení jsem použila údaje o jejich životnosti, životnosti po regeneraci, celkový možný počet regenerací, ceny jedné regenerace a ceny nového katalyzátoru. Cena nových katalyzátorů, stejně tak i jejich regenerace je počítána s 2 % inflací.

Z tabulky č. 26 je vidět, že cena katalyzátorů je nejvyšší u varianty F, kde se ze zkušeností počítá s nejvyšší cenou katalyzátorů. Ze skupiny High-dust katalyzátorů vychází nejlevněji varianta E, která ovšem počítá až s dvoujásobnou životností katalyzátorů oproti variantě D. Z tohoto důvodu jsem spočítala ještě průměrnou cenu a dobu výměny katalyzátoru.

Pro výpočet výměny katalyzátorů se stejnou dobou životností jsem použila průměrné doby jejich životnosti před i po regeneraci, zprůměrovala jsem možný počet regenerací a stejně tak i cenu. Toto porovnání jsem udělala jen pro druhou skupinu řešení, tedy jen pro selektivní katalytickou redukci typu High-Dust. Pro metodu Tail-End jsem toto porovnání nedělala z toho důvodu, že varianta na umístění katalyzátoru do odprášeného proudu spalin je jen jedna, a není tedy objektivně možné ji porovnat s jinými. Grafické znázornění je uvedeno v kapitole 7.3.2.

V tabulce č. 27 vidíme, že pro průměrnou porovnávací cenu a dobu využití katalyzátorů se cena sníží pro řešení D a F, přičemž pro řešení E se naopak lehce zvýší.

	1° + SNCR + SCR na čpavkový skluz High-Dust	1° + SNCR + katalyzátor ve 2. tahu na čpavkový skluz	1° + SCR High Dust; EKO vně kotelnu	Tail End SCR
Základní provozní údaje	D	E	F	G
Doba provozu K3 na jmenovitý výkon h/r	6 800	6 800	6 800	6 800
Doba provozu K4 na jmenovitý výkon h/r	5 100	5 100	5 100	5 100

Katalyzátory		D	E	F	G	Katalyzátory se stejnou dobou využití, cenou		
Životnost	hod	8 000	16 000	24 000	24 000	Životnost	hod	16 000
Životnost po regeneraci	hod	6 000	10 000	10 000	12 000	Životnost po regeneraci	hod	8 667
Možný počet regenerací	ks	4	2	4	6	Možný počet regenerací	ks	3
Cena jedné regenerace	Kč	2 499 000	2 500 000	2 400 000	2 356 000	Cena jedné regenerace	Kč	2 466 333
Nový katalyzátor	Kč/ks	6 500 000	5 500 000	44 000 000	12 500 000	Nový katalyzátor	Kč/ks	18 666 667

Katalyzátory - provozní náklady, cash flow		nový katalyzátor										
roky	hodiny K3	hodiny K4	K3	K4	K3	K4	K3	K4	K3	K4	K3	K4
1	6 800	5 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	13 600	10 200	2 548 980	2 548 980	0	0	0	0	0	0	0	0
3	20 400	15 300	5 197 920	2 598 960	2 600 000	0	0	0	0	0	0	0
4	27 200	20 400	2 648 940	2 648 940	2 650 000	2 650 000	2 544 000	0	2 497 360	0	2 564 987	0
5	34 000	25 500	7 035 809	0	0	0	2 592 000	2 592 000	0	2 544 480	2 663 640	0
6	40 800	30 600	2 748 900	2 748 900	6 072 444	2 750 000	0	0	2 591 600	0	2 712 967	2 712 967
7	47 600	35 700	2 798 880	7 320 056	0	0	2 688 000	2 688 000	0	0	2 762 293	0
8	54 400	40 800	2 848 860	2 848 860	2 850 000	6 317 771	2 736 000	0	2 685 840	2 685 840	0	2 811 620
9	61 200	45 900	2 898 840	0	0	0	0	2 784 000	2 732 960	0	21 870 975	0
10	68 000	51 000	7 768 102	2 948 820	2 950 000	0	52 584 073	0	0	2 780 080	0	2 910 273
11	74 800	56 100	2 998 800	2 998 800	6 704 469	3 000 000	0	2 880 000	2 827 200	0	2 959 600	22 754 563
12	81 600	61 200	3 048 780	3 048 780	0	0	0	0	0	2 874 320	0	0
13	88 400	66 300	3 098 760	8 243 572	3 100 000	3 100 000	2 976 000	55 802 639	2 921 440	0	3 058 253	0
14	95 200	71 400	3 148 740	0	0	0	0	0	0	0	3 107 580	0
15	102 000	76 500	8 576 612	3 198 720	3 200 000	7 257 133	3 072 000	0	16 493 485	3 015 680	0	3 156 907
16	108 800	81 600	3 248 700	3 248 700	7 402 276	0	3 120 000	0	0	0	3 206 233	0
17	115 600	86 700	3 298 680	3 298 680	0	0	0	0	0	3 109 920	25 625 333	3 255 560
18	122 400	91 800	6 697 320	3 348 660	0	3 350 000	3 216 000	3 216 000	3 157 040	0	0	0
19	129 200	96 900	9 283 601	9 283 601	3 400 000	0	62 842 835	0	0	17 853 078	0	3 354 213
20	136 000	102 000	3 448 620	0	3 450 000	3 450 000	0	3 312 000	3 251 280	0	3 403 540	0
			83 343 843	60 333 028	44 379 190	31 874 904	138 370 908	73 274 639	39 158 205	34 863 398	73 935 402	43 570 416
			143 676 871		76 254 094		211 645 547		74 021 603		117 505 817	

Tabulka 26 – Katalyzátory, regenerace a cena
Zdroj: [14]

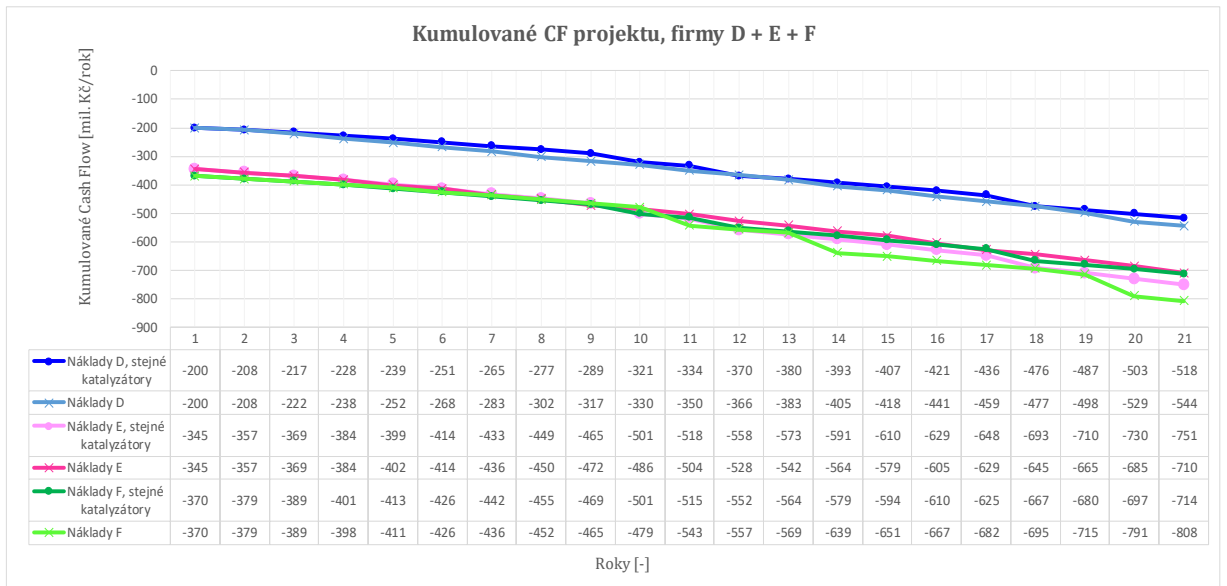
7.3.1 Stejné katalyzátory pro High-Dust varianty

Protože velkou položkou v nákladech je cena katalyzátorů, tak jsem pro porovnání variant s technologií High-Dust srovnala ceny regenerace katalyzátorů, tj. použila jsem stejnou dobu provozních hodin před a po regeneraci, stejně jako i cenu. Cenu a provozní hodiny jsem určila jako průměr z variant High-Dust.

Katalyzátory se stejnou dobou využití, cenou		
Životnost	hod	16 000
Životnost po regeneraci	hod	8 667
Možný počet regenerací	ks	3
Cena jedné regenerace	Kč	2 466 333
Nový katalyzátor	Kč/ks	18 666 667

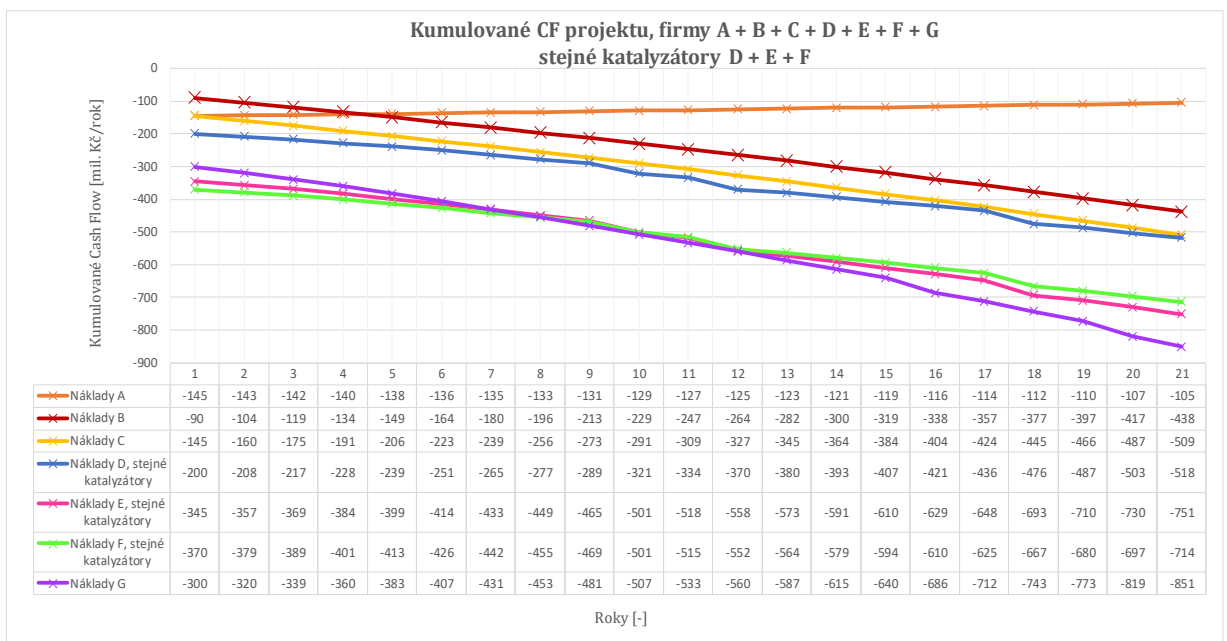
Roky	K3	K4
1	0	0
2	0	0
3	2 564 987	0
4	0	2 614 313
5	2 663 640	0
6	2 712 967	2 712 967
7	2 762 293	0
8	0	2 811 620
9	21 870 975	0
10	0	2 910 273
11	2 959 600	22 754 563
12	0	0
13	3 058 253	0
14	3 107 580	0
15	0	3 156 907
16	3 206 233	0
17	25 625 333	3 255 560
18	0	0
19	0	3 354 213
20	3 403 540	0
	73 935 402	43 570 416
	117 505 817	

Tabulka 27 – Stejné katalyzátory pro High-Dust varianty
 Zdroj: [17]



Graf 10 – Porovnání katalyzátorů pro varianty D, E, F – katalyzátory dle variant a stejná cena katalyzátorů
 Zdroj: [14]

Z uvedené tabulky je vidět, že nejvíce se změna projeví u varianty F, u které dojde ke zlevnění o téměř 100 mil. Kč po uplynutí doby 20 let. U varianty D dojde také k poklesu ceny a to o necelých 30 mil. Kč. Varianta E se jako jediná prodraží, o 40 mil. Kč.



Graf 11 – Kumulované cash flow projektu, všechny varianty, stejné katalyzátory pro D, E, F
 Zdroj: [17]

7.4 Citlivostní analýza

Citlivostní analýza zjišťuje, jak velký vliv mají jednotlivé hodnocené faktory na celkovou investici a jak by případné změny jednotlivých materiálových veličin ovlivnily celkovou výši investice.

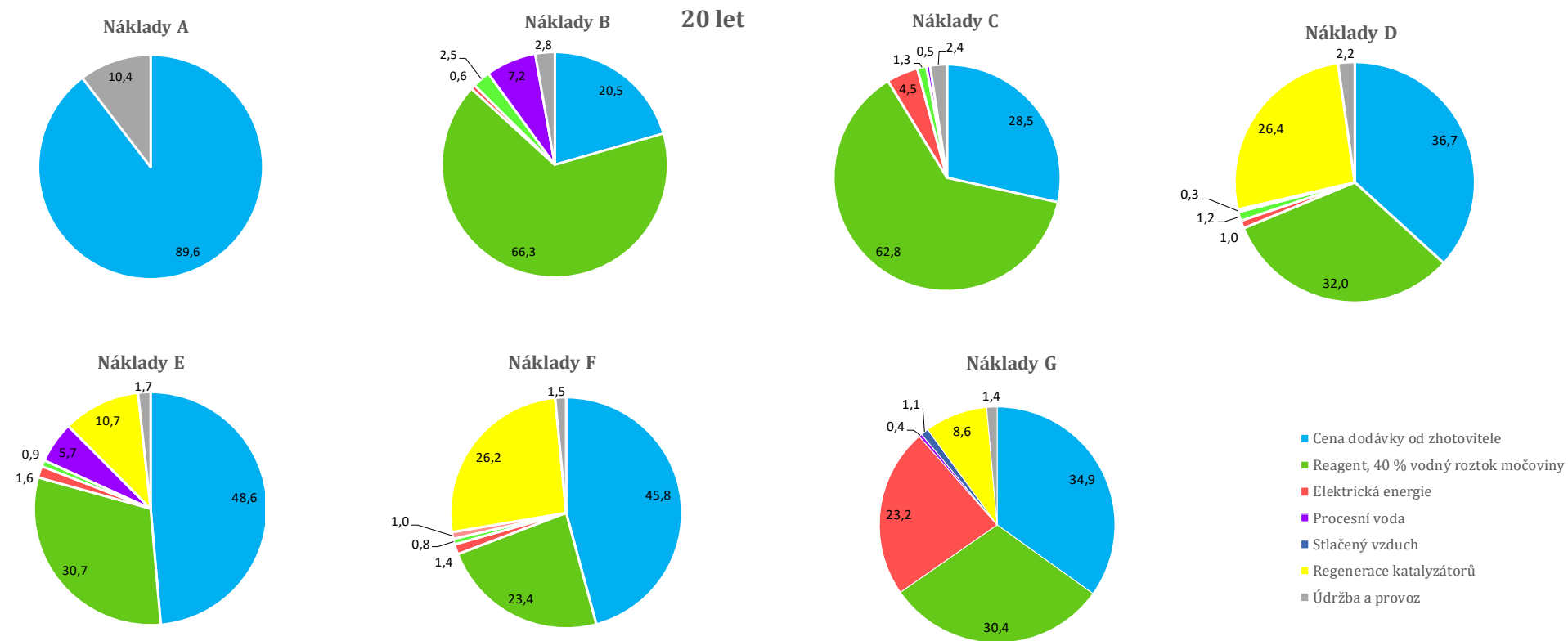
Pro citlivostní analýzu jsem z veškerých provozních nákladů vybrala jen změnu ceny močoviny. Ta, jak je vidět z následujícího grafu 12, má největší vliv na celkové cash flow jednotlivých variant.

Na tomto grafu si opět můžeme všimnout rozdělení investic do mnou daných tří skupin. Varianta A, ze skupiny primárních opatření, prakticky počítá jen s investičními náklady, protože se obecně garantuje úspora elektrické energie, a to díky změně řízení spalovacího procesu. Řešení B a C už mají jako druhou největší nákladovou položku cenu reagentu (močoviny), která se nastříkuje do proudu spalin v rámci technologie SNCR.

Skupina dvě s variantami D, E a F má jako největší nákladové provozní položky cenu reagentu a výměnu katalyzátorů. Investiční náklady zde tvoří zhruba $\frac{1}{4}$ až $\frac{1}{2}$ celkové výše investice v daném období 20 let. Připomínám, že tato technická řešení jsou pomocí primárních a sekundárních opatření formou SCR High-Dust.

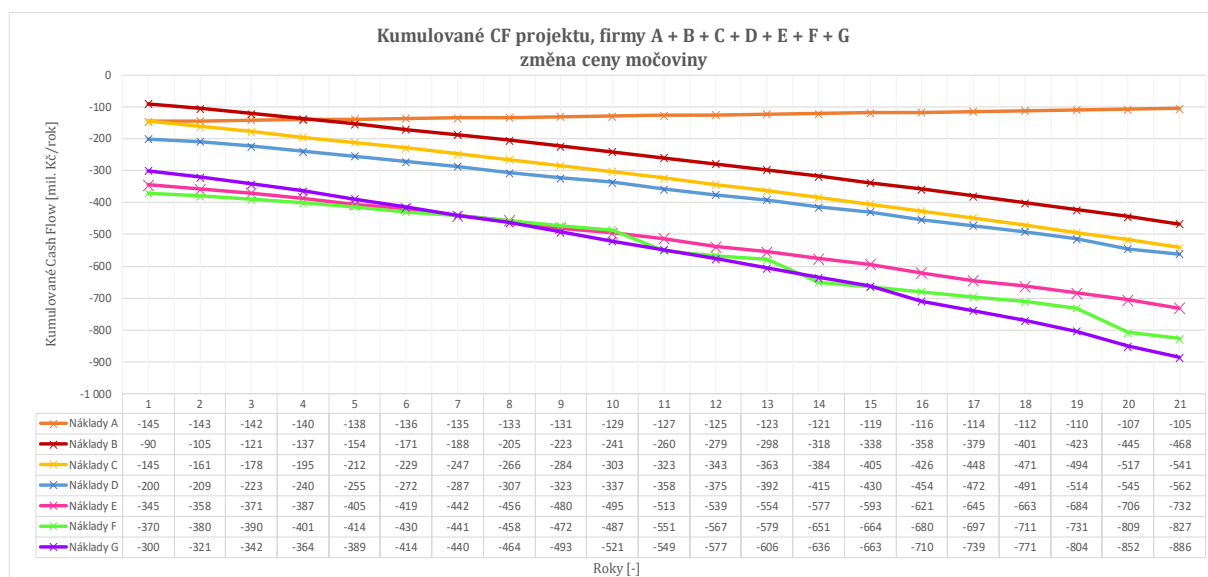
Třetí skupina s jednou variantou G, tedy s technologií selektivní katalytické redukce pomocí Tail-End katalyzátoru, má procentuálně podobné zatížení investičními náklady. Z důvodu menšího opotřebení katalyzátoru je cena jejich regenerace mnohem nižší. Narůstá ale podíl ceny za elektrickou energii, která je potřebná na ohřev venkovního potrubí s reagentem.

V citlivostní analýze se nezabývám změnou výše investičních nákladů, protože ty vyplývají z konzultací. Jak bude dále uvedeno v této kapitole, zaměřila jsem se hlavně na provozní náklady. Ze zmíněného grafu 12 je vidět, že nejvíce se jednotlivých variant může dotknout cena močoviny a regenerace katalyzátorů. Další velkou položkou je cena elektrické energie, kterou jsem však z hodnocení vynechala, protože dle mých výpočtů ze zadaných veličin a pohybu ceny elektrické energie se výsledky budou měnit jen minimálně, a to v řádech jednotek milionů korun, jak je ukázáno v kapitole 7.4.2.



Graf 12 – Náklady, procentuální porovnání po dobu 20 let
Zdroj: [17]

7.4.1 Změna ceny močoviny



Graf 3 – Kumulované cash flow, změna cen močoviny o 10 %
Zdroj: [17]

Do výpočtů jsem počítala se vzrůstem ceny o 10 %. Vzhledem k tomu, že se obecně počítá s klesajícím trendem, tak myslím, že je toto nadhodnocení ceny dostatečné. Tato změna ceny močoviny způsobí u všech variant kromě varianty A celkové zdražení. Nejvíce je nárůst ceny vidět u varianty E a G, tedy technologie SCR s katalyzátorem typu High-Dust a typu Tail-End.

7.4.2 Změna ceny elektrické energie

Jak jsem již naznačila, změnou ceny elektrické energie pro Teplárnu Otrokovice se v této analýze nezabývám podrobně, ale beru ji v úvahu při celkovém hodnocení. Pro zdůvodnění mého rozhodnutí jsem sestavila tabulku č. 28, ve které je vidět, že změna ceny elektrické energie se týká „jen“ variant A a G. Uvedené ceny jsou v milionech korun českých. Změna ceny je schválně nadhodnocena, aby byl vidět její malý vliv na celkové výdaje.

Varianta	Stávající cena 980 Kč/MWh	Změny ceny o + 50 % 1470 Kč/MWh	Změny ceny o – 50 % 490 Kč/MWh	
A	104	76	133	miliony korun českých
B	439	441	437	
C	509	520	498	
D	543	546	540	
E	709	715	703	
F	803	809	797	
G	851	951	751	

Tabulka 28 - Změna ceny nákladů po 20 letech, při změně ceny elektrické energie o +/- 50 %
Zdroj: [17]

7.5 Riziková analýza

Cílem rizikové analýzy je identifikovat možná rizika projektu. Obecně je u zdrojů výkonově podobných TOT největší riziko u varianty, která počítá s dosažením emisních limitů jen na základě primárních opatření. Variantu A jsou schopny dodat zahraniční firmy, které ovšem nemají reference na česká uhlí, a mají zkušenosti pouze s velkými elektrárenskými kotli. Také je nejisté, zda by metoda fungovala při vybočení parametrů paliva ze stanoveného rozsahu TOT. Platí, že primární opatření více snižují emise dusíku u větších výkonů než u malých. Tato hranice je dle zkušeností dána na výkonu přibližně 200 tun páry za hodinu. Pod tuto výkonnostní hladinu se emise NO_x jen díky primárním opatřením dokáže snížit jen ojediněle a většinou se pak emise NO_x pohybují těsně pod hranicí 200 mg/Nm³. To je velkou nevýhodou, protože EU momentálně jedná o dalším snižování limitů pro oxidy dusíku.

Samozřejmě není možné ignorovat nesrovnatelnou ekonomickou výhodu této varianty. Sice má nejvyšší investiční náklady, ale pak je dle zkušeností jako jediná varianta zisková.

U variant B až F – tedy primární opatření a v různých variantách katalyzátor SCR, popřípadě nástřik močoviny do kotle – jsou rizika více či méně podobná. Cena provozních médií je zhodnocena již na začátku této kapitoly, stejně tak i katalyzátory. Problémy u těchto metod nejsou v ekonomické sféře, ale opět spíše v technické sféře. Sekundární opatření mají totiž úzké teplotní okno, které je nutno udržovat pro správné fungování denitrifikačních metod. Při klouzavém výkonu kotlů, které TOT požaduje, je toto problematické.

Dále může vstřik močoviny způsobovat problémy v oblasti šotových přehříváků. U SNCR metody je možný problém se čpavkovým skluzem, který by se pak mohl dostat přes zákonem danou hranici. To nejlépe řeší použití katalyzátoru na čpavkový skluz.

Varianta G, s katalyzátorem typu Tail-End, se na jednu stranu jeví jako technologicky nejvýhodnější, a to díky umístění katalyzátoru, který je díky průchodu již očištěných spalin mnohem méně namáhán, a snižuje se tak významně jeho regenerace a tedy i celkové provozní náklady v průběhu let. Na druhou stranu je velmi složité nutné přehřívání spalin, jejich odvod mimo budovu kotelny a umístění katalytické jednotky na pozemku TOT, kde již není hlavně díky požárním požadavkům příliš místa. Dále cena elektrické energie, která je zde jednou z největších provozních položek, se může v budoucnu změnit a významně tím ovlivnit celkové investice do projektu.

Pro porovnání variant uvádím tabulku č. 29.

Varianta	A	B	C	D	E	F	G
1°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SNCR		✓	✓	✓	✓		
SCR				✓	✓	✓	✓
Rezervy pro další snížení emisí NO _x	✓	✓	✓			✓	✓
- metodou:	SNCR SCR	SCR	SCR			SNCR	1° SNCR
Citlivost na změnu ceny močoviny		✓	✓	✓	✓	✓	✓
zastoupení v celkových nákladech, 20 let [%]	0	68,1	64,3	27,8	28,2	27,0	30,1
Citlivost na změnu ceny elektrické energie			✓				✓
zastoupení v celkových nákladech, 20 let [%]	0	0,8	4,6	1,1	1,5	1,7	23,6
„Jednoduchost“ instalace zařízení	✓	✓	✓				

Tabulka 29 - Porovnání variant
Zdroj: [14]

Osobně jsem u řešení denitrifikace spalin pro co největší využití potenciálu veškerých primárních opatření. Jejich použití může díky optimalizaci spalovacího procesu zlepšit celkovou účinnost výroby tepla a elektrické energie. Spolu-použití těchto opatření se sekundárně se mi jeví jako nejlepší, protože se rovnou pokryjí rizika nedosažení emisních limitů, které jsou momentálně na hranici 200 mg/Nm³. A to ať už z důvodu požadavku velké výkonové pružnosti kotle, změn poměru směsi spalovaného hnědého a černého uhlí, technických problémů a výpadků např. trysek pro nástřik močoviny či další zákonem dané snížení emisních limitů.

8 Závěr, výběr vhodné varianty

V této práci jsem se zabývala problematikou emisí oxidů dusíku. Nejprve jsem zpracovala rešerši o problematice emisí NO_x v energetice, jak vznikají a jaké existují možnosti jejich snižování a odstraňování z proudu spalin. Dále jsem shrnula příklady již reálně použitých technologií DeNO_x, a to na českých a slovenských velkých zdrojích. Protože se má práce týká konkrétního vyhodnocení návrhů pro Teplárnu Otrokovice, uvedla jsem zde jednu kapitolu o provozu TOT. Následně jsem vyhodnotila jednotlivé možné varianty návrhů na snížení emisí NO_x pro TOT a to jak z hlediska technického tak i ekonomického. V tomto závěru práce se pak věnuji výběru jedné konkrétní.

8.1 Zhodnocení variant

Základním výchozím bodem jsou pro mě emisní limity, které vejdou v platnost v roce 2021. Z praktického hlediska je vhodné se nezaměřovat na limit pro oxidy dusíku, který je stanoven na hodnotu 200 mg/Nm³. Musíme počítat s reálnou a dostatečnou rezervou pro snížení emisí a to hlavně z hlediska dalšího možného zpřísnování ekologických limitů.

8.1.1 Provozní náklady

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, použití primárních opatření jako jediné s sebou nepřináší zvýšení provozních nákladů. Technologie SCR má nepochybně lepší účinnost a s tím je spojena menší spotřeba močoviny, která může být až třetinová a tudíž znamená poměrně velkou úsporu provozních nákladů. Naproti tomu SNCR nemá žádné náklady na regeneraci a výměnu katalyzátorů. Podrobně jsou provozní náklady popsány v kapitole 7.2.

8.1.2 Technické výhody a nevýhody jednotlivých variant

Primární opatření

U varianty použití pouze primárních opatření jsou papírově prakticky jen výhody. Vyšší investiční náklady se brzy překlenou díky tomu, že tato metoda znamená úsporu vlastní spotřeby TOT a také zvýšení účinnosti spalovacího procesu. Není zde spotřeba močoviny, ani velké přestavbové zásahy zejména do druhého tahu kotle.

Ovšem otázkou je, zda je touto metodou reálně možné dosáhnout daných emisních limitů, jak už je zmíněno v kapitole 7.4.1.

Sekundární opatření SNCR

Obecně jsou varianty s použitím primárních i sekundárních opatření nejvíce bezpečné z hlediska dosažení emisních limitů. Při použití SNCR metody jsou zde menší zásahy do tlakového celku kotle než při použití SCR. Použití močoviny jako redukčního činidla (se kterou počítám pro všechny varianty řešení) znamená menší ekologické riziko než při použití čpavku, zejména v případě havárie nebo úniku reagentu.

Při použití pouze nástřiku močoviny do spalovací komory musíme ale počítat s možným čpavkovým skluzem a koroze na plochách tepelných výměníků po proudu spalin. Proto je zde také varianta použití následného katalyzátoru, který zachycuje a redukuje zmíněný čpavkový skluz.

Sekundární opatření SCR High-Dust

Jak už bylo řečeno, u varianty SCR High-Dust nemusíme dohřívát spaliny a je zde vyšší účinnost konverze oxidů dusíku. Nevýhodou této metody je odstavení kotle po dobu výstavby a zásahy do druhého tahu kotle. Katalyzátor tu musí být instalován o větším objemu, což znamená větší náklady a jeho regenerace a výměna bude častější díky vlivu prachových částic. Nánosy popílku se na katalytické vrstvě tvoří zejména díky nerovnoměrné distribuci spalin a příliš vysoké rychlosti. Zanášení katalyzátoru také způsobuje snížení účinnosti denitrifikace spalin. U této metody musíme počítat s ofuky či akustickým čištěním katalyzátoru. Dále je zde větší riziko konverze oxidu siřičitého na SO₃, díky kterému se zvětšuje riziko nízkoteplotní koroze. Také bude problematické dodržet požadovanou rychlost spalin 4 m/s ve výplni katalyzátoru. To by znamenalo vyvedení spalin ze druhého tahu kotle a jejich zpětné zavedení (spolu s reagentem). Kdyby byl katalyzátor umístěn přímo ve druhém tahu kotle, nemuselo by dojít k dodržení požadované rychlosti. Složitost této metody se tedy může zdát jako příliš velká.

Sekundární opatření SCR Tail-End

Varianta Tail-End má v teoretické rovině výhody hlavně v tom, že není nutné odstavit kotel během doby výstavby a také nenarušujeme jeho stavbu a denitrifikace není závislá na provozu kotle. Katalyzátory jsou méně opotřebovávány a postačí menší plocha díky jinému typu. Díky pohybu v nižších provozních teplotách stačí použít levnější konstrukční materiály. Spaliny jsou již odsířené a tak nedochází k takové konverzi SO₂ na SO₃, a když, tak se riziko koroze týká již „jen“ technologie SCR a spalinového vedení ke komínu.

Nevýhodou této metody je nutnost ohřevu spalin a instalování výměníku tepla spalinospaliny. Další nevýhodou tohoto řešení přímo pro TOT je absence vhodného venkovního místa pro umístění katalyzátoru a její velká náročnost na spotřebu elektrické energie.

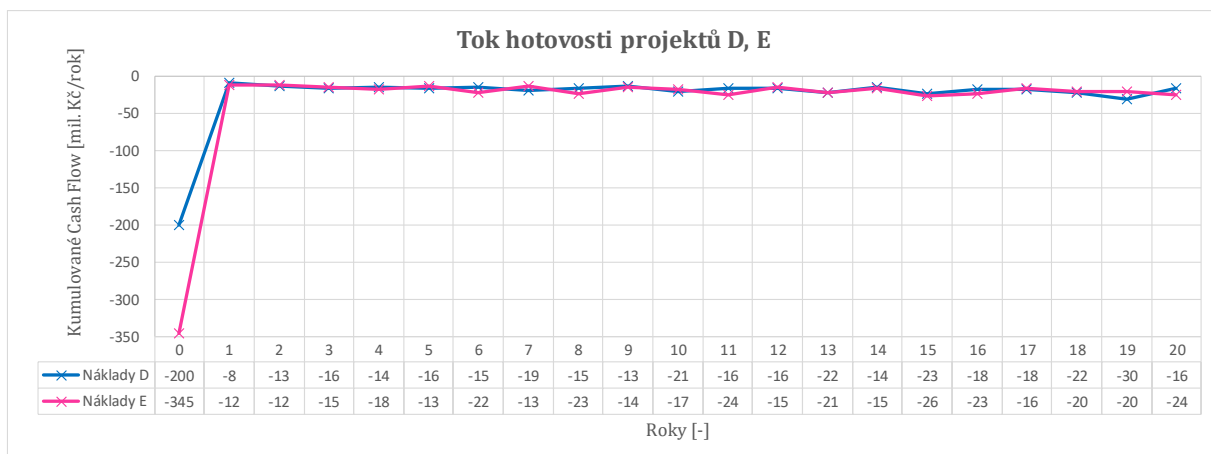
8.2 Výběr vhodné varianty

Jak jsem již zmínila v předešlých kapitolách, tak nedostatek referencí na použití pouze primárních opatření na elektrárenský kotel o relativně malém výkonu silně znevýhodňuje variantu A. Není zde vyloučeno další použití sekundárních opatření, a vyvstává zde tedy otázka, zda by nebylo vhodné rovnou při přestavbě kotlů nainstalovat i přídatnou SNCR. Bohužel díky nedostatku informací nejsem schopna říci, kolik by toto rozšíření stálo.

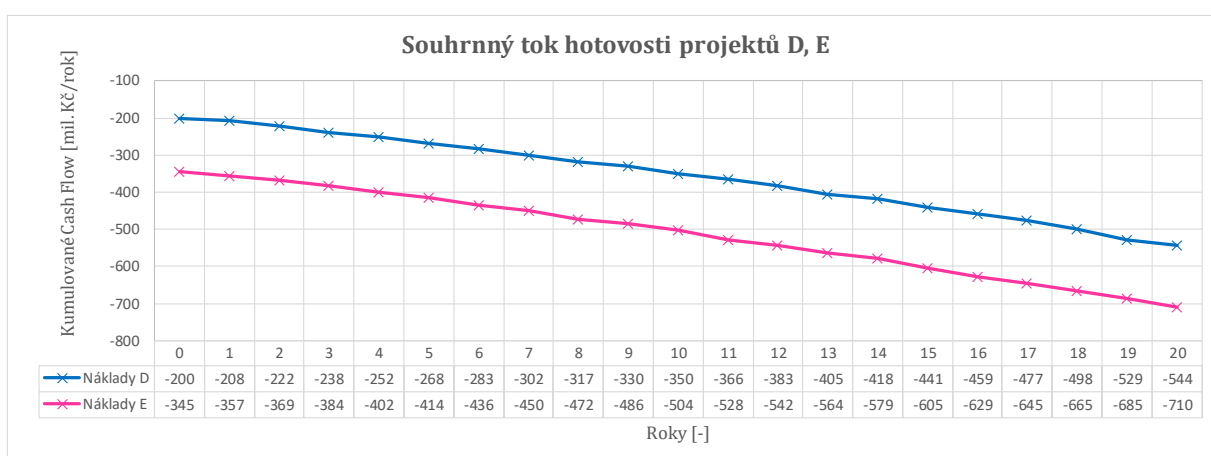
Další variantou, která vybočuje z optimálního řešení je pro mě varianta G, Tail-End katalyzátor. Není totiž snadné vybrat místo, kam by v areálu Elektrárny Otrokovice byla umístěna veškerá venkovní zástavba. Dále odhad spotřeby vzduchu byl nejméně přesný, protože s těmito katalyzátory není mnoho zkušeností. Vzhledem k tomu, že spotřeba stlačeného vzduchu tvoří u této varianty pouze malé procento (převažuje spotřeba reagentu, elektrické energie a výměna katalyzátorů), tak si dovoluji tvrdit, že to výsledek nijak významně neovlivní.

Za nejvhodnější variantu považuji technicky tu, kde se maximálně využije potenciál primárních opatření a dále pomocí nástřiku močoviny do proudu spalin sníží emise oxidů dusíku na požadovanou hodnotu. Protože se nyní na půdě EU jedná o další snížení emisí NO_x, tak bych rovnou využila odstávky kotlů na přídatnou instalaci katalyzátorů na omezení čpavkového skluzu. Toto technické řešení nabízí 2 varianty – a to D a E. Výhodou katalyzátorů na čpavkový skluz je i to, že oproti variantě F jsou katalyzátory menší a levnější. Není tedy takový problém s jejich instalací.

Dalším kritériem je pak pro mě výsledná cena instalace zařízení, kterou jsem znázornila v grafech 12 a 13. Je zde vidět, že varianta D má téměř poloviční pořizovací náklady. Následné roky se však cenový rozdíl mezi oběma variantami téměř nemění, jak je vidět v tabulce dat.



Graf 4 - Tok hotovosti projektů D, E
Zdroj: [17]



Graf 5 - Souhrnný tok hotovosti projektů D, E
Zdroj: [17]

Z hlediska celkového toku hotovosti je výhodnější varianta D. Díky tomu, že se jedná jen o odhady cen, tak je jasné, že reálná cena by se lišila. Protože však k těmto datům nemám přístup, je pro mě pak celkem jednoduché říci, že bych doporučila instalovat variantu D. Obě daná řešení se téměř neliší a proto se pak přikloním k ekonomickému hledisku řešení.

Na závěr je nutno říci, že tento výběr má své nedostatky. Do hodnocení nepočítám například s odpisy, které také značně ovlivní finální výběr. Nemám ale přístup k cenám a množství prodaného tepla, elektrické energie a technologické páry a nemůžu tak vyhodnotit, kolik by pro TOT činil příjem ze zvýšených prodejních cen.

Dále je také problém s ekonomickým posouzením všech variant vůči sobě, protože jednotlivé skupiny řešení jsou technicky velmi rozdílné a mají tedy odlišné jak vstupní, tak i provozní náklady. Rozdíly parametrů jsem nebyla schopna sjednotit.

Dalším nedostatkem je, že jsem do nákladů nezapočetla náklady na palivo (některé varianty garantují zlepšení účinnosti spalovacího procesu), změnu provozních nákladů, náklady na opravy a údržbu, náklady na režii a mzdy. Je to z toho důvodu, že k daným hodnotám nemám přístup. Troufám si však tvrdit, že celkové zlepšení účinnosti kotlů díky zlepšení spalovacího procesu, a tím daná i úspora paliva, také přispěje ke snížení celkové ceny investice.

I když jsem vybrala jednu z dražších variant, tak si za svým rozhodnutím stojím. Můj výběr se vztahuje k nejisté budoucnosti zdrojů na fosilní paliva. Jisté je to, že aby i nadále byly schopny konkurovat obnovitelným zdrojům energie, tak musí jejich provoz být co nejekologičtější. Otázkou je, kam až tato vylepšení budou schopna zajít tak, aby nezatížila cenu elektrické energie či tepla příliš. Evropská Unie projednává další snižování emisních limitů, a proto se snažím využít potenciál ekologizace na maximum, aby za dalších pár let nemusela Teplárna Otrokovice znovu procházet tímto výběrem.

9 Seznam použité literatury

- [1] Grafická ročenka 2013. Český hydrometeorologický úřad. [online]. © 2014 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/Obsah_CZ.html
- [2] VEJVODA, MACHAČ, BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. (skript). Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-7080-517-X
- [3] BOŠKA, Michal. *Vznik a snižování emisí NO_x*, bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [4] HEMERKA, VYBÍRAL, Doc. Ing. Jiří Hemerka a CSc. Ing. Pavel Vybíral, Ph.D.. *Ochrana ovzduší*. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04646-3.
- [5] ČEZ, *Elektrárna Dětmorovice a emise NO_x* [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: https://www.google.cz/webhp?sourceid=chrome-nstant&ion=1&espv=2&es_th=1&ie=UTF8#q=prezentace%20elektrarna%20detmarovice%20a%20emise%20nox&es_th=1
- [6] Ekologie. Teplárna Otrokovice. [online]. © 2013 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.tot.cz/ekologie>
- [7] JEDLIČKA, Filip. *Zneškodňování spalín znečištěných NO_x II*, diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009.
- [8] ČECHOVÁ, Jana. *Studie proveditelnosti, ekologizace kotlů K3, K4 – Teplárna Otrokovice a.s.* 2015, nepublikováno.
- [9] *Sborník konference Kotle energetická zařízení 2016*. Moravská energetická, a.s., 2016 [cit. 2016-05-03]. ISSN 1804-6673.
- [10] ZPRÁVA číslo: 14/16: *Garanční měření – recirkulace spalín, kotel K3*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 2016, nepublikováno.
- [11] FIALA, Ing. Libor, Ing. Viktor PELIKÁN, PH.D a Vítkovice Power Engineering a.s. *Denitrifikace Elektrárny Dětmorovice pomocí technologie selektivní katalytické redukce*. All for power. 2016, 2016(4), 5.
- [12] ČECH, Bohumír a Zbyszek SZELIGA. *Aplikace technologií DeNO_x v ČR: Den pro kotle 2016*. 2016.
- [13] TECHNOLOGY FOR CLEAN AIR, Escheuch. *Innovative Technologies for NO_x and CO reduction*. Kerneos, 2015.
- [14] Inlace - 2017: míra inflace a její vývoj v ČR. *Kurzycz* [online]. AliaWeb, spol. s r.o., 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/makroekonomika/inlace/>
- [15] Diskontní sazba (%) (Oficiální úrokové sazby ČNB (měsíční průměr) (%)) - ekonomika ČNB. *Kurzycz* [online]. AliaWeb, spol. s r.o., 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/cnb/ekonomika/oficialni-urokove-sazby-cnb-mesicni-prumer/diskontni-sazba/>

[16] *Skupina ČEZ: výroba elektřiny, uhelné elektrárny* [online]. Praha: ČEZ, 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny.html>

[17] Osobní konzultace s odborníky z TOT, úsek výrobního ředitele, oddělení investic.

10 Seznam použitých obrázků, grafů a tabulek

10.1 Obrázky

Obrázek 1 - Podíl sektorů na emisích dusíku v roce 2012	10
Obrázek 2 - Vývoj emisí NO _x v období 2007 - 2012.....	11
Obrázek 3 - Pole roční průměrné koncentrace oxidů dusíku v roce 2013	11
Obrázek 4 - Tvorba NO _x v závislosti na teplotě plamene	14
Obrázek 5 - Vliv přebytku vzduchu na vznik termických a palivových NO _x	16
Obrázek 6 - Nosič bez katalyzátoru (a) a katalyzátoru V2O5-WO3/TiO2 s naneseným katalyzátorem (b).....	19
Obrázek 7 - Závislost NO přeměny na teplotě pro různé modifikace katalyzátoru	19
Obrázek 8 - Schéma SCR metody High-Dust.....	20
Obrázek 9 - Katalyzátor užívaný pro metodu High-Dust	20
Obrázek 10 - Katalyzátor pro metodu Low-Dust.....	21
Obrázek 11 - Zjednodušené schéma SCR metody Low-Dust	21
Obrázek 12 - Zjednodušené schéma SCR metody Tail-End.....	21
Obrázek 13 - Závislost odloučení NO _x na teplotě spalin.....	22
Obrázek 14 - Vstřikování redukčního činidla do plamene	23
Obrázek 15 - Schéma metody Umbrella SNCR.....	26
Obrázek 16 - Umbrella SNCR, vstřikovací kopí zasunuté v kotli.....	26
Obrázek 17 - Schéma metody redukce NO _x na aktivním koksu	28
Obrázek 18 - Schéma radiační metody	29
Obrázek 19 - Elektrárna Pruněřov II, obrazovka řídicího systému zachycující stav emisí K23 ...	40
Obrázek 20 - Teplárna Strakonice, fluidní lože	41
Obrázek 21 - Základní technologické schéma TOT.....	49
Obrázek 22 - Kombinovaný nízkoemisní NO _x hořák na uhlí a zemní plyn	59

10.2 Tabulky

Tabulka 1 – Průměrné hodnoty emisí NO _x u uhelných kotlů	13
Tabulka 2 - Porovnání SCR a SNCR metody Zdroj [2, 3, 4, 5, 9, 12, 13].....	30
Tabulka 3 – Teplárna Karviná, parametry kotle K4	31
Tabulka 4 – Teplárna Karviná, K4, emise před rekonstrukcí.....	31
Tabulka 5 – Teplárna Karviná, K4, vyhodnocení komplexního vyzkoušení	33
Tabulka 6 – Teplárna Karviná, K4, garantované hodnoty emisí	33
Tabulka 7 – Teplárna Košice, PK4s, stav emisí NO _x před rekonstrukcí	34
Tabulka 8 – Elektrárna Počerady, emise před rekonstrukcí	35
Tabulka 9 – Elektrárna Počerady, emise po rekonstrukci.....	36
Tabulka 10 – Elektrárna Pruněrov II, emise před rekonstrukcí a nově garantované.....	39
Tabulka 11 – Teplárna Strakonice, emisní limity NO _x při garančním testu	42
Tabulka 12 – Elektrárna Dětmorovice, emisní koncentrace vybraných látek	43
Tabulka 13 - Shrnutí použitých metod	44
Tabulka 14 – Emisní stropy NO _x a SO ₂ pro TOT dle PNP	46
Tabulka 15 – Emise TOT za rok 2012 až 2014	47
Tabulka 16 – Poplatky za emise do ovzduší za rok 2012 až 2014	47
Tabulka 17 – Parametry kotlů K3, K4 a K5.....	50
Tabulka 18 – Garanční měření po instalaci recirkulace spalin na K3.....	54
Tabulka 19 – Požadované emisní limity	64
Tabulka 20 – Materiálové toky primárních opatření.....	65
Tabulka 21 – Materiálové toky primárních opatření + SCR.....	67
Tabulka 22 – Materiálové toky SCR Tail-End.....	69
Tabulka 23 - Shrnutí jednotlivých variant	71
Tabulka 24 – Vstupní údaje pro ekonomické hodnocení.....	73
Tabulka 25 – Náklady	74
Tabulka 26 – Katalyzátory, regenerace a cena	77
Tabulka 27 – Stejně katalyzátory pro High-Dust varianty	78
Tabulka 28 - Změna ceny nákladů po 20 letech, při změně ceny elektrické energie o +/- 50 %..	82
Tabulka 29 - Porovnání variant.....	84

10.3 Grafy

Graf 1 – Umbrella SNCR, graf redukce emisí NO _x	25
Graf 2 – Teplárna Karviná, K4, komplexní vyzkoušení	33
Graf 3 – Elektrárna Poříčí, účinnost kotle K8.....	36
Graf 4 – Elektrárna Poříčí, účinnost kotle K8 po změně řízení.....	37
Graf 5 – Elektrárna Poříčí, NO _x	38
Graf 6 – Elektrárna Poříčí, K8, 2012 - 2014.....	39
Graf 7 – Elektrárna Poříčí, K8, 02/2015 - 02/2016	40
Graf 8 – Cash flow projektu	75
Graf 9 – Kumulované cash flow projektu.....	75
Graf 10 – Porovnání katalyzátorů pro varianty D, E, F – katalyzátory z nabídek a stejná cena katalyzátorů.....	79
Graf 11 – Kumulované cash flow projektu, všechny varianty, stejné katalyzátory pro D, E, F.....	79
Graf 12 – Náklady, procentuální porovnání po dobu 20 let.....	81
Graf 13 – Kumulované cash flow, změna cen močoviny o 10 %	82
Graf 14 – Tok hotovosti projektů D, E.....	88
Graf 15 – Souhrnný tok hotovosti projektů D, E.....	88