

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE**

2020

**PETER
KRET**



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav energetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Problematika zníženia oxidov dusíkov z veľkých a zvlášť veľkých spaľovacích zdrojov

Autor diplomovej práce: Bc. Peter Kret

Vedúci diplomovej práce: Ing. Lukáš Pilař, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kret** Jméno: **Peter** Osobní číslo: **408569**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Problematika snížení oxidů dusíku z velkých a zvláště velkých spalovacích zdrojů

Název diplomové práce anglicky:

The problem of reducing nitrogen oxides from large combustion power plant

Pokyny pro vypracování:

Práce bude zahrnovat

- Kompletní zhodnocení legislativy - 415/2012 Sb. ale i budoucích emisních limitů platných po roce 2021
- Palivová základna - paliva spalovaná v České republice
- Analýza palivové základny
- Technologie dostupné pro snížení koncentrace oxidů dusíku, tedy jednak primární, ale předně sekundární opatření.

Diplomová práce musí zahrnovat i specifikta, podmínky a i problémy technologií pro snížení koncentrace dusíků

Hlavní technickou částí práce bude:

- Návrh ohřevu spalin pro technologii SCR v konfiguraci 'tail end' dle zadaných podmínek na reálném zdroji
- Komplexní schéma zapojení celé technologie SCR v konfiguraci 'tail end'
- Dispoziční uspořádání technologie

Seznam doporučené literatury:

Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants
Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Skriptum ČVUT 2006
Provozní data
Informace o spalovacím zdroji

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lukáš Pilař, Ph.D., ústav energetiky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

Ing. Lukáš Pilař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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.

30.4.2019
Datum převzetí zadání

hpet
Podpis studenta

P r e h l á s e n i e

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne s tým, že jej výsledky môžu byť ďalej použité podľa uváženia vedúceho diplomovej práce ako jej spoluautora. Súhlasím tiež s prípadnou publikáciou výsledkov diplomovej práce alebo jej podstatnej časti, pokiaľ budem uvedený ako jej spoluautor.

V Prahe dňa

Podpis

Anotačný list

Meno autora:	Bc. Peter Kret
Názov DP:	Problematika snížení oxidů dusíku z velkých a zvláště velkých spalovacích zdrojů
Anglický názov:	The problem of reducing nitrogen oxides from large combustion power plant
Akademický rok:	2019/2020
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/ Energetika
Vedúci DP:	Ing. Lukáš Pilař, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet strán: 119 Počet obrázkov: 41 Počet tabuliek: 40 Počet grafov: 5 Počet príloh: 4
Kľúčové slová:	Oxidy dusíka, SCR technológia, tail end, Ljungstroem
Keywords:	Nitrogen oxides, SCR technology, tail end, Ljungstroem
Anotácia:	Diplomová práca sa zaoberá oxidmi dusíka a ich problematikou u veľkých a zvlášť veľkých spalovacích zdrojov. Teoretická časť popisuje vznik oxidov dusíka, pričom sa venuje aj technológiám, ktorých účelom je oxidy dusíka redukovať. Ďalej je teoretická časť venovaná príslušnej legislatíve a palivovej základni Českej republiky. Výpočtová časť spracováva návrh SCR technológie v konfigurácii tail end pre reálny zdroj. Obsahuje popis danej technológie, stechiometrický výpočet, podrobný popis návrhu regeneračného výmenníku typu Ljungstroem a bilančný návrh parného dohrevu. Vo výpočtovej časti je tiež uvedený výpočet spotreby redukčného činidla a rozmerov katalyzátoru. V závere tejto časti sa nachádza ekonomické zhodnotenie. Experimentálna časť obsahuje popis a vyhodnotenie merania na pilotnej jednotke. Záver práce zhrňuje zistenia a poznatky z experimentálnej a výpočtovej časti. Na základe týchto poznatkov sú uvedené ďalšie odporúčania.
Abstract:	This thesis discusses the nitrogen oxides and their problem related to large combustion power plant. Firstly, the theoretical part describes the process of nitrogen oxides formation and addresses the topic of technologies that fulfill the purpose of nitrogen oxide reduction. Furthermore, this part discusses the respective legislation and the fuel basis of the Czech Republic. Secondly, the practical part executes the proposition of SCR technology in the tail end configuration for the actual resource. It describes the particular technology and includes the stoichiometric calculations, a detailed description of a proposition for a Ljungstroem heater, and a steam reheating balance proposal. This section also includes a consumption calculation of a reducing agent and accelerator dimensions. The practical part concludes with the economical evaluation. Lastly, the experimental part consists of a description and an evaluation of the calculations from the research facility.. The conclusion summarizes the observations and findings determined in the experimental and practical parts. Based on these observations, further recommendations are introduced.

Pod'akovanie

Touto cestou by som sa rád poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Lukášovi Pilařovi, Ph.D. za jeho hodnotné rady, pripomienky a odborné vedenie práce. Taktiež by som sa chcel poďakovať mojej rodine a priateľom za veľkú podporu a trpezlivosť.

Obsah

Zoznam použitých symbolov	10
Úvod.....	13
TEORETICKÁ ČASŤ	15
1. Ochrana ovzdušia.....	15
1.1. Zdroje znečistenia ovzdušia	15
2. Palivová základňa v ČR	16
2.1. Hnedé uhlie	17
2.1.1. Sev.en energy	18
2.1.2. Severočeské doly, a.s.	18
2.1.3. Sokolovská uhelná a.s.....	19
2.1.4. Porovnanie	19
2.2. Čierne uhlie.....	20
2.3. Zemný plyn	21
2.4. Ropa.....	22
3. Legislatíva.....	24
3.1. Stacionárne zdroje	25
3.2. Emisné limity	26
3.2.1. Emisné limity zdrojov o menovitom tepelnom príkone 50 MW a vyššom	27
3.2.2. Emisné limity zdrojov o menovitom tepelnom príkone vyššom než 0,3 MW a nižšom než 50 MW	28
3.2.3. Minimálne emisné požiadavky o menovitom tepelnom príkone do 300 kW.....	29
3.2.4. Špecifické emisné limity pre spaľovacie stacionárne zdroje ku spaľovaniu viac druhov palív.....	30
3.3. Meranie emisií.....	30
3.4. Požiadavky na kvalitu palív	30
4. Oxidy dusíka (NO_x).....	31
4.1. Zdravotné a environmentálne účinky NO _x	31
4.1.1. Kyslé dažde	32
4.1.2. Vplyv na človeka.....	32
5. Tvorba NO_x	33

5.1.	Termické NO.....	34
5.2.	Palivové NO.....	35
5.3.	Promptné NO	36
6.	Technológie dostupné pre zníženie koncentrácie NO_x.....	38
6.1.	Primárne opatrenia	38
6.1.1.	Nízky prebytok vzduchu.....	38
6.1.2.	Postupný prívod vzduchu.....	39
6.1.3.	Recirkulácia.....	41
6.1.4.	Zníženie teploty spaľovacieho vzduchu	43
6.1.5.	Nízkoemisné horáky	43
6.1.6.	Postupný prívod paliva	44
6.1.7.	Pridanie vody alebo pary	46
6.2.	Sekundárne opatrenia	47
6.2.1.	Selektívna nekatalytická redukcia	47
6.2.2.	Selektívna katalytická redukcia.....	50
	VÝPOČTOVÁ ČASŤ	63
7.	Návrh technológie.....	63
7.1.	Voľba technológie SCR.....	63
7.2.	Voľba typu výmenníku	64
7.3.	Voľba typu dohrevu.....	65
7.4.	Palivo	65
7.5.	Vstupné parametre pre návrh SCR.....	66
7.6.	Stechiometrický výpočet.....	68
8.	Návrh regeneračného výmenníku.....	72
8.1.	Návrhové parametre	72
8.2.	Potrebné teplo.....	74
8.3.	Bilancia Ljungstroem	76
8.3.1.	Bilancia	77
8.4.	Výpočet.....	78
8.4.1.	Rýchlosť spalín.....	83
8.4.2.	Skutočný prietok spalín	83
8.4.3.	Reynoldsove číslo.....	83
8.4.4.	Súčiniteľ prestupu tepla	84
8.4.5.	Teplotný spád.....	84
8.4.6.	Výhrevná plocha a výška výhrevnej plochy	85

8.5. Voľba regeneračného výmenníku	87
8.6. Rozmery regeneračného výmenníku	88
9. Návrh parného dohrevu	89
10. Spotreba amoniaku	91
10.1. Čpavkový sklz	92
10.2. Spotreba vody	93
10.3. Emisný limit	93
11. Návrh katalyzátoru	94
11.1. Plocha prierezu reaktoru	94
11.2. Hĺbka a šírka reaktoru	95
11.3. Počet vrstiev katalyzátoru	95
11.4. Výška vrstvy katalyzátoru	96
11.5. Celkový počet vrstiev	96
11.6. Výška reaktoru	96
11.7. Rozmery katalyzátoru	97
12. Investičné náklady	98
EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	99
13. Meranie	99
13.1. Popis technológie	99
13.2. Technický popis a parametre	100
13.3. Realizácia merania	103
13.4. Vyhodnotenie merania	104
13.4.1. Dávka NH ₃ 10 g/hod.	104
13.4.2. Rôzne dávky NH ₃	105
13.4.3. Miera redukcie NO _x	106
Záver	107
Zoznam literatúry	110
Zoznam tabuliek, obrázkov a grafov	116
Zoznam príloh	119

Zoznam použitých symbolov

Ar	argón
ASR	čpavkový sklz
a.s.	akciová spoločnosť
BAT	Best Available Techniques
BREF	Reference Document for Large Combustion Plants
C	uhlík
c_p	merná tepelná kapacita
Co	kobalt
CO	oxid uhoľnatý
CO ₂	oxid uhličitý
Cr	chróm
ČSA	Československá armáda
Cu	meď
CZT	centrálne zásobovanie teplom
ČR	Česka republika
D	priemer
DeNO _x	zariadenie na obmedzovanie emisií oxidov dusíka
DeSO _x	zariadenie na obmedzovanie emisií oxidov síry
EPA	United States Environmental Protection Agency
EO	elektrostatický odlučovač
EÚ	Európska únia
Fe	železo
h	entalpia
h	výška
H	vodík
HCN	kyanovodík
H ₂ O	voda
i	entalpia
k	súčiniteľ prechodu tepla
l	hĺbka
\dot{m}	hmotnostný prietok
mil.	milióny
Mn	mangán
Mo	molybdén
N ₂	dusík
NO	oxid dusnatý
NO ₂	oxid dusičitý
NO _x	oxidy dusíka
NH ₃	amoniak
O	kyslík

O ₂	kyslík
OVZ	ohrievač vzduchu
p	tlak
PM	particulate matter (častice)
Q	tepelný výkon
S	síra
S	plocha
SCR	Selective catalytic reduction (Selektívna katalytická redukcia)
SNCR	Selective noncatalytic reduction (Selektívna nekatalytická redukcia)
SO ₂	oxid siričitý
SO ₃	oxid sírový
T,t	teplota
TiO ₂	oxid titaničitý
TOC	celkový organický uhlík
TZL	tuhé znečisťujúce látky
Ṁ	objemový prietok
w	rýchlosť prúdenia

Dolné indexy

celk	celkový
kat	katalyzátor
min	minimálny
n	normálny
OS	ohrievač spalín
ref	referenčný
s	spaliny
skut	skutočný
sp	spaliny
SS	spaliny suché
str	stredný
SV	spaliny vlhké
v	vzduch
VS	vzduch suchý
VV	vzduch vlhký
Z	strata

Horné indexy

daf	stav bez vody a popola
HS	horúca strana
r	raw; pôvodný stav
s	spaliny

SS studená strana

Grécke písmená

α	obsah kyslíka v spalinách
β	obsah kyslíka v spalinách
Δ	rozdiel
ρ	hustota
\varnothing	priemer

Úvod

Téma emisií, ochrany ovzdušia a celkového životného prostredia sa v posledných rokoch výrazne dostáva do popredia. Súčasná doba kladie veľký dôraz na neustále znižovanie emisných limitov, s čím sú spojené značné investície. Táto téma sa stala natoľko dôležitou, že je možné predpokladať ďalšie znižovanie emisií a s tým spojený nárast investícií do výskumu a výstavby.

Znižovanie emisných limitov vedie k rôznym emisným opatreniam, pričom veľký dôraz je venovaný práve emisiám pochádzajúcim z energetických zdrojov spaľujúcich fosílnu palivá. Medzi sledované emisné látky patria aj emisie oxidov dusíka. Problematike týchto emisných látok zo zdrojov spaľujúcich fosílnu palivá sa venuje aj táto diplomová práca.

V rámci cieľov práce bol spracovaný návrh ohrevu spalín v SCR technológii v konfigurácii tail end pre reálny zdroj Tepláreň Trmice. V nadväznosti na tento návrh bol uskutočnený výpočet pre zariadenia spadajúce do tejto technológie. Výsledkom tohto návrhu je komplexná schéma zapojenia SCR v danej konfigurácii a jej dispozičné umiestnenie na reálnom zdroji.

Samotná práca je rozdelená do troch väčších celkov, a to teoretickej, výpočtovej a experimentálnej časti.

Prvá kapitola práce sa zaoberá definovaním pojmu ochrany ovzdušia, ktorý tvorí základ pre pochopenie danej problematiky. Súčasťou kapitoly je aj vymedzenie zdrojov znečistenia ovzdušia.

Druhá kapitola je venovaná palivovej základni v Českej republike, pričom pozornosť je zameraná práve na fosílnu palivá, a to predovšetkým uhlie, ktoré tvorí v Českej republike podstatnú časť energetického mixu. V rámci kapitoly je spracovaná aj analýza palivovej základne.

V tretej kapitole je uvedené zhrnutie legislatívy zameranej na danú problematiku. V úvode kapitoly je definovaný pojem stacionárny zdroj, následne sú uvedené aktuálne emisné limity a taktiež emisné limity platné od roku 2021. Kapitola obsahuje aj popis merania emisií a požiadaviek na kvalitu palív definovaných danou legislatívou.

Samotným oxidom dusíka a ich tvorbe sú venované kapitoly 4 a 5. V štvrtej kapitole sú uvedené vplyvy NO_x na životné prostredie a človeka. Piata kapitola ďalej popisuje jednotlivé mechanizmy tvorby oxidov dusíka. Súčasťou kapitoly je aj definícia parametrov ovplyvňujúcich túto tvorbu.

Záverom teoretickej časti je kapitola šesť, ktorá opisuje technológie dostupné pre znižovanie oxidov dusíka, rozdelené na tzv. primárne a sekundárne opatrenia. Vzhľadom k výpočtovej časti je pozornosť venovaná najmä selektívnej katalytickej redukcii.

Výpočtová časť je tvorená kapitolami 7 až 12. V siedmej kapitole je zhrnutý návrh samotnej technológie, ktorý taktiež popisuje výber daných zariadení, vstupné parametre pre návrh a stechiometrický výpočet potrebný pre návrh danej technológie.

Kapitola osem detailne popisuje výpočet a návrh rozmerov regeneračného výmenníku typu Ljungstroem. Samotný návrh bol realizovaný pre tri varianty, ktorých parametre a rozmery sú uvedené na konci tejto kapitoly.

Kapitola deväť približuje bilančný návrh parného dohrevu s ohľadom na vybrané varianty z kapitoly osem.

Výpočtu sú ďalej venované kapitoly 10 až 12, ktoré sú bližšie zamerané na spotrebu amoniaku. Tento výpočet je realizovaný na základe vzťahov uvedených v teoretickej časti. Jedenásta kapitola popisuje návrh katalyzátoru. V závere výpočtovej časti je potom uvedené zhrnutie investičných nákladov.

Experimentálne meranie popisuje kapitola 13, ktorá taktiež obsahuje vyhodnotenie nameraných parametrov.

V závere práce sú zhrnuté poznatky z experimentu a výpočtovej časti, vyslovené závery a následné odporúčania.

V prílohách k tejto diplomovej práci sa nachádza komplexná schéma zapojenia SCR technológie v konfigurácii tail end a dispozičné umiestnenie danej technológie v reálnom zdroji Teplárni Trmice. Prílohy sú uložené na samostatnom CD nosiči, ktorý taktiež obsahuje namerané hodnoty z experimentálneho merania.

TEORETICKÁ ČASŤ

1. Ochrana ovzdušia

Vzduch je jednou z najzákladnejších zložiek životného prostredia, bez ktorej sa človek nedokáže zaobiť. Každá zložka, ktorú vzduch obsahuje vdychujeme a dostáva sa do ľudského tela, čím priamo ovplyvňuje ľudské zdravie. Preto sa v posledných rokoch zaoberá kvalitou a ochranou ovzdušia čoraz viac krajín na národnej aj medzinárodnej úrovni. (Ministerstvo životného prostredia České republiky, 2019)

„Ochranou ovzdušia sa rozumie predchádzanie znečisťovaniu ovzdušia a znižovanie úrovne znečisťovania tak, aby boli obmedzené riziká pre ľudské zdravie spôsobené znečistením ovzdušia, znížením záťaže životného prostredia látkami vnášanými do ovzdušia a poškodzujúcimi ekosystémy a vytvorenie predpokladov pre regeneráciu zložiek životného prostredia postihnutých v dôsledku znečistenia ovzdušia.“ (Ministerstvo životného prostredia České republiky, 2019)

V Českej republike pre úpravu ochrany ovzdušia existuje základná právna norma upravujúca hodnotenie a riadenie kvality ovzdušia a prevádzky zdrojov znečisťovania ovzdušia, zákon č. 201/2012 Sb., o ochrane ovzduší, ktorý stanovuje práva a povinnosti osôb a pôsobnosť správnych úradov pri ochrane ovzdušia. Tento zákon nahradil zákon č. 86/2002 Sb.

1.1. Zdroje znečistenia ovzdušia

Zdroje znečistenia ovzdušia sú také zdroje, ktoré vnášajú do ovzdušia znečisťujúce látky, ktoré môžu mať škodlivé účinky na životné prostredie, alebo na zdravie človeka. Tieto zdroje môžu byť prírodného charakteru alebo vznikajúce činnosťou človeka.

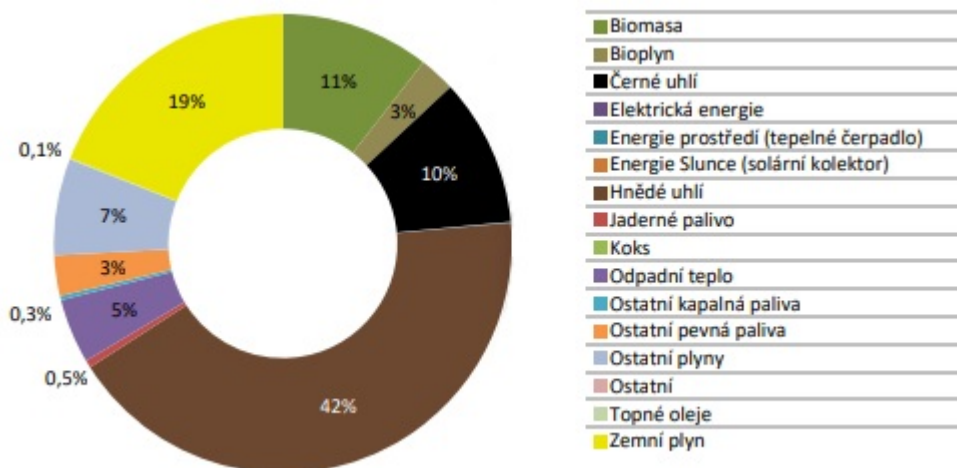
Európska agentúra pre životné prostredie (2017) uvádza ako zdroje:

- Ľudské:
 - Spaľovanie fosílnych palív
 - Priemyslové procesy a používanie rozpúšťadiel
 - Pôdohospodárstvo
 - Spracovanie odpadu
- Prírodné:
 - Sopečná činnosť
 - Prach šírený vetrom
 - Soľné výpary z morskej vody
 - Emisie prchavých organických látok z rastlín

2. Palivová základňa v ČR

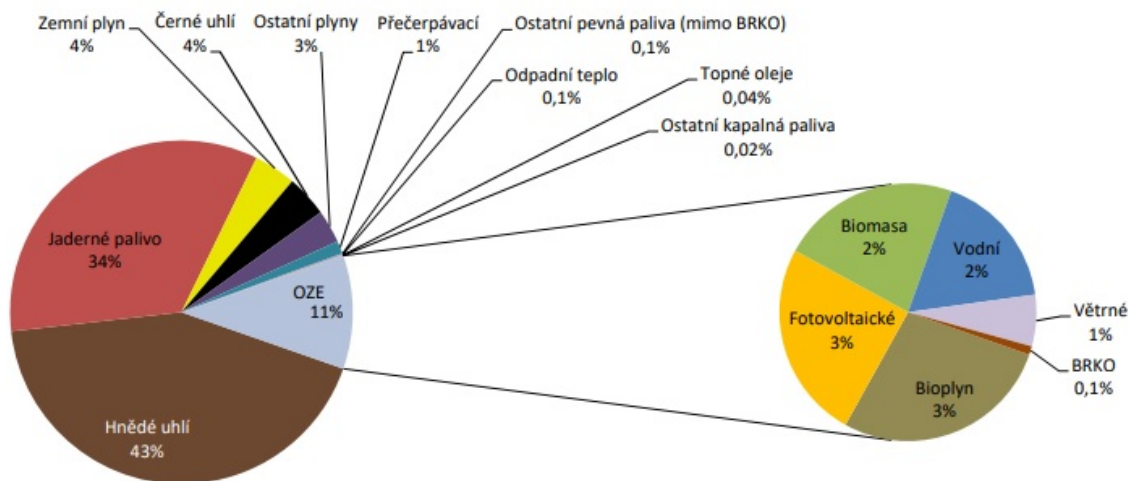
Nasledujúce obrázky zobrazujú podiel jednotlivých palív a technológií na celkovej výrobe tepla a elektriny v Českej republike za rok 2018. Z týchto obrázkov jasne vyplýva, že najviac využívaným palivom je hnedé uhlie. Druhým najviac využívaným fosílnym palivom je zemný plyn, nasledovaný čiernym uhlím.

Obrázok 1 Podiel palív na výrobe tepla brutto – 2018



Zdroj: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ. Roční zpráva o provozu teplárenských soustav ČR 2018. Energetický regulační úřad, Jihlava. 2019 [cit. 4.12.2019]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/5391330/Zprava_o_provozu_TS_2018.pdf/bec4c828-cc45-4c94-89dd-f156bf49165c

Obrázok 2 Podiel palív a technológií na výrobe elektriny brutto – 2018



Zdroj: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ. Roční zpráva o provozu ES ČR 2018. Energetický regulační úřad, Jihlava. 2019 [cit. 4.12.2019]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c

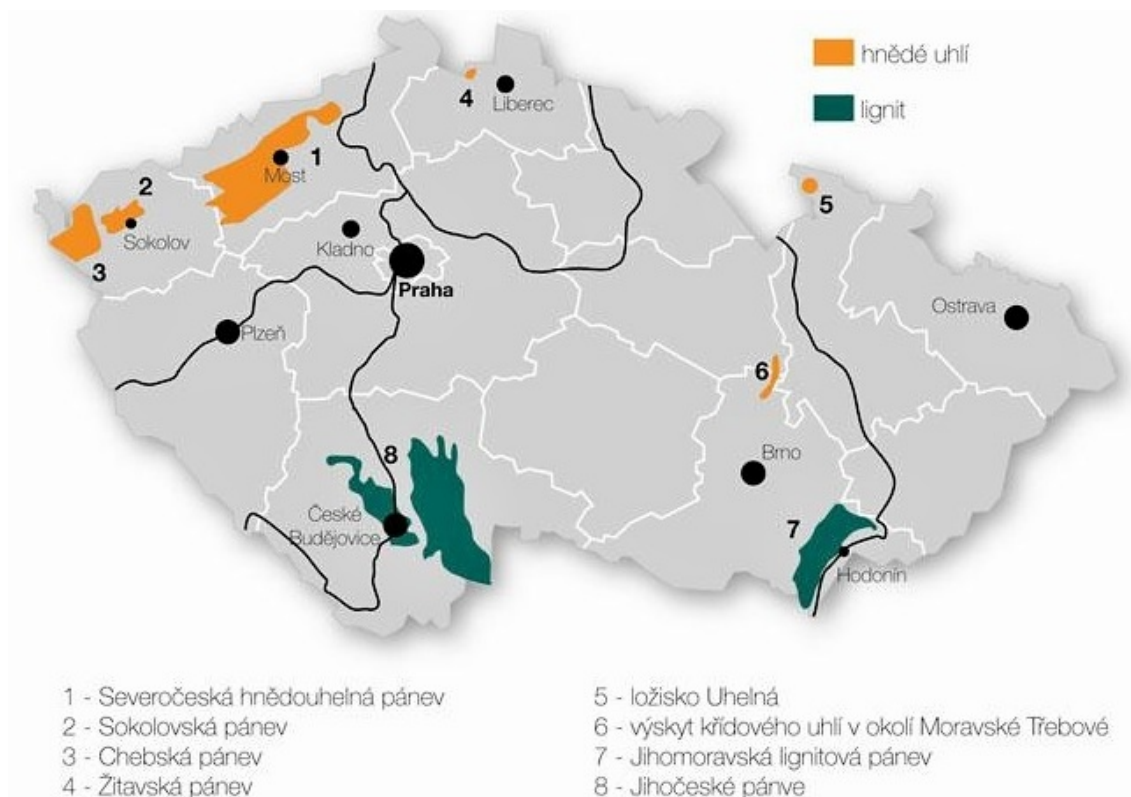
Podľa údajov Českého statistického úřadu (2019) a Energetického regulačního úřadu (2019) je v Českej republike za rok 2018 celková spotreba hnedého uhlia (vrátane lignitu) 37 miliónov ton, spotreba čierneho uhlia 6,5 miliónov ton a spotreba zemného plynu okolo 8 miliárd m³. Napriek dnešným trendom inklinujúcim k znižovaniu spotreby uhlia sa spotreba týchto palív sa za posledné 3 roky veľmi nezmenila, dokonca spotreba hnedého uhlia posledné roky mierne narástla.

2.1. Hnedé uhlie

Ako bolo už v predchádzajúcej kapitole naznačené, hnedé uhlie je v dnešnej dobe hlavným zdrojom energie v Českej republike. Ťažba hnedého uhlia je v Česku lokalizovaná do oblastí podkrušnohorských hnedouhoľných panví: severočeskej (mosteckej), sokolovskej a chebskej. Najväčšia z nich je severočeská panva, ktorá sa delí na 3 menšie časti (chomutovskú, mosteckú a ústeckú). V súčasnosti v týchto oblastiach ťažia 3 spoločnosti, ktoré sú súkromné.

V roku 2018 sa dohromady v Českej republike vyťažilo 39,2 miliónov ton hnedého uhlia. Produkcia hnedého uhlia bola najvyššia v 70. až 80. rokoch minulého storočia a dosahovala priemerne 90 miliónov ton ročne. Následne začala produkcia klesať až sa dostala na dnešné hodnoty, ktoré sa približne od roku 2013 veľmi nemenia. (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019)

Obrázok 3 Hnedouhoľné panvy a ložiská hnedého uhlia a lignitu v Českej republike



Zdroj: Energie pro ČR. *Kde se těží*. Energie pro ČR. 2019 [cit. 5.12.2019]. Dostupné z: <http://www.naseuhli.cz/kde-se-tezi>

2.1.1. Sev.en energy

Sev.en energy AG je medzinárodná skupina, ktorá zastrešuje širokú škálu činností od ťažby a úpravy uhlia, cez výrobu elektrickej energie až po obchodovanie s komoditami. Do tejto skupiny patrí napríklad elektrárň Chvaletice (Sev.en EC, a.s.), Tepláreň v Kladne a v Zlíne (Teplárna Kladno s.r.o.). Nasledujúca tabuľka približuje základný prehľad pôsobenia tejto spoločnosti v oblasti ťažby a výroby uhlia. (Sev.en Energy AG, 2019)

Tabuľka 1 Prehľad ťažby uhlia spoločnosti Sev.en Energy

Lomy	Sev.en Energy AG	
	ČSA	Vršany
Produkcia [mil. ton]	11,4	
Priemerná výhrevnosť uhlia [MJ/kg]	17,5	11
Zásoby [mil. ton]	750	250
Predpokladaný rok ukončenia ťažby	2024	2050

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Sev.en Energy AG. Ťážime a rekultivujeme [online] ©2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/cz/cinnosti/#tezba-a-rekultivace>

Čo sa týka ťažby uhlia, patrí sem spoločnosť Vršanská uhelná a.s., ktorá ťaží uhlie v lokalite Vršany (Severočeská panva) a od roku 2013 má zmluvu s elektrárnou Počerady na zásobovanie uhlím až do vyčerpania zásob. Ďalšia spoločnosť je Severní energetická a.s., ktorá zaisťuje ťažbu v lokalite Československá armáda (ČSA), táto lokalita má podľa údajov spoločnosti zásoby uhlia až na 100 rokov, avšak vďaka uzneseniu vlády z roku 1991 o územných limitoch ťažby, bude ťažba pravdepodobne ukončená omnoho skôr. Posledná spoločnosť zameraná na ťažbu a spracovanie uhlia patriaca do tejto skupiny je Důl kohinoor a.s., ktorá v dnešnej dobe dobýva zbytkové zásoby uhlia v bočných častiach lomu ČSA. (Sev.en Energy AG, 2019)

2.1.2. Severočeské doly, a.s.

Spoločnosť Severočeské doly, a.s. patrí do skupiny ČEZ, a.s. Ťažba tejto spoločnosti prebieha v oblasti Severočeskej panvy, a to konkrétne v lokalitách Tušimice a Bílina (Severočeské doly a.s., 2019)

Táto spoločnosť je najväčším producentom hnedého uhlia v Českej republike a podľa posledných dostupných čísel produkuje ročne približne 23 mil. ton hnedého uhlia. Nasledujúca tabuľka opäť zobrazuje základne informácie o pôsobení tejto spoločnosti v ťažbe a produkcii uhlia. (Severočeské doly a.s., 2015)

Tabuľka 2 Prehľad ťažby uhlia spoločnosti Severočeské doly a.s.

Lomy	Severočeské doly a.s.	
	Bílina (DB)	Tušimice (DNT)
Produkcia [mil. ton]	10	13,5
Priemerná výhrevnosť uhlia [MJ/kg]	9,5 - 20	
Zásoby [mil. ton]	100 - 120	
Predpokladaný rok ukončenia ťažby	2055	2040

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Severočeské doly a.s. *Severočeské doly a.s. Data a Fakta*. [online] ©2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: https://www.sdas.cz/images/681161750_brozura-sd-fakta-a-cisla_2015_web.pdf

Podľa uznesenia vlády č. 1176/2008 by mala byť ťažba v dole Bílina ukončená okolo roku 2035, spoločnosť však uvádza že by nemal byť problém predĺžiť ťažbu až do roku 2055. Dol Tušimice väčšinu paliva poskytuje pre tepelné elektrárne skupiny ČEZ a.s.. Povolenie na prevádzku dolu bolo vydané do roku 2029, na stránkach Severočeských dolov a.s. je však možné nájsť informáciu, že prevádzku plánujú až do roku 2040. (Severočeské doly a.s., 2019)

2.1.3. Sokolovská uhelná a.s.

Sokolovská uhelná a.s. je najmenšou z týchto spomenutých spoločností. Jej ťažba je umiestnená v sokolovskej panve, konkrétne v lome Jíří ve Vintířově a v lome Družba v Novom Sedle. Približne 50% z vyrobeného množstva uhlia firma predá v zahraničí alebo v Česku, zvyšnú časť firma zhodnocuje vrámci svojho využitia na výrobu elektrickej energie a tepla, napríklad v Elektrárni Tisová, a.s., ktorú prevádzkuje. (Sokolovská uhelná a.s., 2019)

2.1.4. Porovnanie

Nasledujúca tabuľka obsahuje jednotlivé druhy uhlia, ktoré spomenuté spoločnosti uvádzajú vo svojich katalógoch. Boli vybrané len tie druhy uhlia, ktoré sú vhodné na spaľovanie vo veľkých zdrojoch. Okrem týchto druhov uhlia spoločnosti ponúkajú aj uhlie s väčšou zrnitosťou, ktoré je vhodné pre menšie zdroje (napríklad kôstka alebo orech). Všetky hodnoty sú uvádzané ako priemer.

Tabuľka 3 Základné vlastnosti a prvkové zloženie vybraných druhov uhlia

Sev.en EG									
Druh uhlia	Základné vlastnosti uhlia					Prvkové zloženie uhlia			
	Trieda zrnienia [mm]	Výhrevnosť Q_i^r [MJ/kg]	Obsah popola A^d [%]	Obsah vody W_t^r [%]	Obsah prchavej horľaviny V^{daf} [%]	Síra S^{daf} [%]	Uhlík C^{daf} [%]	Vodík H^{daf} [%]	Dusík N^{daf} [%]
p	0 - 10	18,9	11	29	51	2,4	72	5,9	1,1
hp1	0 - 10	16,5	20,5	28	52	2,4	72	6	1,1
hp2	0 - 10	13,5	33	28	52	1,9	69	6	1,1
ps2	0 - 40	14,5	28,5	26,5	53	2,2	70	6,2	1,1
ps3	0 - 40	11,5	41	26,5	56	1,8	70	6,2	1,1
ts1	0 - 40	18	17	27,5	52	2,4	73	6,2	1,1

ps3	0 - 40	11,4	39	27	57	1,8	70	6,2	1,1
Severočeské doly									
hp1	0 - 10	17	13,1	29	44	2,4	70,8	6,2	0,87
ps1	0 - 40	15	22,5	27	46	2,4	70,3	6,2	0,9
ps2	0 - 40	11,5	40	25	50	1,9	68,5	6	0,84
Sokolovská uhelná									
hp1	0 - 12	13,75	19	39	51,5	0,56	74,14	5,71	1
ps1	0 - 40	11,75	30	36,5	53,5	1,1	72,31	6,03	0,84
ps2	0 - 40	11,25	33	36	56	1,04	70,28	6,18	0,64
ps3	0 - 40	10,75	36,5	35	57,5	1,43	72,62	5,98	0,8
ps1	0 - 40	11,75	31	35,5	55	1,21	72,77	6,14	0,84
ps2	0 - 40	11,25	34,5	34	55,5	1,5	71,69	5,96	0,81
ps3	0 - 40	10,75	38,5	33	57	1,15	70,29	6,45	0,74
ps1	0 - 10	11,75	28	38	52,5	0,71	71,7	5,83	1,02
ps2	0 - 10	11,25	32	37,5	53	0,78	71,87	5,86	0,87
ps3	0 - 10	10,75	34	37	55	0,87	71,46	5,89	0,87
ts2	0 - 40	9,75	38	35,5	53	0,45	71,18	5,88	0,85
hp1	0 - 40	13,75	19	39	52	0,54	73,7	5,96	1,06
ps1	0 - 40	11,75	28	37,5	55	-	73,7	5,96	1,06
ps3	0 - 40	10,75	38,5	33	57	-	73,7	5,96	1,06
sušený HU prach	0 - 40	21,5	22	4,5	50,5	0,73	73,42	5,67	1,03

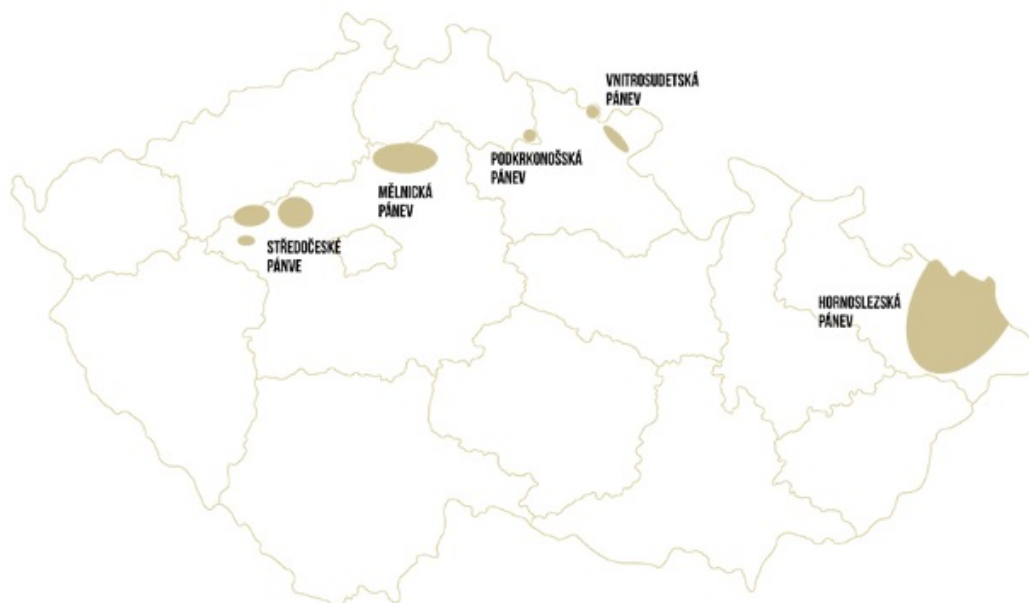
p - prach
hp - hruboprach
ps priemyslová zmes
ts – topná zmes

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Sev.en Energy AG. *Katalog mosteckého uhlí* [online] ©2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/files/katalog-uhli2019.pdf>; Severočeské doly a.s. *Katalog hnědého uhlí* [online] ©2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: http://www.sd-bilinskeuhli.cz/dokumenty/Katalog_2019.pdf; Sokolovská uhelná a.s. *Katalog sokolovského hnědého uhlí a briket na rok 2009* [online] ©2009 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: https://www.suas.cz/images/dokumenty/142030152149809045aec37_1001625671497f08d8993a2_katalog_SUAS_09.pdf

2.2. Čierne uhlie

V súčasnosti sa ťažbe a produkcii čierneho uhlia venuje v Českej republike jediná spoločnosť, a to OKD, a.s. Aktívna ťažba prebieha v piatich doloch (ČSA, Lazy, Darkov a ČSM – sever,juh). V roku 2018 bola celková produkcia čierneho uhlia 4,5 milióna ton, od roku 2010 však došlo k viac než 50% poklesu ťažby čierneho uhlia a vzhľadom k plánovanému ukončeniu ťažby v ďalších doloch bude produkcia čierneho uhlia naďalej klesať. Podľa výročnej správy OKD môže spoločnosť najdlhšie ťažiť v lokalite ČSA, a to do roku 2023. (Ministerstvo priemyslu a obchodu, 2019; OKD, a.s., 2019)

Obrázok 4 Doly pre ťažbu čierneho uhlia na území Českej republiky



Zdroj: Carbounion bohemia, spol. s.r.o. *Jak velké jsou zásoby uhlí v ČR? Přinášíme vám přehled!* 2018 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.carbounion.cz/radce/jak-velke-jsou-zasoby-uhli-v-cr-prinasime-vam-prehled>

2.3. Zemný plyn

Ako už bolo spomenuté v kapitole 6, celková ročná spotreba zemného plynu za rok 2018 predstavuje 8,2 miliardy m³, čo predstavuje 87 306 GWh (pri priemernej ročnej hodnote spalného tepla 10,67 kWh/m³ v Českej republike). Z dlhodobého hľadiska spotreba zemného plynu stagnuje. Tento fakt je však ovplyvnený teplotami, ktoré sa za posledné desaťročie často nachádzajú nad teplotným priemerom. V prípade chladnejšieho počasia počas roka je možné vidieť súvislosť s nárastom spotreby zemného plynu (roky 2015 až 2016). (Energetický regulační úřad, 2019)

Celková ťažba zemného plynu na území Českej republiky v roku 2018 predstavovala 2,9 miliardy m³ (31 441 GWh). Je však dôležité podotknúť, že časť plynu sa spotrebováva na naplnenie zásobníkov plynu, tzv. vtláčanie plynu, ktoré sa využíva pri výpadkoch zásob plynu (stav zásobníkov plynu v roku 2018 bol na hodnote 2,2 miliardy m³ – 23 711 GWh). Zemný plyn sa na území ČR taktiež vyrába, vyrobené množstvo zemného plynu je však zanedbateľné v porovnaní s celkovou spotrebou (rok 2018 – 137 miliónov m³ – 1 477 GWh). Jeho produkcia navyše medziročne poklesla o 6,2%. (Energetický regulační úřad, 2019)

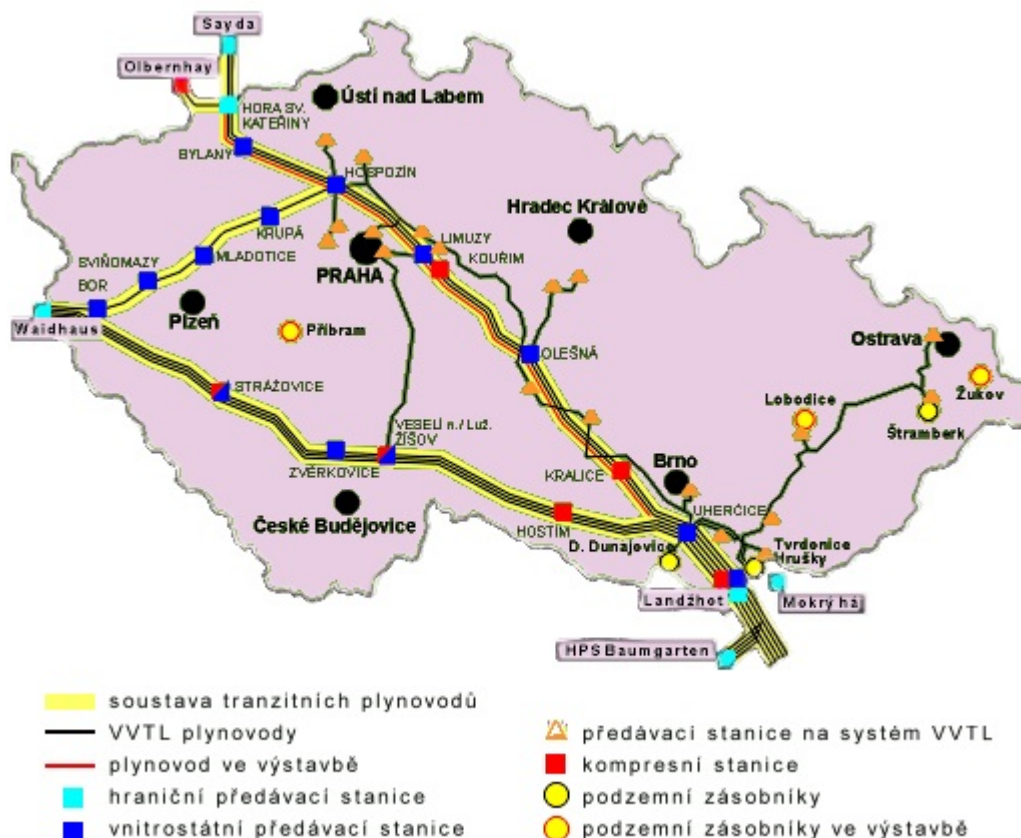
Prevádzkovatelia zásobníkov plynu na území ČR:

- Innogy GS
- MND GS
- Moravia GS

Ťažobné organizácie v Českej republike (Česká geologická služba, 2018):

- MND a.s., Hodonín
- Green Gas DPB, a.s., Paskov
- LAMA GAS & OIL s.r.o., Hodonín
- UNIMASTER spol. s.r.o., Praha
- Unigeo a.s., Ostrava - Hrabová

Obrázok 5 Prepravný systém plynu Transgas



Zdroj: ČEZ a.s. *Zemní plyn* [online] ©2019 [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/zempl_4.html

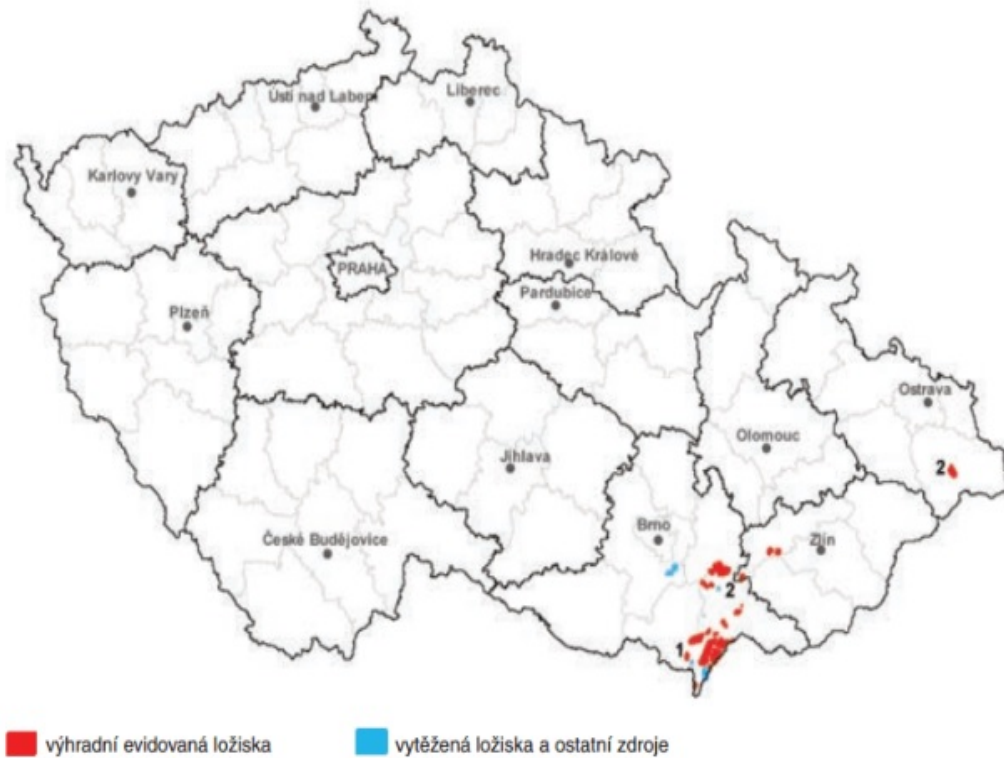
Vzhľadom k vyššie uvedeným číslam je zrejmé, že domáca produkcia zemného plynu je nedostačujúca, väčšina zemného plynu sa teda na územie Česka dováža. Tok plynu zo zahraničia predstavoval v roku 2018 hodnotu 39,7 miliardy m³ (424 107 GWh), veľká časť z tohto plynu však pretečie územím Česka ďalej. Sústavu tranzitných plynovodov, zásobníkov a predávacích staníc zobrazuje Obrázok 5. Ťažba zemného plynu je sústredená na južnú a severnú Moravu. Existujú taktiež už vyťažené ložiská, ktoré sa pri vhodných podmienkach stále využívajú ako podzemné zásobníky zemného plynu. (Energetický regulační úřad, 2019; ČEZ, a.s., 2019)

2.4. Ropa

Ťažba ropy prebieha na území ČR v oblasti karpatskej předhlubne a viedenskej panvy (viď Obrázok 6). Domáca produkcia ropy však nie je dostačujúca na pokrytie

dopytu, pretože predstavuje len približne 1 až 2% spotreby. Za rok 2017 dosiahla ťažba ropy 108 tisíc ton, pričom dovoz dosiahol až 7 813,6 tisíc ton. Ťažbou ropy sa zaoberajú 2 spoločnosti - MND a.s., Hodonín a LAMA GAS & OIL s.r.o., Hodonín. (Majling, 2016; Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019; Česká geologická služba, 2018)

Obrázok 6 Ložiská ropy v ČR



Zdroj: MAJLING, E. Těžba ropy a zemního plynu v České republice – historie a současnost In: *oenergetice.cz* [online]. 19.12.2016 [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ropa/tezba-ropy-a-zemniho-plynu-v-ceske-republice-historie-a-soucasnost/>

Zásoby ropy na území Česka boli v roku 2017 približne 1 400 tisíc ton. Tieto zásoby by pri súčasnej úrovni ťažby mali vydržať na 13 rokov. V roku 2017 bolo zároveň objavené nové ložisko ropy a zemného plynu, ktoré sa nachádza na južnej Morave a podľa odhadov obsahuje 3 mil. barelov ropy a 100 mil. m³ zemného plynu. (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019)

3. Legislatíva

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou zníženia oxidov dusíka z veľkých a zvlášť veľkých spaľovacích zdrojov. Emisie oxidov dusíka patria medzi znečisťujúce látky vznikajúce spaľovaním fosílnych palív, preto bude následný rozbor venovaný zákonu č. 201/2012 Sb. a vyhláške 415/2012 Sb., z ktorých bude analyzovaná časť práve venovaná práve tejto problematike.

Ďalším analyzovaným dokumentom bude *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants (BREF)*. Táto smernica vznikla ako výsledok informácií medzi členskými štátmi EÚ, príslušnými priemyselnými odvetvami a mimovládnyimi organizáciami podporujúcimi ochranu životného prostredia. Nové emisné limity stanovené touto legislatívou budú musieť plniť všetky veľké spaľovacie zariadenia od polovice roku 2021. (Budín, 2017)

Túto smernicu schválila Európska Únia dňa 31.7.2017 a jej cieľom je stanoviť kľúčové environmentálne problémy v sektore veľkých spaľovacích zariadení (menovitý tepelný príkon nad 50 MW) a na základe identifikácie najlepších úrovní environmentálneho správania stanoviť výber najlepších dostupných techník (BAT) k dosiahnutiu súvisiacich úrovní emisií a monitorovania týchto emisií. (European Commission, 2017)

Zákon o ochrane ovzdušia je základná právna norma v Českej republike, ktorá vychádza z predpisov Európskej únie a zásadne ovplyvňuje prevádzku energetických zdrojov. Tento zákon nadobudol účinnosť od 1. septembra 2012 a upravuje (Zákon 201/2012 Sb.):

- *prípustnú úroveň znečistenia a znečisťovania ovzdušia*
- *spôsob posudzovania prípustnej úrovne znečistenia a znečisťovania ovzdušia a ich vyhodnotenie*
- *nástroje ku znižovaniu znečistenia a znečisťovania ovzdušia*
- *práva a povinnosti osôb a pôsobnosť orgánov verejnej správy pri ochrane ovzdušia*
- *práva a povinnosti dodávateľov pohonných hmôt a pôsobnosť orgánov verejnej správy pri sledovaní a znižovaní emisií skleníkových plynov z pohonných hmôt v doprave*

Vyhláška o prípustné úrovni znečisťovania a jejím zjišťovaní a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší je doplňujícím nariadením vlády k zákonu o ochrane ovzdušia. Táto vyhláška nadobudla účinnosť 1. decembra 2012 a je spracovaná na základe príslušných predpisov Európskej únie a stanovuje (Vyhláška 415/2012 Sb.):

- *získovanie úrovne znečisťovania a vyhodnotenie plnenia emisných limitov*
- *spaľovanie palív*
- *požiadavky na kvalitu palív*

- *tepelné spracovanie odpadu*
- *nakladanie s prchavými organickými látkami*
- *ostatné stacionárne zdroje*
- *všeobecné emisné limity*
- *kompENZAČNÉ OPATRENIA*
- *ustanovenia prechodné a záverečné*

Nižšie sú uvedené vybrané pojmy, ktoré definuje zákon a vyhláška (zákon č.201/2012 Sb., vyhláška 415/2012 Sb.):

- *Znečisťujúca látka – každá látka, ktorá svojou prítomnosťou v ovzduší má, alebo môže mať škodlivé účinky na ľudské zdravie, alebo životné prostredie, alebo obťažuje zápachom*
- *Znečisťovanie (emisia) – vnášanie jednej alebo viacerých znečisťujúcich látok do ovzdušia*
- *Úroveň znečistenia (imisia) – hmotnostná koncentrácia znečisťujúcej látky v ovzduší, alebo jej depozícia na zemský povrch za jednotku času*
- *Stacionárny zdroj – ucelená, technicky ďalej nedeliteľná stacionárna technická jednotka alebo činnosť, ktorá znečisťuje alebo by mohla znečisťovať, ak nejde o stacionárnu technickú jednotku používanú len k výskumu, vývoji alebo skúšaniam nových výrobkov a procesov*
- *Emisný limit – najvyššie prípustné množstvo znečisťujúcej látky alebo skupiny znečisťujúcich látok vnášané do ovzdušia zo stacionárneho zdroja*
- *Emisný strop – najvyššie prípustné množstvo znečisťujúcej látky vnášané do ovzdušia za kalendárny rok*
- *Imisný limit – najvyššia prípustná úroveň znečistenia stanovená týmto zákonom*
- *Emisný faktor – merná výrobná emisia, typická pre určitú skupinu stacionárnych zdrojov*

3.1. Stacionárne zdroje

Ako už bolo spomenuté vyššie stacionárny zdroj je zariadenie (technická jednotka), ktorá má alebo by mohla mať vplyv na znečisťovanie. Zákon ďalej rozširuje definíciu na spaľovací stacionárny zdroj (tzn. spálenie paliva za účelom získania tepla).

Zákon č. 201/2012 Sb. nahradzuje slovné označovanie kategórií zdrojov znečisťovania ovzdušia len číselným označením, pričom všetky zdroje sa rozlišujú podľa tepelného príkonu. Navyše pre zdroje o tepelnom príkone menšom než 0,3 MW zavádza minimálne emisné požiadavky. Rozdelenie kategórií podľa starého a nového zákona je uvedené v Tabuľke 4.

Tabuľka 4 Kategórie zdrojov znečisťovania ovzdušia

zákon č. 86/2002 Sb.	zákon č. 201/2012 Sb.
malé (<0,2 MW)	Minimálne emisné požiadavky < 0,3 MW
stredné (>0,2 MW - 5 MW)*	0,3 MW - < 50 MW
veľké (>5 MW - 50 MW)	
zvlášť veľké (>50 MW)	50 - 100 MW
	> 100 MW - 300 MW
	> 300 MW

* porovnanie: stredné zdroje (0,2 MW – 0,3 MW) spadajú podľa nového zákona pod minimálne emisné požiadavky

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Zákona č. 86/2002 Sb., Zákona č. 201/2012 Sb.

Minimálne emisné požiadavky sú stanovené pre stacionárne zdroje:

- do 65 kW; >65 – 187 kW; >187 – 300 kW

Pokiaľ sú umiestnené jednotlivé zdroje v rovnakej prevádzke, sú označené rovnakým kódom, a zároveň by mohlo dochádzať ku znečisťovaniu spoločným výduchom alebo komínom, ich menovité tepelné príkony sa sčítajú. Toto nariadenie sa nevzťahuje na zdroje s tepelným príkonom do 300 kW umiestnené v bytových domoch (Zákon č. 201/2012 Sb.).

BREF navyše rozdeľuje spaľovacie zdroje na nové a existujúce a definuje ich ako (European Commission, 2017):

- nový zdroj – „*spaľovacie zariadenie, ktoré bolo po inštalácii prvýkrát povolené po uverejnení týchto záverov o BAT, alebo po úplnej výmene spaľovacieho zariadenia na existujúcich základoch po uverejnení týchto záverov o BAT*“
- existujúci zdroj – „*spaľovacie zariadenie, ktoré nie je novým zariadením*“

3.2. Emisné limity

V ďalších podkapitolách budú uvedené špecifické emisné limity pre spaľovacie stacionárne zdroje rozdelené podľa ich menovitého tepelného príkonu podľa Vyhlášky 415/2012 Sb.

Emisné limity pre oxidy dusíka vyjadrujú ich koncentráciu v suchom plyne a sú vzťahované k celkovému menovitému tepelnému príkonu a k normálnym stavovým podmienkam. Normálne stavové podmienky sú dané pri (Vyhláška 415/2012 Sb.):

- Referenčnom obsahu kyslíku ($O_{2,ref}$) v odpadnom plyne:
 - 6% - pre pevné palivá
 - 3% - pre plynné a kvapalné palivá
- Tlaku – 101,325 kPa
- Teplotu – 273,15 K
- NO_x sa počíta ako oxid dusičitý (NO_2)

3.2.1. Emisné limity zdrojov o menovitom tepelnom príkone 50 MW a vyššom

Emisné limity sú uvádzané v [mg.m⁻³]

Spaľovacie stacionárne zdroje uvedené do prevádzky do 7.1.2014

V prípade plynových turbín a piestových spaľovacích motorov je referenčný obsah kyslíku 15%. Ďalej sa tieto emisné limity nevzťahujú na záložné zdroje energie, ktoré sú v prevádzke menej ako 300 hodín ročne.

Tabuľka 5 Emisné limity pre zdroje o tepelnom príkone > 50 MW

Druh paliva	50 - 100 MW	> 100 - 300 MW	> 300 MW
Pevné palivo všeobecne	300	200	200
Biomasa	300	250	200
Rašelina	300	250	200
Kvapalné palivo všeobecne	450	200	150
Skvapalnený plyn	200	200	200
Plynné palivo všeobecne	200	200	200
Zemný plyn	100	100	100
Koksárenský plyn	200	200	200
Vysokopecný plyn	200	200	200
Plyn zo splyňovania	200	200	200

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Vyhlášky 415/2012 Sb.

Spaľovacie stacionárne zdroje uvedené do prevádzky po 7.1.2014

Tabuľka 6 Emisné limity pre zdroje o tepelnom príkone > 50 MW

Druh paliva	50 - 100 MW	> 100 - 300 MW	> 300 MW
Pevné palivo všeobecne	300; 400 ¹	200	150; 200 ¹
Biomasa	250	200	150
Rašelina	250	200	150
Kvapalné palivo všeobecne	300	150	100
Skvapalnený plyn	300	150	150
Plynné palivo všeobecne	100	100	100
Zemný plyn	100	100	100
Koksárenský plyn	100	100	100
Vysokopecný plyn	100	100	100
Plyn zo splyňovania	100	100	100

1) Tento emisný limit sa vzťahuje len na spaľovanie práškoveho hnedého uhlia

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Vyhlášky 415/2012 Sb.

Emisné limity platné od roku 2021 podľa BREF

Tabuľka 7 Emisné limity podľa BREF pre zdroje o tepelnom príkone > 50 MW

Spaľovacie zariadenie s menovitým príkonom [MW _t]	Ročný priemer [mg/Nm ³]		Denný priemer [mg/Nm ³]	
	Nový zdroj	Existujúci zdroj ¹	Nový zdroj	Existujúci zdroj ^{2,3}
< 100	100 - 150	100 - 270	155 - 200	165 - 330
100 - 300	50 - 100	100 - 180	80 - 130	155 - 210
> 300 Fluidný kotol - čierne a hnedé uhlie Práškový kotol - hnedé uhlie	50 - 85	< 85 – 150 ^{4,5}	80 - 125	140 – 165 ⁶
> 300 Práškový kotol - čierne uhlie	65 - 85	65 - 150	80 - 125	< 85 – 165 ⁷

- 1) Tento emisný limit sa nevzťahuje na zdroje fungujúce < 1 500 hodín/ročne
- 2) Pre zdroje fungujúce < 500 hodín/ročne sú tieto limity orientačné
- 3) V prípade práškových kotlov spaľujúcich čierne uhlie, ktoré sú uvedené do prevádzky najneskôr do 1.6.1987 a sú v prevádzke menej ako 1 500 hodín/ročne a u ktorých sa nedá aplikovať metóda SCR ani SNCR platí emisný limit 340 mg/Nm³
- 4) Nižšia hodnota platí v prípade použitia SCR
- 5) Najvyššia hodnota 175 mg/Nm³ platí pre fluidné kotle uvedené do prevádzky najneskôr 7.1.2014 a pre práškové kotle spaľujúce hnedé uhlie
- 6) Najvyššia hodnota 220 mg/Nm³ platí pre fluidné kotle uvedené do prevádzky najneskôr 7.1.2014 a pre práškové kotle spaľujúce hnedé uhlie
- 7) V prípade zdrojov uvedených do prevádzky najneskôr 7.1.2014 platí emisný limit 200 mg/Nm³ pre zdroje pracujúce > 1 500 hodín/ročne a emisný limit 220 mg/Nm³ pre zdroje pracujúce < 1 500 hodín/ročne

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe European Commission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. doi:10.2760/949. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>

Ako vyplýva z priložených tabuliek, emisné limity budú od roku 2021 výrazne sprísnené. Michal Kubíček uvádza, že takéto opatrenia sa dotknú takmer všetkých zdrojov spaľujúcich uhlie a budú mať za následok nadmerný rast prevádzkových nákladov. Navyše budú potrebné ďalšie investície k dosiahnutiu týchto emisných limitov, čo môže mať až likvidačný dopad na teplárenstvo v Českej republike a zároveň narušiť bezpečný chod elektrizačnej sústavy. (Budín, 2017)

3.2.2. Emisné limity zdrojov o menovitom tepelnom príkone vyššom než 0,3 MW a nižšom než 50 MW

Emisné limity sú uvádzané v [mg.m⁻³]

Tieto špecifické emisné limity vstúpili do platnosti 1.1.2018. Pre každý zdroj platia normálne stavové podmienky ako v prípade zdrojov nad 50 MW, mení sa referenčný obsah kyslíku v odpadnom plyne:

- Pevné palivá – 6 %
- Biomasa – 11 %

- Plynné a kvapalné palivá – 3 %

V prípade plynových turbín je referenčný obsah kyslíku 15 % (spaľovacie motory – 5 %). Ďalej sa tieto emisné limity nevzťahujú na záložné zdroje energie, ktoré sú v prevádzke menej ako 300 hodín ročne.

Tabuľka 8 Emisné limity pre kotle a teplovzdušné priamotopné stacionárne zdroje o tepelnom príkone > 0,3 MW - < 50 MW

Druh paliva	> 0,3 – 1 MW	> 1 - 5 MW	> 5 - 50 MW
Pevné palivo	600	500	500
Kvapalné palivo	130	130	130
Skvapalnený plyn	100 ¹	100 ¹	100 ¹
Plynné palivo	100 ¹	100 ¹	100 ¹

- 1) V prípade, že tento limit nie je možné dosiahnuť s použitím nízko emisných horákov, platí špecifický emisný limit 200 mg.m⁻³

Pozn. V prípade spaľovania ťažkého topného oleja u zdrojov s tepelným príkonom väčším než 1 MW platí špecifický emisný limit 450 mg.m⁻³

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Vyhlášky 415/2012 Sb.

Tabuľka 9 Emisné limity pre piestové spaľovacie motory o tepelnom príkone > 0,3 MW - < 50 MW

Druh paliva	> 0,3 – 1 MW	> 1 - 5 MW	> 5 - 50 MW
Kvapalné palivo	400	400	400
Plynné palivo a skvapalnený plyn	500	500	500

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Vyhlášky 415/2012 Sb.

Tabuľka 10 Emisné limity pre plynové turbíny o tepelnom príkone > 0,3 MW - < 50 MW

Druh paliva	> 0,3 – 1 MW	> 1 - 5 MW	> 5 - 50 MW
Kvapalné palivo	300	300	300
Plynné palivo a skvapalnený plyn	250	50	50

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Vyhlášky 415/2012 Sb.

3.2.3. Minimálne emisné požiadavky o menovitom tepelnom príkone do 300 kW

Minimálne emisné požiadavky stanovuje Zákon č.201/2012 Sb. a definuje ich pre stacionárne zdroje do 300 kW. Minimálne emisné požiadavky stanovujú medzné hodnoty emisií len pre oxid uhoľnatý, TOC (celkový organický uhlík), TZL (tuhé znečisťujúce látky). Pre oxidy dusíka minimálne emisné požiadavky nie sú definované.

3.2.4. Špecifické emisné limity pre spaľovacie stacionárne zdroje ku spaľovaniu viac druhov palív

V prípade spaľovacích stacionárnych zdrojov, ktoré môžu spaľovať alebo spaľujú viac druhov palív sú stanovené špecifické emisné limity, ktoré sú dané nasledovným postupom (Vyhláška 415/2012 Sb.):

- Pre každý typ paliva a znečisťujúcu látku sa priradí hodnota podľa špecifických emisných limitov a menovitých tepelných príkonov ako je uvedené vyššie v tejto diplomovej práci
- Ďalší postup je určenie váženej hodnoty špecifických emisných limitov nasledujúcim spôsobom: „jednotlivé hodnoty špecifických emisných limitov sa vynásobia tepelným príkonom každého paliva a tento súčin sa vydělí súčtom tepelných príkonov dodaných všetkými palivami.“
- Získané vážené hodnoty sa sčítajú pre jednotlivé palivá

3.3. Meranie emisií

Podľa vyhlášky 415/2012 Sb. sa úroveň znečistenia zisťuje buď jednorazovým, alebo kontinuálnym meraním.

Jednorazové meranie sa používa (Vyhláška 415/2012 Sb.):

- Pri prvom uvedení stacionárneho zdroja do prevádzky
- Pri každej zmene paliva, suroviny alebo tepelne spracovávaného odpadu
- Pri každom zásahu do konštrukcie, alebo vybavenie stacionárneho zdroja, ktorý by mohol viesť k zmene emisií

Následne sa jednorazové merania uskutočňujú podľa ďalších pravidiel stanovených touto vyhláškou, v prípade veľkých spaľovacích zdrojov o menovitom výkone vyššom než 50 MW sa jednorazové meranie uskutočňuje dvakrát za kalendárny rok. Jednorazové meranie emisií sa uskutočňuje pomocou prístrojov určených na kontinuálne meranie emisií, alebo prípadne samostatným odberom.

V prípade kontinuálneho merania emisií je nutné postupovať podľa presne definovaných technických noriem podľa zákona o technických požiadavkách na výrobky. Zariadenie na kontinuálne meranie musí byť schopné stanoviť hmotnostnú koncentráciu znečisťujúcich látok v intervale od 10 do 250 % špecifického emisného limitu.

3.4. Požiadavky na kvalitu palív

Vyhláška 415/2012 Sb. definuje požiadavky na kvalitu pre pevné a kvapalné palivá len do celkového menovitého tepelného príkonu 5 MW. Nové požiadavky nadobudli platnosť od 1.1.2014 a určujú obsah vody v palive, výhrevnosť, obsah popola a mernú sírnatosť, v prípade kvapalných palív je určených viac parametrov, a to napr. obsah síry a jej zlúčenín v palive atď.

4. Oxidy dusíka (NO_x)

Emisie NO_x patria medzi hlavné látky znečisťujúce ovzdušie, pretože sú vysoko reaktívne a tvoria kyslé dažde, smog a troposférický ozón. (Liu a kol., 2015; The Babcock & Wilcox, 1992)

Podľa informácií z Integrovaného registra znečisťovania (Ministerstvo životného prostredia Českej republiky, 2006) patria medzi najviac vyskytujúce sa oxidy dusíka:

- Oxid dusnatý – NO (bezfarebný plyn bez zápachu)
- Oxid dusičitý – NO₂ (červenohnedý plyn so štipľavým zápachom)

Ďalšie oxidy dusíka vyskytujúce sa v menšom množstve sú:

- Oxid dusitý – N₂O₃
- Tetraoxid dusíku - N₂O₄
- Oxid dusičitý - N₂O₅

V prípade ďalších oxidov dusíka je riziko nízke, pretože sa nevyskytujú vo veľkých množstvách. Pre predstavu sú nižšie uvedené hustoty najpočetnejších oxidov dusíka v porovnaní so vzduchom.

Tabuľka 11 Hustoty jednotlivých oxidov dusíka a vzduchu

Látka	Jednotka	Hustota pri 101,325 kPa a 20°C
NO ₂	[kg.m ⁻³]	1,448
NO		1.430
Vzduch		1.29

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Ministerstvo životného prostredia Českej republiky. *Integrovaný registr znečisťovania* [online]. 2006. [Cit. 22.7.2018]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/Oxidy_dusiku_Karta_latky_11012019.pdf

Primárnym zdrojom emisií NO_x je spaľovanie fosílnych palív vo veľkých a zvlášť veľkých spaľovacích zariadeniach. (Hill & Smoot, 2000)

„Emisie oxidov dusíka sú dnes veľmi závažným problémom hlavne vďaka tomu, že sú spojené so spaľovaním aj ušľachtilých palív (plyn, nafta) a biomasy.“ (Ministerstvo životného prostredia Českej republiky, 2006)

4.1. Zdravotné a environmentálne účinky NO_x

Dusík ako samostatný prvok je v primeranom množstve nevyhnutný pre rast rastlín, avšak oxidy dusíka ako NO a NO₂ vo vyšších koncentráciách rastliny poškodzujú a činia ich menej odolnejšie voči okolitým vplyvom. (Ministerstvo životného prostredia Českej republiky, 2006)

Oxid dusnatý (NO) je taktiež prispievateľom ku tzv. skleníkovému efektu, keďže sa radí medzi skleníkové plyny. Oxid dusnatý sa hromadí v atmosfére a s ďalšími skleníkovými plynmi pohlcuje infračervené žiarenie zemského povrchu, ktoré tým pádom

neunikne do vesmírneho priestoru. (Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2006)

Keď sa NO_x uvoľní do atmosféry, podieľa sa na sérii reakcií, ktoré tvoria sekundárne znečisťujúce látky. NO_x môže reagovať so slnečným žiarením a uhlíkovými radikálmi, vďaka čomu následne vzniká prízemný ozón, mestský smog, kyslé dažde a potencionálne karcinogény vo vzduchu. Každá z týchto častíc môže mať významný vplyv na ľudské zdravie a životné prostredie. Podľa Babcock & Wilcox (1992) je však hlavným zdrojom emisií oxidov dusíka vo veľkých mestách automobilová doprava. Avšak veľké zdroje spaľujúce fosílna palivá sú taktiež významným prispievateľom k tvorbe emisií NO_x v globálnom meradle. (The Babcock & Wilcox, 1992; The Babcock & Wilcox, 2005)

4.1.1. Kyslé dažde

Ako už bolo spomenuté vyššie oxidy dusíka prispievajú k tvorbe kyslých dažďov. NO_x spoločne s oxidom siričitým (SO_2) utvárajú kyslé zlúčeniny pri reakcii s vodnou parou. Tieto kyseliny tvoria viac ako 90% kyslých dažďov. Tvorba kyseliny dusičnej je znázornená v nasledujúcej reakcii (Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2006; The Babcock & Wilcox, 2005):



Množstvo dusíku, ktoré sa takto dostáva do pôdy už má značný dopad na životné prostredie, pri väčších množstvách môže dochádzať k úhynu rýb a k nežiadúcej tvorbe veľkého množstva vodných rastlín tzv. eutrofizácii vôd. (Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2006)

4.1.2. Vplyv na človeka

NO_x reaguje v atmosfére s inými chemikáliami za vzniku dusičnanov, ktoré prispievajú k časticiam menším ako $\text{PM}_{2,5}$ (inhalovateľná časť znečisťujúcich látok z okolia). Vdychovanie vysokých koncentrácií oxidov dusíka dráždi dýchacie cesty a môže viesť k závažným zdravotným komplikáciám, v krajných prípadoch môže spôsobiť dokonca smrť. Je však dôležité podotknúť, že oxidy dusíka sa bežne v takto vysokých koncentráciách v ovzduší nenachádzajú. (Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2006; The Babcock & Wilcox, 2005)

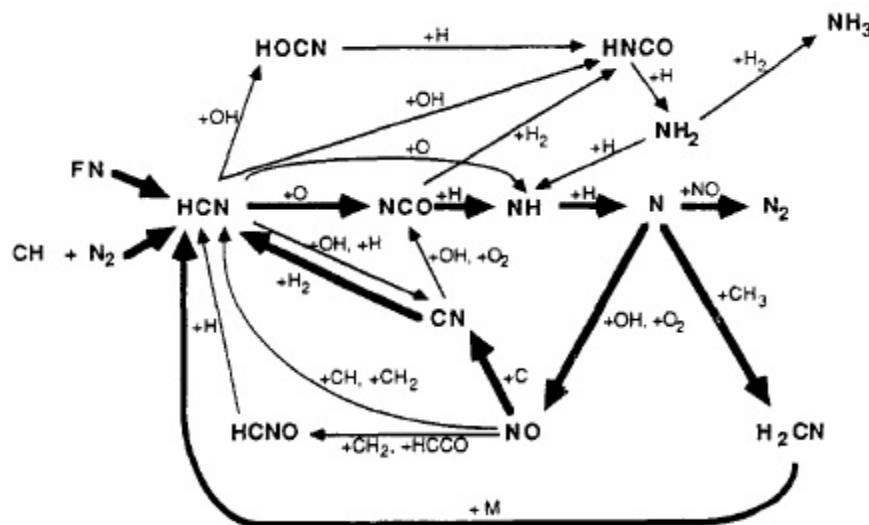
5. Tvorba NO_x

Spaľovanie akýchkoľvek fosílnych palív vytvára určitú hladinu NO_x v dôsledku vysokých teplôt a dostupnosti kyslíka a dusíka zo vzduchu aj paliva. Pri procese spaľovania vzniká zvyčajne 90 až 95% NO a zvyšok tvorí NO₂. Akonáhle spaliny opustia komín, väčšina NO nakoniec v atmosfére oxiduje na NO₂. Oxid dusičitý (NO) po vstupe do atmosféry reaguje pri tvorbe sekundárnych znečisťujúcich látok. Ako už bolo spomenuté vyššie, pri reakcii so slnečným žiarením a uhlíkovými radikálmi, môže NO₂ tvoriť kyslé zložky dažďov a vytvárať smog. (The Babcock & Wilcox, 1992)

Podľa viacerých autorov ako sú Glarborg, Jensen a Johnsson (2003), Norman, Andersson, Leckner a Johnsson (2009), Li, Thompson a Peng (2004) je možné rozdeliť mechanizmy tvorby oxidov dusíka (NO_x) na:

- Termické (vysokoteplotné)
- Promptné (okamžité)
- Palivové

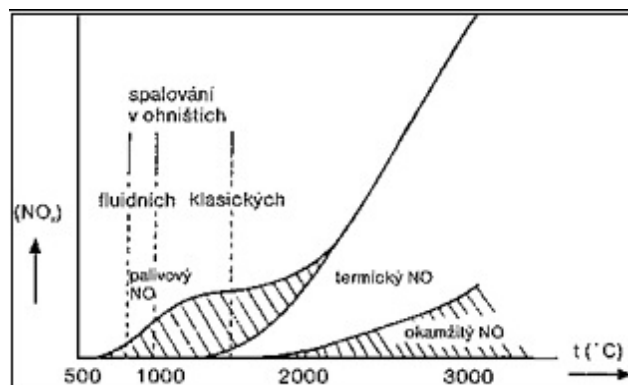
Obrázok 7 Schéma reakčnej dráhy ilustrujúca hlavné kroky rýchlej tvorby NO a konverzie palivového dusíka (FN) na NO



Pozn. Tučné čiary predstavujú najdôležitejšie reakčné cesty

Zdroj: MILLER, J.A. & BOWMAN, C.T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in energy and combustion science*. 1989. 15, 287-338. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/0360128589900178>

Obrázok 8 Vznik oxidov dusíka v závislosti na teplote



Zdroj: Kubín, M. *Elektroenergetika v Českých zemích*. [online encyklopédia]. ČEZ, 2000 [cit. 25.10.2019]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vzdelavani-a-vyzkum/energetika-zabavne/nainstalujte-si/elektroenergetika-v-ceskych-zemich-46381>.

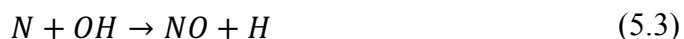
5.1. Termické NO

Termické NO_x vznikajú oxidáciou dusíka obsiahnutého v spaľovacom vzduchu pri vysokých teplotách. Rýchlosť tvorby oxidov dusíka je silne závislá na teplote spaľovania a na dobe zotrvania. NO_x sa vo významných množstvách zvyčajne tvorí pri teplotách nad 1204°C za oxidačných podmienok s exponenciálnym rastom so zvyšovaním teploty. Pri týchto vysokých teplotách sa molekulárny dusík N_2 a kyslík O_2 v spaľovacom vzduchu disociujú na svoje atómové stavy a zúčastňujú sa série reakcií. Jedným z produktov týchto reakcií je NO. (The Babcock & Wilcox, 1992; Miller & Bowman, 1989)

Termickou premenou dochádza primárne k tvorbe NO z N_2 (Glarborg, Jensen & Johnsson, 2003).

„Oxidácia atmosférického dusíka N termickým mechanizmom je jedným z hlavných zdrojov NO_x emisií.“ (Miller & Bowman, 1989)

Tvorbu termických NO_x popisuje rozšírený Zeldovičov mechanizmus (Lim a kol., 1980).



Zohľadnenie rýchlosti tvorby termických NO_x vyjadruje nasledujúca rovnica (Lim a kol., 1980):

$$[\text{NO}] = k_1 \cdot \exp(-k_2/T) \cdot [\text{N}_2] \cdot [\text{O}_2]^{1/2t} \quad (5.4)$$

Kde:

[] – molárny zlomok

k_1, k_2 – konštanty

T – teplota [K]

t – čas [s]

Tradičné faktory vedúce k úplnému spáleniu (vysoké teploty, dlhá doba zotrvania a vysoká turbulencia alebo miešanie) majú tendenciu zvyšovať rýchlosť tvorby tepelného NO_x. Preto je potrebný určitý kompromis medzi účinným spaľovaním a riadenou tvorbou NO_x.

Tvorba termických NO_x je zvyčajne regulovaná znížením maximálnej a priemernej teploty plameňa. Táto regulácia sa dá dosiahnuť zmenami spaľovacieho systému, ktoré sú priblížené v šiestej kapitole. (The Babcock & Wilcox, 1992)

5.2. Palivové NO

„Hlavným zdrojom emisií oxidov dusíka pri spaľovaní fosílnych palív je dusík chemicky viazaný v palive.“ (Miller & Bowman, 1989)

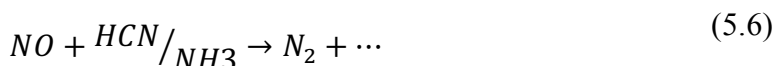
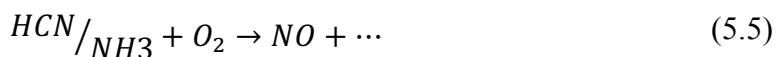
Laboratórne štúdie ukazujú, že palivové NO_x predstavujú viac než 80% u celkových nekontrolovaných emisií pri spaľovaní uhlia a približne 50% pri spaľovaní oleja. Niektorí autori uvádzajú, že tieto emisie predstavujú až 90% z podielu celkových emisií oxidov dusíka pri spaľovaní fosílnych palív. (The Babcock & Wilcox, 1992; Hill & Smoot, 2000; Li, Thompson & Peng, 2004)

Dusík je viazaný v palivách ako uhlie a olej ako súčasť organických zlúčením. Väzby v dusíku viazanom na palivo N-H a N-C sú slabšie než trojitá väzba v prípade molekulárneho dusíku, ktorá sa musí prerušiť v prípade tvorby termických NO_x. Preto sa palivové oxidy dusíka vytvárajú ľahšie než v prípade termickej premeny. (The Babcock & Wilcox, 1992; Hill & Smoot, 2000)

Predpokladá sa, že hlavné druhy plynu, ktoré obsahujú dusík, sú HCN a NH₃. Po premene palivového dusíku na HCN sa rýchlo rozpadne na NH_x, ktorý následne reaguje na NO a N₂. Táto konverzia prebieha dvoma cestami (The Babcock & Wilcox, 1992; Hill & Smoot, 2000):

• Oxidácia prchavých druhov dusíka počas počiatkovej fázy spaľovania

Dusík viazaný v palive reaguje počas uvoľňovania a pred oxidáciou prchavých látok za vzniku niekoľkých medziproduktov v závislosti od spaľovacieho prostredia. Tieto medziprodukty následne oxidujú na NO v oblastiach chudých na palivo, alebo sa redukujú na N₂ v oblastiach plameňa bohatých na palivo.



Miller a Bowman (1989) uvádzajú, že miera premeny dusíka v palive je silne závislá na spaľovacom prostredí (teplota a stechiometria) a na počiatkovom množstve zlúčeniny dusíka v zmesi paliva a vzduchu. Taktiež uvádzajú, že postupnosť reakcií palivového dusíka v plynnej fáze sa iniciuje rýchlou a početnou konverziou

východiskových zlúčenín dusíka na kyanovodík a amoniak. Toto tvrdenie je taktiež potvrdené spoločnosťou Babcock & Wilcox (1992). Následne HCN alebo NH₃ reagujú za vzniku NO alebo N₂ v závislosti od spaľovacieho prostredia. V prípade oblastí bohatých na palivo reagujú typicky viac na N₂, zatiaľ čo v oblastiach chudých na palivo zvyčajne oxidujú na NO.

„Regulácia miestneho prostredia, v ktorom sa z paliva uvoľňuje dusík, je primárnym prostriedkom na reguláciu emisií NO.“ (The Babcock & Wilcox,1992)

- **Uvoľňovanie dusíkových radikálov počas spaľovania v počiatočnej fáze spaľovania**

Tieto reakcie vznikajú omnoho pomalšie ako reakcie prchavých druhov dusíka (The Babcock & Wilcox,1992).

Konverzia dusíka viazaného v palive na NO_x je silne závislá od stechiometrie paliva a vzduchu, ale je relatívne nezávislá od kolísania teploty v spaľovacej zóne. Preto je možné túto konverziu regulovať znížením množstva kyslíku v počiatočných fázach spaľovania. (The Babcock & Wilcox,1992)

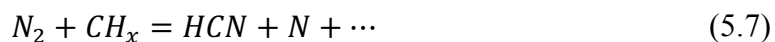
Metóda regulovaného miešania paliva a vzduchu, alebo metóda postupného spaľovania poskytujú významné zníženie emisií NO_x reguláciou stechiometrie v počiatočnej časti spaľovania. (The Babcock & Wilcox,1992)

5.3. Promptné NO

Promptné oxidy dusíka sú tvorené rýchlou reakciou atmosférického dusíka (N₂) s uhl'ovodíkovými radikálmi ako sú hlavne CH a CH₂, v blízkosti plameňa, čo vedie k tvorbe aminov a kyanozlúčením, ktoré následne reagujú za vzniku NO. (Li, Thompson & Peng, 2004; Hill & Smoot, 2000; Miller & Bowman, 1989)

Prvý štúdiu na tento typ oxidov dusíka uviedol Fenimore, ktorý pozoroval vyššiu rýchlosť tvorby NO u uhl'ovodíkových plameňov bohatých na palivo. (Hill & Smoot, 2000)

Hlavné reakcie popisujúce tento proces sú:



Hill a Smoot (2000) uvádzajú, že prvá rovnica predstavuje dominantný mechanizmus. Odhadujú, že HCN je zahrnutý v približne 90 % formovaných promptných oxidov dusíka. Avšak taktiež uvádzajú, že promptné reakcie NO sú v mnohých modeloch zanedbávané, kvôli vysokej zložitosti chémie dusíka.

Rýchla tvorba NO_x má zvyčajne slabú závislosť od teploty, táto závislosť môže byť v podmienkach bohatých na palivo veľmi silná. Moderné spaľovacie zariadenia, majú horáky navrhnuté tak, že znižujú najvyššiu teplotu plameňa regulovaním rýchlosti

miešania paliva a vzduchu. Vo väčšine spaľovacích systémov promptné NO predstavujú len malú časť celkového množstva NO_x. (The Babcock & Wilcox, 1992; Miller & Bowman, 1989)

Vo všeobecnosti sú reakcie, ktoré tvoria NO_x, komplexné a ovplyvňované niekoľkými parametrami, ako napríklad typ uhlia, horák, stavba kotla a prevádzkové podmienky. (Stanmore & Visona, 2000)

6. Technológie dostupné pre zníženie koncentrácie NO_x

Existuje viacero techník znižovania emisií NO_x vznikajúcich pri spaľovaní, ktoré sa líšia v účinnosti aj v nákladoch. Každá z týchto techník sa primárne zameriava na obmedzenie tepelných NO_x, palivových NO_x alebo ich kombinácie. (The Babcock & Wilcox, 2005)

6.1. Primárne opatrenia

Primárne opatrenia sú zamerané na úpravu parametrov spaľovania tak, aby sa znížila tvorba NO_x, a nevyžadujú väčšiu rekonštrukciu alebo zásah do spaľovacieho systému.

Primárnymi opatreniami je možné dosiahnuť za určitých podmienok zníženie emisií až o 40-50% oproti pôvodnému stavu, a to pri nízkych investičných a prevádzkových nákladoch. Ďalej nevyžadujú žiadne aditíva narozdiel od sekundárnych opatrení.

V ďalších podkapitolách budú uvedené najlepšie dostupné techniky (BAT), ktoré majú vplyv na tvorbu NO_x pri spaľovaní fosílnych palív.

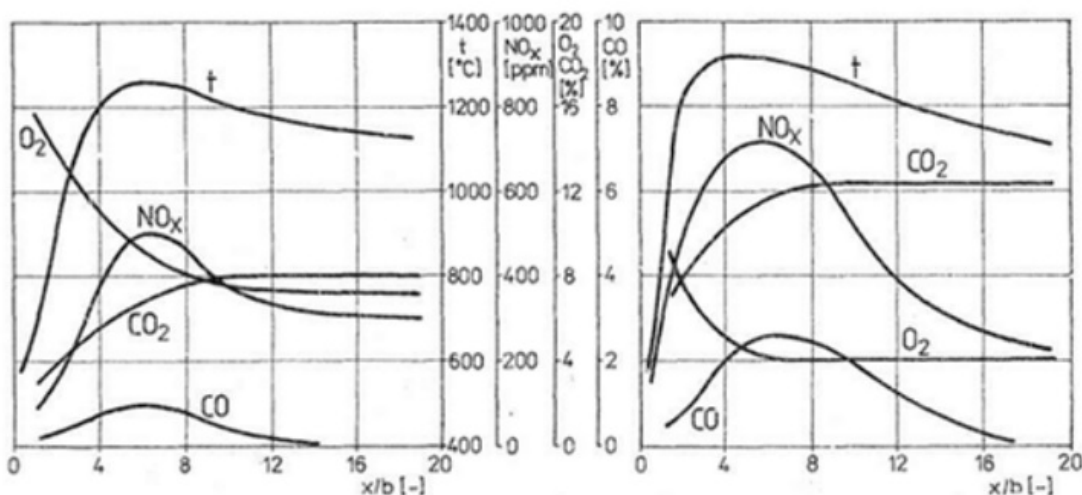
6.1.1. Nízky prebytok vzduchu

Low excess air (LEA, v preklade nízky prebytok vzduchu) je jednoduché a účinné opatrenie k zníženiu emisií oxidov dusíka pri malých prevádzkových nákladoch.

Ako napovedá názov, táto metóda spočíva v znížení prebytočného vzduchu v spaľovacej zóne na potrebné minimum pre úplne spaľovanie, to zabezpečí premenu dusíka viazaného na palivo a zníženie tvorby termických NO_x v priemere o 5 až 15% pri udržovaní stability horáku. Toto opatrenie zároveň znižuje obsah SO₃. (European Commission, 2017)

Nasledujúci obrázok zobrazuje koncentráciu NO_x a CO v závislosti na prebytku vzduchu u uhoľného 200 MW bloku. Ako vyplýva z obrázku, zníženie prebytku vzduchu má za následok zvýšenie teploty aj koncentrácie NO_x, zároveň sa zvýši koncentrácia CO a rýchlosť horenia, to zabezpečí, aby sa nezvýšilo množstvo nedopalu. Postupné znižovanie prebytku vzduchu vo výsledku zníži koncentráciu emisií NO_x.

Obrázok 9 Vplyv zníženia prebytku vzduchu na tvorbu NO_x



Zdroj: DLOUHÝ, T. *Spalování a kotle – Tvorba a emise škodlivin při spalování* [prednáška]. Praha: Strojní fakulta ČVUT, 2018 [cit. 30.10.2019]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/SK-pr4.pdf>

Ako vyplýva z predchádzajúceho obrázka, toto opatrenie môže mať za následok zvýšenie koncentrácie emisií CO, zároveň môže zníženie prebytku vzduchu spôsobiť neúplné spálenie paliva, koróziu na stenách ohniska a vo výsledku nepriaznivý vplyv na výkon spaľovacieho zariadenia. (Dlouhý, 2018; European Commission, 2017)

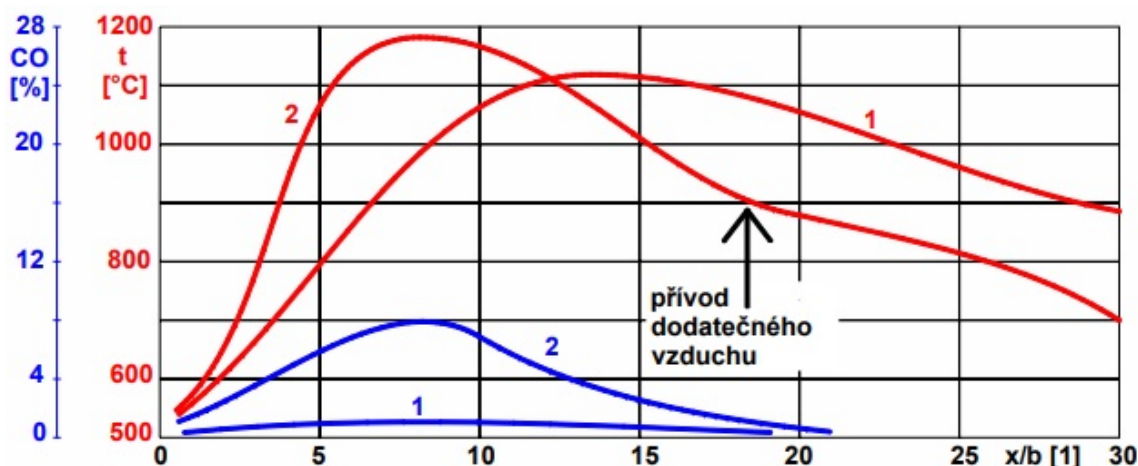
Vzhľadom k možným negatívnym účinkom je pravdepodobné, že spaľovacie zariadenie bude vyžadovať sofistikovanejšie metódy merania a regulácie prietoku paliva a vzduchu do horákov. V prípade inštalácie do existujúceho zariadenia, je potrebné experimentálne overiť stupeň vyhorenia paliva a teplotné polia v ohnisku. (Dlouhý, 2018; European Commission, 2017; The Babcock & Wilcox, 2005)

6.1.2. Postupný prívod vzduchu

Metóda postupného prívodu vzduchu (Air staging) patrí medzi najpoužívanejšie metódy znižovania tvorby NO_x. Spočíva v rozdelení spaľovacieho vzduchu do dvoch častí. V primárnej zóne prebieha podstechiometrické spaľovanie s nedostatkom kyslíka a v sekundárnej prebieha spaľovanie s prebytkom kyslíka pre zabezpečenie úplného vyhorenia paliva. (European Commission, 2017; Dlouhý, 2018)

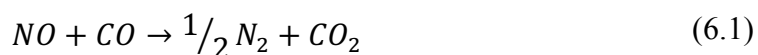
Ako vyplýva z Obrázka 10 nižšie, v počiatkovej fáze dochádza v dôsledku nedostatku kyslíka k zvýšenej tvorbe CO. Prívod sekundárneho vzduchu mierne zvýši teplotu plameňa, ktorá sa následne znižuje odvodom tepla. Tento proces zabezpečí dohorenie zvýšeného množstva CO.

Obrázok 10 Tvorba CO pri postupnom prívode vzduchu



Zdroj: Výzkumné energetické centrum. *Tvorba škodlivin při spalování*. Technická univerzita Ostrava. 2015 [cit. 1.11.2019]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/201-tvorba-1.pdf>

Redukčný účinok vzniknutého CO na produkovaný NO predstavuje nasledujúca rovnica (Dlouhý, 2018):



Na dosiahnutie postupného prívodu vzduchu existujú v kotloch rôzne aplikácie:

- Nastavenie horákov

V angličtine sa pre nastavenie horákov používa názov Biased burner firing (BBS). To znamená, že spaľovanie prebieha odklonením väčšieho množstva paliva do spodných horákov a väčšieho množstva vzduchu do vrchných horákov. Cieľom je vytvoriť dolnú zónu bohatú na palivo a vrchnú zónu bohatú na vzduch. Toto opatrenie sa využíva u existujúcich spaľovacích zariadení. Je možné ho použiť v prípade všetkých druhov palív, ale len v prípade vertikálnej spaľovacej komory. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017)

- Horáky mimo prevádzku

Horáky mimo prevádzku, alebo aj Burners out of service (BOOS). Týmto opatrením sa rozumie, že do spodných horákov sa privádza väčšie množstvo paliva v podstechiometrickom pomere so vzduchom a do horných horákov sa privádza len vzduch. V porovnaní s predchádzajúcim opatrením je tento spôsob znižovania NO_x menej účinný a taktiež môžu nastať problémy s udržiavaním prívodu paliva, pretože je nutné priviesť rovnaké množstvo tepelnej energie aj napriek menšiemu počtu horákov v prevádzke. Vzhľadom k tomu sa toto opatrenie aplikuje len v prípade kvapalných a plyných palív. Toto opatrenie je opäť možné využiť u existujúcich zariadení. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017; The Babcock & Wilcox, 2005)

- Zavádzanie vzduchu nad horáky

Anglický názov tohto opatrenia je Overfire air (OFA). Často sa používa v spojení s nízkoemisnými horákmi (viď. kapitola 6.1.5). V podstate sa jedná o vstrekovanie časti spaľovacieho vzduchu nad hornú radu horákov, vďaka čomu sú horáky prevádzkované s nízkym prebytkom vzduchu, čo má za následok redukciu NO_x. Alternatívnou variantou sú vysokotlakové vstrekovacie systémy, ktoré zvyšujú účinok zavádzania vzduchu nad horáky. Toto opatrenie si už vyžaduje rekonštrukciu spaľovacieho zariadenia, vzhľadom k tomu, že je nutná úprava membránových stien z dôvodu vytvorenia otvorov pre vzduchové trysky. (European Commission, 2017)

Účinnosť tohto opatrenia sa pohybuje v rozmedzí 10 až 70% a odvíja sa od rôznych faktorov špecifických pre dané spaľovacie zariadenie. Je potrebné dodržať správnu stechiometriu spaľovania, a dizajn vzduchových trysiek musí byť navrhnutý tak, aby sa zabezpečilo dôkladné premiešanie vzduchu a spalín v sekundárnej fáze. Geometria spaľovacej komory musí odpovedať správnejmu usporiadaniu horákov, vzduchových trysiek, dobe zotrvania a teplotám v primárnej a sekundárnej zóne spaľovania, aby bola umožnená prevádzka požadovaných stechiometrických úrovní. Vzhľadom k tomu, že v prípade dvojstupňového spaľovania sa stechiometria v okolí horáku zvyšuje so znižujúcim sa zaťažením, je nutné aby horáky boli schopné pracovať pri nižších rýchlostiach, bez toho aby to narušilo stabilitu spaľovania. (The Babcock & Wilcox, 2005; European Commission, 2017)

Ako už bolo spomenuté vyššie, medzi hlavnú nevýhodu tohto opatrenia patrí zvýšené množstvo emisií CO, ktoré sa môže tvoriť v prípade zle umiestnených vzduchových trysiek. Možný problém taktiež predstavuje vznik korózie v spaľovacej komore. Vysokotlakové vzduchové trysky by však mali týmto nevýhodám zabrániť, vzhľadom k tomu, že umožňujú lepšiu recirkuláciu spalín medzi zónami spaľovania. Problémom je to, že sa zvýši vlastná spotreba energie spaľovacieho zariadenia, pretože je nutná inštalácia pomocných ventilátorov. (European Commission, 2017)

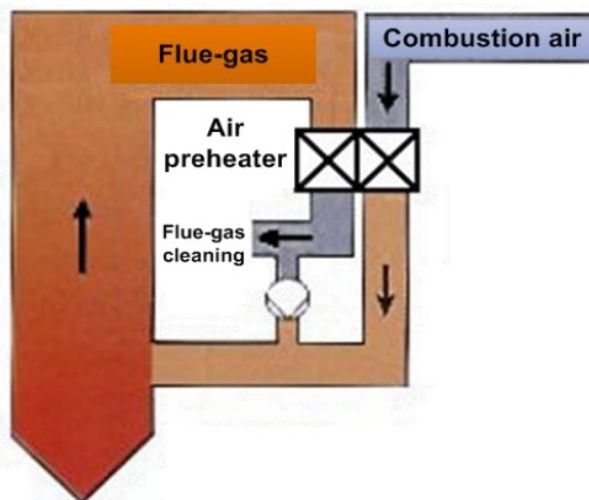
6.1.3. Recirkulácia

Metóda recirkulácie spočíva v opätovnom zavedení spalín do spaľovacieho vzduchu. Toto opatrenie má za účinok zníženie teploty plameňa a zároveň zníženie obsahu kyslíku pri spaľovaní, tým sa obmedzuje tvorba oxidov, najmä termických oxidov dusíka. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017)

Prívod recirkulovaných spalín môže byť realizovaný buď zavedením spalín do chladného vzduchu, ktorý je privádzaný do kotla oproti predhriatemu vzduchu, alebo v prípade kotlov na uhlie zmiešavaním spalín so spaľovacím vzduchom pred horákom. Množstvo sekundárneho vzduchu je potrebné zvýšiť, aby sa zabezpečil kyslík k úplnému spáleniu paliva. Prihliadnuc k tomu, že sa zmenia spaľovacie podmienky, je nutná úprava horáku, alebo v prípade novej inštalácie použitie špeciálnych horákov určených na prevádzku s recirkulovanými spalinami. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017)

Obrázok 11 zobrazuje možnú schému zapojenia recirkulácie spalín zmiešaných so spaľovacím vzduchom.

Obrázok 11 Schéma recirkulácie spalín

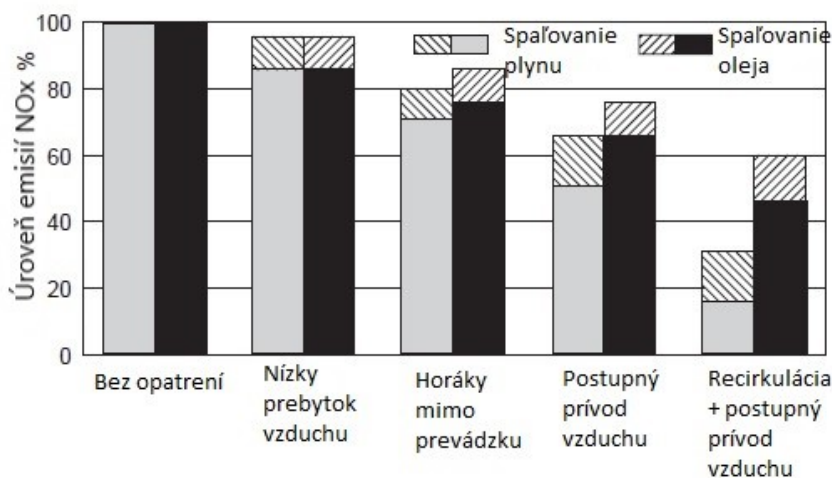


Zdroj: European Commission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. doi:10.2760/949. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>

Toto opatrenie je účinné len v prípade určitých typov kotlov a palív. Metóda zavedenia spalín do chladného vzduchu je vhodná u kotlov, kde je ako palivo použitý ľahký vykurovací olej. U kotlov na uhlie sa recirkulácia osvedčila najmä pri spaľovaní kvalitných palív, kde vzniká vysoká teplota, a to u čierneho uhlia, kvapalných palív a zemného plynu. (Vejvoda a kol., 2002)

Obrázok 12 zobrazuje typické úrovne emisií u vyššie spomenutých primárnych opatrení znižovania NO_x.

Obrázok 12 Závislosť úrovni emisií na vybraných technikách znižovania NO_x



Zdroj: The Babcock & Wilcox Company. *Steam its generation and use*. 41 vydanie. Miesto: Ohio, U.S.A., The Babcock & Wilcox Company, 2005. ISBN: 0-9634570-1-2.

6.1.4. Zníženie teploty spaľovacieho vzduchu

Toto opatrenie má vplyv najmä na tvorbu termických oxidov dusíka, vzhľadom k tomu, že znížením teploty spaľovacieho vzduchu sa zníži teplota plameňa. V prípade niektorých palív ako napríklad uhlie alebo mokrá biomasa môže byť problém toto opatrenie použiť, pretože je potrebná vysoká teplota spaľovania pre dostatočné prehorenie paliva. Navyše sa vďaka nižšej teplote vzduchu sa musí priviesť väčšie množstvo paliva pre zachovanie tepelného príkonu a väčšina tepla odchádza nevyužitá komínom. Tieto nevýhody je možné čiastočne eliminovať určitými metódami šetrenia energie, napríklad zväčšením ekonomizéru. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017)

Účinnosť tohto opatrenia dosahuje 20 až 30%, prihladnuc k náročnosti konštrukčných úprav a zníženiu účinnosti kotla sa inštalácia neodporúča na existujúce zariadenia. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017)

6.1.5. Nízkoemisné horáky

Technika s použitím tzv. nízkoemisných horákov je založená na použití jednotlivých vyššie uvedených metód aplikovaných priamo do horákov.

Nízkoemisné horáky s postupným prívodom vzduchu využívajú techniku, pri ktorej sa oddelene privádza palivo s primárnym vzduchom a sekundárny vzduch. Týmto spôsobom sa vytvorí primárny plameň, ktorý má nedostatok kyslíka v porovnaní so stechiometrickým spaľovaním. Vďaka prívodu sekundárneho plameňa prebieha vírenie, ktoré je nevyhnutné pre stabilitu plameňa. V primárnom plameni sa uvoľňujú prchavé zlúčeniny spolu s dusíkom obsiahnutým v palive. Dôsledkom zmiešavania zmesi bohatej na palivo s primárnym a sekundárnym vzduchom sa vytvorí redukčná atmosféra, bohatá na koncentráciu CO, vďaka čomu sa zamedzí oxidácia dusíka na palivové NO. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017)

Použitím horákov so zavedením recirkulovaných spalín sa eliminujú palivové oxidy dusíka. Princíp spočíva v použití vstrekovania časti spalín do zóny spaľovania alebo do prívodu spaľovacieho vzduchu, čím sa zníži teplota plameňa aj koncentrácia kyslíka, čo vedie k zníženej tvorbe oxidov dusíka. Nízkoemisné horáky s recirkuláciou spalín sa využívajú väčšinou pri spaľovaní kvapalných palív. (European Commission, 2017)

Ďalším typom sú nízkoemisné horáky s postupným prívodom paliva. Tento typ sa väčšinou používa v kotloch na spaľovanie plynu. Princíp spočíva v spaľovaní s vysokým prebytkom vzduchu. Primárny vzduch a palivo sa privádzajú spoločne a tvoria primárny plameň. Za primárny plameň sa vstrekuje sekundárne palivo, ktoré vytvorí sekundárny plameň, kde sa nachádza podstechiometrické prostredie. V tomto prostredí sa redukujú už vytvorené oxidy dusíka na dusík. V porovnaní so štandardným horákom je plameň týchto horákov asi o 50% dlhší. (European Commission, 2017)

Nová generácia nízkoemisných horákov využíva kombináciu vyššie uvedených typov, to znamená kombináciu postupného prívodu vzduchu, postupného prívodu paliva

a recirkulácie spalín. Hlavnou výhodou týchto horákov oproti predošlým nízkoemisným horákom je, že umožňujú dosiahnuť podobnú účinnosť redukcie oxidov dusíka za pomoci menšieho priemeru plameňa. Rozdiel je v tom, že palivo sa vstrekuje pod vysokým tlakom a zmiešava sa ešte pred vstupom do primárneho plameňa. (European Commission, 2017)

Tabuľka 12 obsahuje porovnanie účinností a nevýhod jednotlivých nízkoemisných horákov.

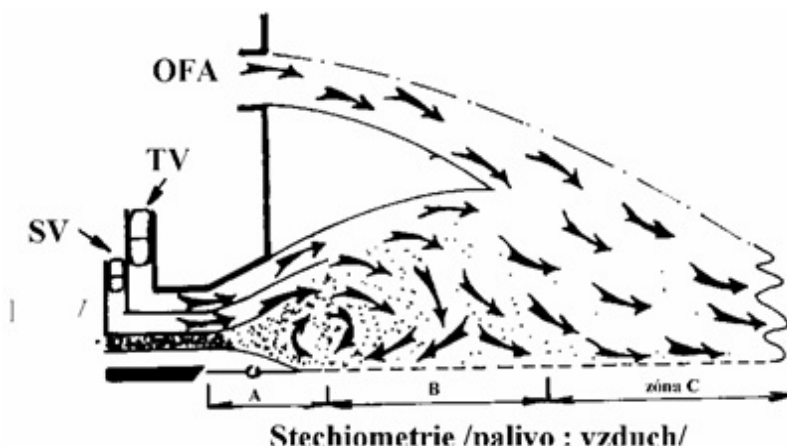
Tabuľka 12 Porovnanie jednotlivých typov nízkoemisných horákov

Typ horákov	Účinnosť redukcie Nox	Nevýhody
S postupným prívodom vzduchu	25 - 35 %	Nestabilita plameňa Neuplné spálenie paliva
S recirkuláciou spalín	do 20 %	Nestabilita plameňa
S postupným prívodom paliva	50 - 60 %	Nestabilita plameňa Neuplné spálenie paliva
Nová generácia	50 - 70 %	-

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe European Commission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. doi:10.2760/949. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>

Obrázok 13 znázorňuje typický príklad nízkoemisného horáku, kde v zóne A prebehne splyňovanie paliva, následne v zóne B dosahuje stochiometria 70% a s pridaním sekundárneho (SV), terciálneho (TV) vzduchu a vzduchu nad horákom (OFA) nastane úplne vyhorenie paliva so stochiometriou okolo 120%.

Obrázok 13 Typické riešenie nízkoemisného horáku



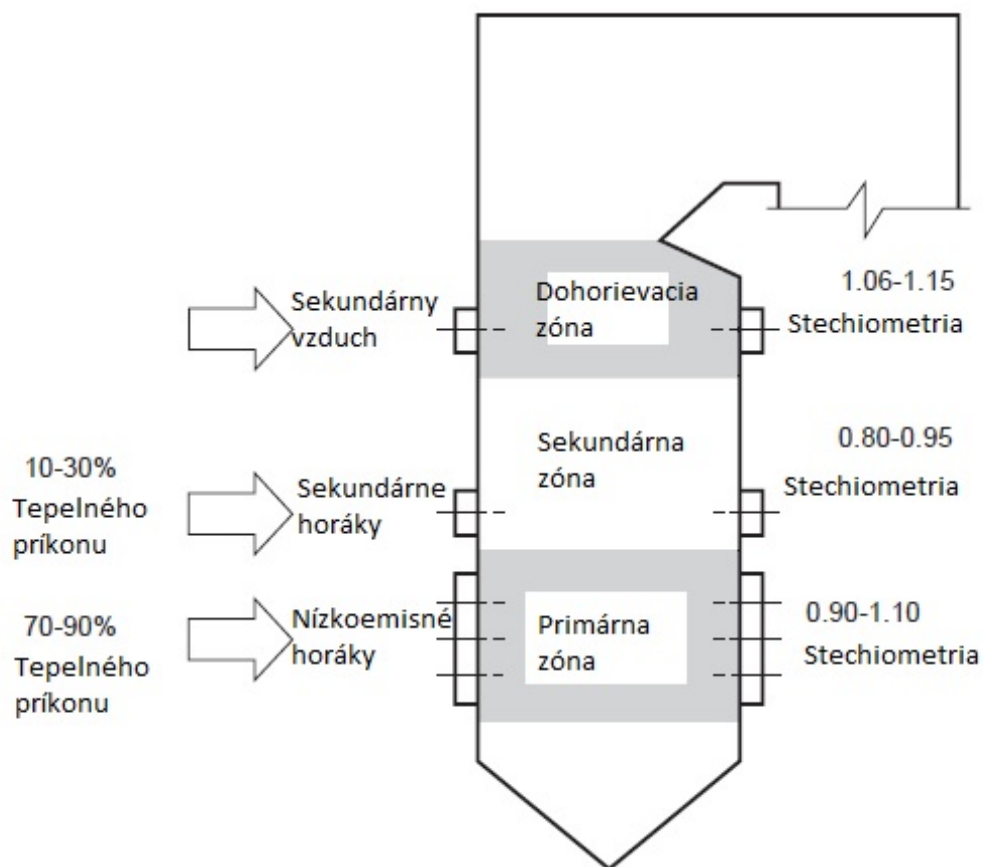
Zdroj: VEJVODA, J. A kol. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2002. ISBN 978-80-70-80517-6

6.1.6. Postupný prívod paliva

Metóda postupného prívodu paliva, tiež nazývaná Reburning je technika, ktorá je založená na rozdelení spaľovania do troch rôznych zón – primárnej, redukčnej a dohorievacej.

V primárnej zóne prebieha spaľovanie pomocou nízkoemisného horáku. Spáli sa tu približne 80 – 85% paliva, pričom spaľovanie v tejto zóne zabezpečí, aby prebytočný kyslík nepokračoval do ďalšej redukčnej zóny. V redukčnej zóne sa vstrekuje sekundárne palivo, ktoré zabezpečí redukčnú atmosféru. Vzhľadom k vysokej teplote tu vznikajú uhlíkové radikály, ktoré reagujú s oxidmi dusíka vytvorenými v primárnej zóne. Nevýhodou je vznik nežiadúcich dusíkatých zlúčenín, napríklad amoniaku. V poslednej dohorievacej zóne sa pridáva sekundárny vzduch na úplne prehorenie paliva. Obrázok 14 zobrazuje metódu postupného prívodu paliva vysvetlenú v tomto odseku. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017; The Babcock & Wilcox, 2005)

Obrázok 14 Metóda postupného prívodu paliva v bočnom pohľade na kotol



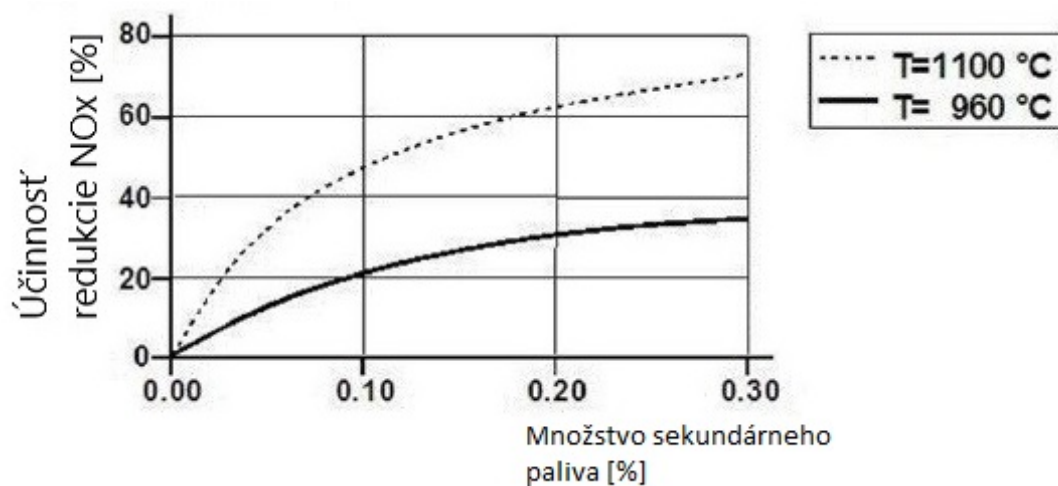
Zdroj: The Babcock & Wilcox Company. *Steam its generation and use*. 41 vydanie. Miesto: Ohio, U.S.A., The Babcock & Wilcox Company, 2005. ISBN: 0-9634570-1-2.

Ako sekundárne palivo je možné v redukčnej zóne využiť viacero typov palív, napríklad práškové uhlie, zemný plyn alebo vykurovací olej. Najbežnejšie sa používa zemný plyn kvôli jeho dobrým vlastnostiam spaľovania, avšak jeho použitie môže podstatne zvýšiť náklady na prevádzku v porovnaní s uhlím. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017)

Účinnosť tohto opatrenia sa pohybuje v rozmedzí 50 až 60% (niektorí autori uvádzajú až 75%). Výhodou je, že je možné ho kombinovať s ďalšími primárnymi opatreniami, avšak na získanie požadovanej účinnosti je potrebné dosiahnuť určité parametre systému (European Commission, 2017; The Babcock & Wilcox, 2005):

- Správne rozdelenie paliva do primárnej a sekundárnej spaľovacej zóny (spaľovanie zemného plynu umožňuje len veľmi krátku dobu zdržania)
- Doba zdržania v jednotlivých zónach
- Správna teplota; v sekundárnej zóne je potrebná teplota 1 200°C na dosiahnutie čo najväčšej redukcie NO_x (závislosť miery odstránenia NO_x na množstve sekundárneho paliva pri rôznych teplotách zobrazuje Obrázok 15)
- Dodržanie vhodnej stechiometrie
- Nastavenie vhodných podmienok pre daný typ paliva (napríklad v prípade palív s vysokým obsahom síry je nutné spaľovať v primárnej zóne s vyššou stechiometriou aby sa zamedzilo korózii)

Obrázok 15 Miera denitrifikácie v závislosti na množstve sekundárneho paliva pri rôznych teplotách



Zdroj: European Commission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. doi:10.2760/949. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>

Hlavné problémy pri metóde postupného prívodu paliva sú spôsobené neúplným spálením paliva, preto sa táto metóda hodí ku kotlom, ktoré majú dostatočnú dobu zdržania, a ktoré majú dostatočne veľké spaľovacie komory. Vzhľadom k priestorovej náročnosti a veľkým finančným nákladom na prestavbu spaľovacieho zariadenia sa táto technológia veľmi nehodí na existujúce zariadenia, a pred prípadnou inštaláciou je potrebné zhodnotiť technické prínosy na základe dlhodobých cieľov znižovania emisií oxidov dusíka. (Vejvoda a kol., 2002; European Commission, 2017; The Babcock & Wilcox, 2005)

6.1.7. Pridanie vody alebo pary

Pridanie vody alebo pary do spaľovacieho procesu má za účinok zníženie teploty spaľovania, a v konečnom dôsledku zníženie tvorby NO_x (najmä termických). Jednou z možností je vodu alebo paru zmiešať s palivom ešte pred spaľovaním a túto zmes vstrekať do spaľovacej komory. Druhá možnosť je paru alebo vodu vstrekať do

spaľovacej komory samostatne. Tento typ znižovania oxidov dusíka sa využíva v kotloch spaľujúcich kvapalnú palivú, plynových turbínach ale aj v spaľovacích motoroch. (European Commission, 2017)

Toto opatrenie však prináša hlavnú nevýhodu v podobe zvýšených emisií CO a uhlíkov, v prípade že sú emisie CO kontrolované je to nutné brať do úvahy a môže to mať vplyv na zníženie účinnosti redukcie NO_x. Medzi ďalšie nevýhody patrí zníženie tepelnej účinnosti spaľovacieho zariadenia a zvýšenie spotreby paliva. Problémom môže byť aj nestabilita plameňa pri vysokých dávkach vody a možný vznik prasklín v dôsledku teplotných šokov. V prípade priaznivých podmienok je možné dosiahnuť účinnosť zníženia NO_x 60 až 85%. Vzhľadom k vyššie spomínanej súvislosti so zvýšením emisií CO, sa v takomto prípade pohybuje účinnosť v rozmedzí 40 až 60%. (European Commission, 2017)

6.2. Sekundárne opatrenia

Predchádzajúca podkapitola popisovala primárne opatrenia, ktoré ako už bolo spomenuté zamedzujú alebo redukujú vznik oxidov dusíka. Nové, prísnejšie európske emisné limity začnú platiť od roku 2021 pre existujúce zdroje, tie budú musieť vynaložiť ďalšie finančné prostriedky na splnenie týchto emisných limitov, pretože primárne metódy budú pravdepodobne nedostačujúce.

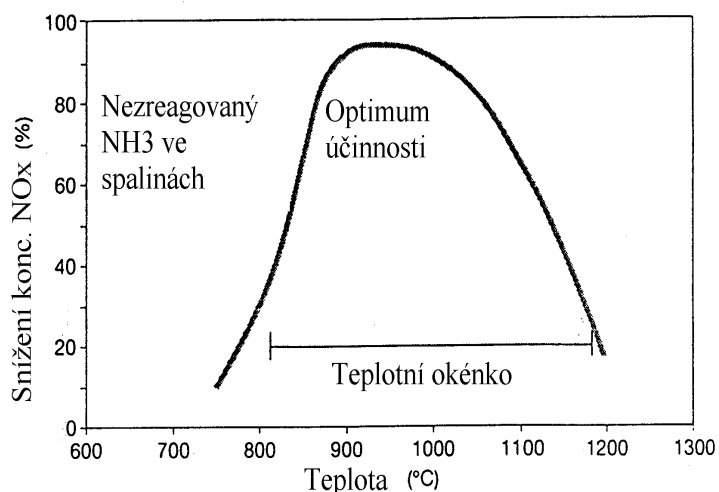
V tejto podkapitole budú popísané sekundárne opatrenia znižovania emisií oxidov dusíka, účelom ktorých je odstrániť vzniknuté oxidy dusíka zo spalín. Tieto opatrenia sú označované ako SCR (Selective catalytic reduction) a SNCR (Selective noncatalytic reduction). Obe opatrenia majú za účel redukovať oxidy dusíka na dusík (N₂) a vodu (H₂O). Znižovanie oxidov prebieha za pomoci chemických, alebo fyzikálne chemických procesov.

6.2.1. Selektívna nekatalytická redukcia

Selektívna nekatalytická redukcia používa ako činidlo amoniak alebo močovinu, pričom reakcia prebieha bez katalyzátoru. Redukcia prebieha v tzv. teplotnom okne pri teplotách udržiavaných medzi 800 až 1 100 °C. Na základe použitého činidla sa teplotné okno upravuje, pre močovinu je vyhovujúca teplota 950 – 1 100 °C a pre amoniak 850 – 1 100°C. Pri použití rôznych chemikálií, napríklad metanolu alebo vodíku, je možné teplotné okno rozšíriť. (European Commission, 2017; Vejvoda a kol., 2002; The Babcock & Wilcox, 2005)

Dodržanie teplotného okna je dôležité, pretože ak by bola teplota nízka, reakcia bude prebiehať veľmi pomaly. Nedodržaním teplotného okna sa znižuje účinnosť procesu, amoniak nezreaguje a uniká so spalínami do ovzdušia, vzniká tzv. amoniakový sklz. Pri opačnom stave, tzn. príliš vysokej teplote prebieha nežiadúca reakcia (NH₃ oxiduje na NO) so zvýšenou tvorbou emisií oxidov dusíka. Závislosť účinnosti na teplote procesu je znázornená na Obrázku 16. Naľavo od krivky vzniká amoniakový sklz, napravo od krivky prebieha už spomínaná oxidácia. (European Commission, 2017; Vejvoda a kol., 2002)

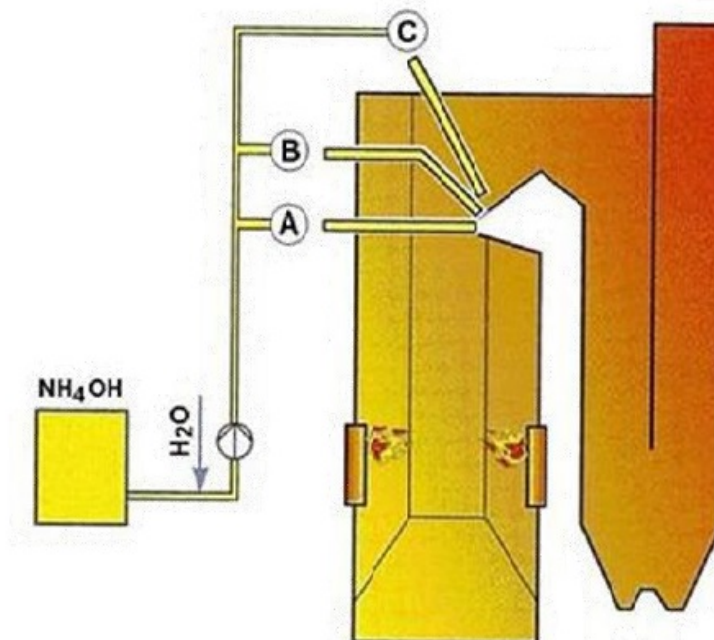
Obrázok 16 Závislosť účinnosti SNCR na teplote spalín



Zdroj: VEJVODA, J. a kol. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2002. ISBN 978-80-70-80517-6

V prípade kotlov s nízkym výkonom sa teplotné okno nachádza v blízkosti horákov, zatiaľ čo u kotlov s veľkým výkonom je teplotné okno ďalej od horákov. To znamená, že v kotli je potrebné nainštalovať viac úrovní na nástrek činidla, aby sa dodržalo teplotné okno a činidlo sa dostatočne premiešalo so spalínami (v praxi 2 až 4). Rôzne miesta nástreku amoniaku do kotla zobrazuje nasledujúci obrázok. (Vejvoda a kol, 2002; The Babcock & Wilcox, 2005; European Commission, 2017)

Obrázok 17 Rôzne úrovne vstrekovania amoniaku do kotla



Zdroj: European Commission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. doi:10.2760/949. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>

V prípade, že sa nastrekuje čínidlo vo forme kvapaliny, je okrem rôznych miest nástreku čínidla ďalším dôležitým parametrom aj veľkosť kvapiek čínidla. Malé kvapky by sa odparovali príliš rýchlo a reagovali by pri vysokých teplotách (nad teplotným oknom), a ako už bolo spomenuté znižovalo by to účinnosť procesu. Veľké kvapky by sa odparovali príliš pomaly a reagovali by pri príliš nízkych teplotách (pod úroveň teplotného okna), čo by viedlo k čpavkovému sklzu. (Vejvoda a kol, 2002; European Commission, 2017)

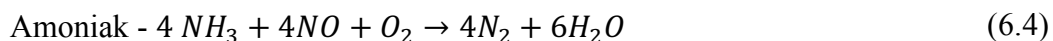
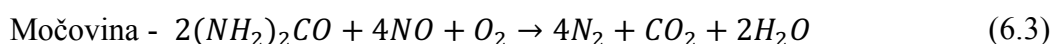
Viacere zdroje (Vejvoda a kol, 2002; European Commission, 2017) uvádzajú, že čínidlo je možné dávkovať do kotla vo forme:

- Stlačeného vzduchu
- Pary
- Vody
- Recirkulovaných spalín, pri aplikácii primárnych opatrení

Dominantná chemická reakcia je definovaná nasledujúcim chemickým vzorcom (Blejchař a kol., 2018):



Samotný proces SNCR je možné opísať pomocou nasledujúcich reakcií (Blejchař a kol., 2018):



Retenčný čas vo vyššie uvedenom teplotnom okne je v rozsahu od 0,2 do 0,5 sekundy. Tento kontaktný čas je navyše veľmi nestabilný. Je preto nutné, aby pomer amoniaku k oxidom dusíka bol skôr bohatý na amoniak než stechiometrický. Rýchlosť odstraňovania oxidov dusíka je vďaka zvýšenému pomeru vyššia, ale súčasne sa zvyšuje amoniakový sklz. Podľa uvedenej literatúry je optimálny pomer NH₃ k NO_x medzi 1 až 2,5. (European Commission, 2017)

Technológia selektívnej nekatalytickej redukcie má svoje výhody aj nevýhody. Výhodou tejto technológie je možnosť ju inštalovať priamo do kotla, čo znamená minimálne dispozičné nároky a relatívne nízke náklady na údržbu. Nevýhodou je, že vďaka úzkemu teplotnému oknu a krátkemu retenčnému času, je nutné pri návrhu poznať daný teplotný profil spaľovacej komory pri rôznych výkonových hladinách. Účinnosť SNCR sa pohybuje v rozmedzí 50 – 65% a investičné náklady predstavujú asi 20% nákladov na SCR. (Vejvoda a kol, 2002)

Ako už bolo spomenuté, pri tejto technológii sa ako čínidlá využívajú amoniak a močovina. Výhodou použitia močoviny je jej relatívne jednoduché skladovanie, a to z dôvodu, že nezapácha a je možné ju skladovať v beztlakových nádobách. Nevýhodou použitia amoniaku je bezpečnosť pri skladovaní a zvýšenie spotreby energie. (Vejvoda a kol, 2002)

6.2.2. Selektívna katalytická redukcia

Použitie SCR (selektívnej katalytickej redukcie) si našlo široké uplatnenie, a to najmä v prípade konvenčných kotlov, pecí a procesných ohrievačov. Technológia bola taktiež nainštalovaná do systému s plynovou turbínou. Je možné ju použiť na rôzne typy palív, napríklad zemný plyn, uhlie, vykurovacie oleje, koks atď. (The Babcock & Wilcox, 2005)

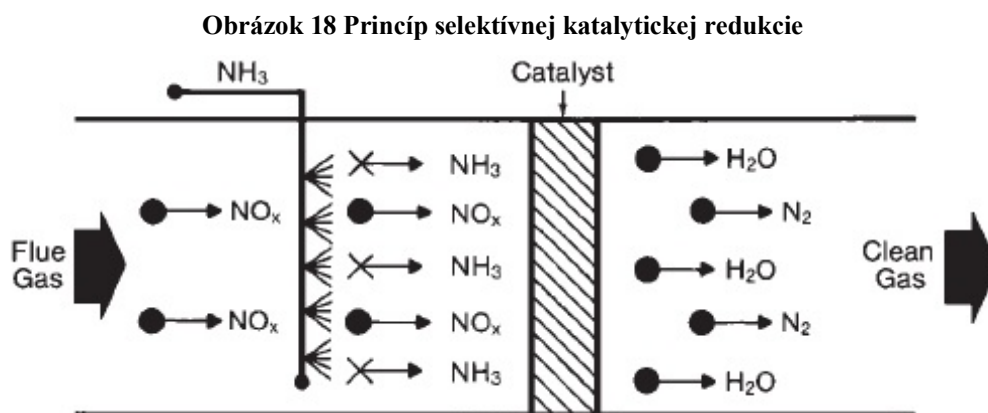
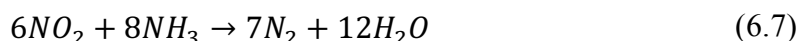
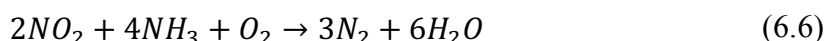
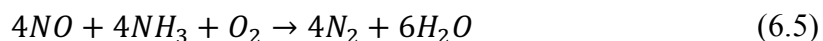
„Selektívna katalytická redukcia je v súčasnosti najúčinnnejšou metódou redukcia NO_x po spaľovaní“ (The Babcock & Wilcox, 2005)

Selektívna katalytická redukcia používa ako činidlo amoniak alebo močovinu. Rozdielom oproti selektívnej nekatalytickej redukcii je, že pri tejto metóde sa používa katalyzátor, kde sa reakciou s použitým činidlom v katalytickom lôžku redukuje NO_x na dusík. Optimálna prevádzková teplota pre túto technológiu je 300 až 450°C, avšak niektorí autori uvádzajú rozmedzie teplôt dokonca 80 až 450°C. (The Babcock & Wilcox, 2005; European Commission, 2017; Vejvoda a kol, 2002)

Voľba optimálnej teploty spalín závisí od voľby typu katalyzátora. Navyše podľa typu umiestnenia katalyzátora môže byť potrebný dohrev spalín na pracovnú teplotu katalyzátora, čo je riešené inštaláciou výmenníku a ohrievača.

Chemizmus

Katalyzátor uľahčuje chemickú reakciu medzi NO_x a redukčným činidlom za vzniku dusíka a vodnej pary. Najčastejšie reakcie prebiehajúce pri SCR za použitia redukčného činidla amoniaku (European Commission, 2017; Vejvoda a kol, 2002):



Zdroj: The Babcock & Wilcox Company. *Steam its generation and use*. 41 vydanie. Miesto: Ohio, U.S.A., The Babcock & Wilcox Company, 2005. ISBN: 0-9634570-1-2.

Princíp selektívnej katalytickej redukcie znázorňuje Obrázok 18. Amoniak sa vstrekuje do prúdu spalín, táto zmes plynu s amoniakom ďalej prechádza katalyzátorom, pričom samotná reakcia prebieha v mriežke katalyzátoru. Z katalyzátoru vystupuje vodná para a dusík.

Ako uvádza United States Environmental Protection Agency (2019) samotná redukcia oxidov dusíka je exotermická reakcia, tzn. že pri reakcii sa uvoľňuje teplo. Objemová koncentrácia NO_x je však nízka, čo znamená, že množstvo uvoľneného tepla je malé. Vzhľadom k tejto súvislosti sa teda teplota pred a za reaktorom takmer nemení.

Mechanizmus procesu

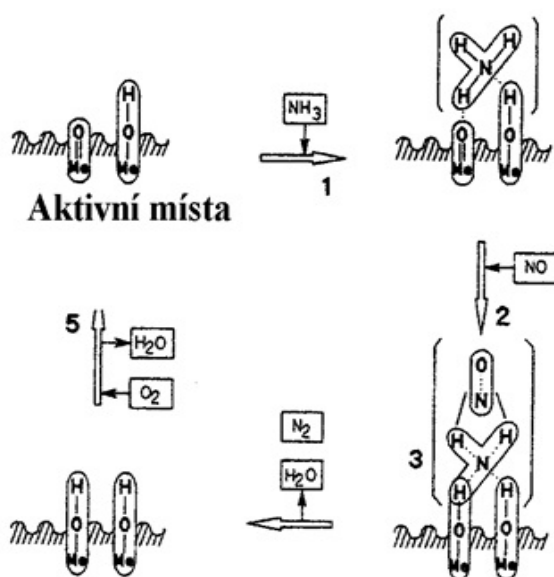
Ako už bolo spomenuté vyššie, SCR môže prebiehať v pomerne širokom teplotnom rozmedzí. Podľa typu materiálu sa katalyzátory rozlišujú na kovové, zeolitové a katalyzátory vyrobené z aktívnych uhlíkových materiálov. (Vejvoda a kol, 2002)

V prípade kovových a zeolitových katalyzátorov prebieha reakcia Eley-Ridealovým mechanizmom. Mechanizmus spočíva v difúzii NO k adsorbovanému NH_3 . U reaktorov na báze aktívnych uhlíkových materiálov sa využíva Langmuir-Hiselwoodov mechanismus, teda súčasná adsorbcia NO_x a NH_3 . (Vejvoda a kol, 2002)

Podľa Vejvodu a kol. (2002) je možné reakciu u kovových katalyzátorov a zeolitov rozčleniť nasledovne:

1. Adsorbcia NH_3 na povrchu katalyzátoru
2. Difúzia NO k adsorbovanému NH_3
3. Reakcia NH_3 s NO na povrchu katalyzátoru
4. Oxidácia hydroxidov
5. Regenerácia aktívnych miest na katalyzátore

Obrázok 19 Eley-Ridealov mechanizmus v SCR technológii



Zdroj: VEJVODA, J. a kol. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2002. ISBN 978-80-70-80517-6

Vejvoda a kol. (2002) uvádzajú že účinnosť v SCR technológii závisí od:

- Vlastností katalyzátora, jeho aktívnej plochy
- Objemovej rýchlosti spalín
- Teploty spalín
- Stechiometrie $Sr = NH_3 : NO_x$;
- Koncentrácie O_2
- Rozdielov koncentrácie NO_x pred a za katalyzátorom

Amoniak sa dávkuje vo forme vodného roztoku, prípadne ako kvapalina. Aby prebehol proces redukcie, amoniak sa musí odpariť do plynného stavu pomocou výparníku a následne sa zmiešať so vzduchom. Po prebehnutí tohto procesu sa amoniak zmiešaný so vzduchom vstrekuje do spalín. Aby sa minimalizoval čpavkový sklz a dosiahla sa vysoká účinnosť procesu, je dôležité dosiahnuť homogénny pomer NH_3 k NO_x . Emisné limity pre amoniak v súčasnej dobe neexistujú, no v prípade že jeho koncentrácia v popole prekročí 2 ppm, nie je možné ho využiť v stavebnom priemysle. (European Commission, 2017; Forzatti, 2001)

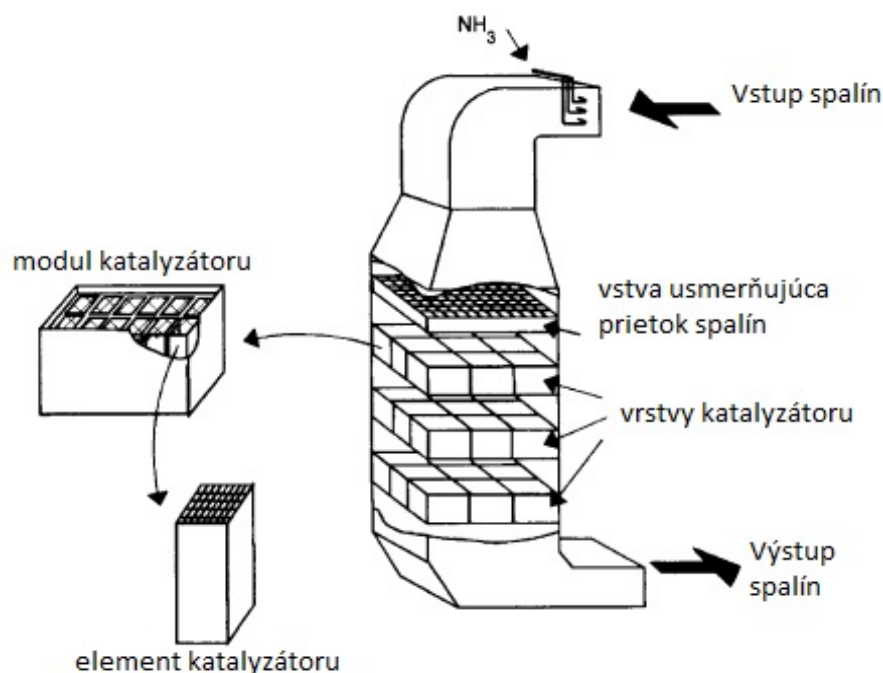
Požiadavky na katalyzátor

Samotný katalyzátor je uložený v tele reaktora, cez ktorý prechádzajú spaliny, ako je zobrazené na obrázku nižšie. Telo reaktora je konštruované tak, aby bola možná výmena jednotlivých častí katalyzátora a aby boli spaliny smerované priamo na katalyzátor. Katalyzátor je tvorený tzv. nosičom a aktívnou látkou. (The Babcock & Wilcox, 2005; Vejvoda a kol, 2002)

„Najdôležitejšou a kritickou požiadavkou komerčných katalyzátorov je kombinovanie vysokej aktivity pri de- NO_x reakci a veľmi nízkej (takmer zanedbateľnej) aktivity pri oxidácii SO_2 na SO_3 .“ (Forzatti, 2001)

Okrem vyššie uvedených požiadavkou musí byť katalyzátor taktiež chemicky odolný voči niektorým chemickým zlúčeninám (oxid siričitý, halogenvodíky, alkalické kovy, ťažké kovy), odolný voči náhlym zmenám teplôt a taktiež mechanicky odolný, napríklad voči erózii. (Vejvoda a kol, 2002)

Obrázok 20 Znáozornenie SCR reaktoru a jeho vrstiev pre SCR technológiu



Zdroj: FORZATTI, P. Present status and perspectives in de-NO_x SCR catalysis. *Applied Catalysis A*, 2001, 222, 221-236. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0926860X01008328#bBIB4>

Jednotlivé elementy katalyzátoru sú zostavené do modulu. Následne sa tento modul umiestni do samotného SCR reaktoru, pričom jednotlivé moduly potom tvoria vrstvy katalyzátoru, tak ako je znázornené na Obrázku 20 vyššie. Typicky sú používané tri vrstvy.

Typy katalyzátorov

Katalyzátory môžu mať rôzne geometrické formy, vyrábajú sa ako:

- Blokové s vylisovanými otvormi
- Doskové
- Peletizované

„Koncepcia, výška a veľkosť katalyzátoru sú kľúčom k úspešnej aplikácii a výkonu systému SCR.“ (The Babcock & Wilcox, 2005)

Blokové katalyzátory

Blokové katalyzátory, niekedy tiež nazývané Honeycomb (konštrukciou pripomínajúce včelie plasty), obsahujú nosnú podložku. Na túto keramickú podložku sa nanáša samotný katalyzátor. Katalyzátor obsahuje nosič (TiO₂) a aktívne zložky V₂O₅/WO₃, a je tvorený extrudovacím procesom so širokou možnosťou nastavenia hustoty kanálov. Medzi jeho výhody patrí veľký špecifický povrch, vysoká aktivita, optimalizovaný pokles tlaku a variabilná výška a dĺžka. (Johnson Matthey Stationary

Emissions Control, 2017; Vejvoda a kol, 2002; The Babcock & Wilcox, 2005; European Commission, 2017)

Obrázok 21 Blokový katalyzátor v nízkej, strednej a vysokej konfigurácii hustoty kanálov

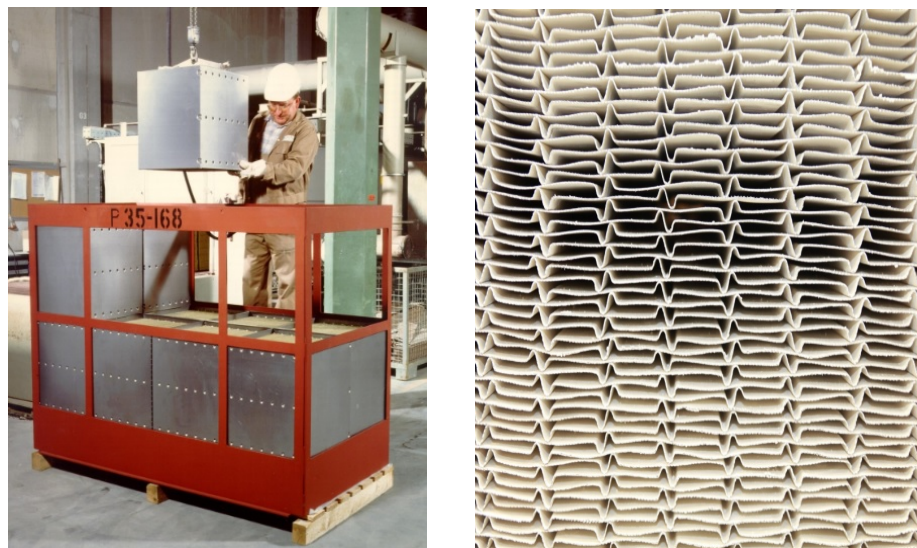


Zdroj: Johnson Matthey Stationary Emissions Control (SEC) [online]. *SCR catalyst – SINOx plate catalyst*. ©2017 [cit. 16.11.2019]. Dostupné z: <https://www.jmsec.com/air-pollution-solutions/selective-catalytic-reduction-scr/>

Honeycomb katalyzátory s nízkou hustotou kanálov sú vhodné na použitie v zdrojoch spaľujúcich uhlie a v prevádzkach s vysokým obsahom prachu, a to napríklad vo výrobe cementu, pri procesoch spaľovania odpadu a spaľovaní biomasy s vysokým obsahom prachu. Katalyzátory so strednou hustotou sú vhodné pre aplikácie s miernym až nízkym obsahom prachu, napríklad pre plynové turbíny, lodné motory atď. Pre aplikácie spaľujúce čisté palivo, ako napríklad zemný plyn, sú vhodné katalyzátory s vysokou hustotou kanálov. Tieto katalyzátory s vysokou hustotou kanálov sú teda primárne využívané v spalinách s nízkym obsahom prachových častíc. (Johnson Matthey Stationary Emissions Control, 2017)

Doskové katalyzátory

Obrázok 22 Zostavovanie doskového katalyzátora pre SCR (vľavo) a detail doskového katalyzátora pre SCR (vpravo)



Zdroj: Johnson Matthey Stationary Emissions Control (SEC) [online]. *SCR catalyst – SINOx plate catalyst*. ©2017 [cit. 16.11.2019]. Dostupné z: <https://www.jmsec.com/air-pollution-solutions/selective-catalytic-reduction-scr/>

Doskový katalyzátor je tvorený kovovým rámom, ktorý obsahuje samotný katalyzátor. Na jednotlivé časti nerezovej ocele sa nanášajú aktívne látky V_2O_5/MoO_3 , V_2O_5/WO_3 , ktoré po nanosení vytvoria platňu katalyzátora s hrúbkou 0,9 až 1 mm. Jednotlivé platne sa narežú a upravujú do požadovaného tvaru, a následne sa zostavia do uzavretých blokov. Tento typ konštrukcie umožňuje výrobu katalyzátorov s veľkým rozsahom vzdialeností medzi dvoma doskami (tzv. pitch), čo umožňuje inštaláciu týchto katalyzátorov do jednotiek s vysokým podielom prachu alebo popola v spalinách. Medzi ďalšie výhody tohto typu katalyzátora patrí vysoká odolnosť proti erózii a nízky pokles tlaku. Oproti blokovému katalyzátoru však ľahšie podlieha abrazii a taktiež je možné odpadnutie jednotlivých podložiek v dôsledku tepelného a mechanického namáhania. (Johnson Matthey Stationary Emissions Control, 2017; Vejvoda a kol, 2002; The Babcock & Wilcox, 2005; European Commission, 2017)

Peletizované katalyzátory

Peletizované typy katalyzátorov sú používané v aplikáciách s obsahom prachu v spalinách vyšším než $20\text{-}30\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ s ohniskom s pevnou vrstvou alebo fluidnou lôžou. Tieto katalyzátory sú väčšinou z aktívneho uhlia, prípadne zeolitov. Európska komisia uskutočnila výskum, kde boli pelety vyrobené na báze oxidov železa (Fe_2O_3). Tento výskum ukázal, že i tento materiál má účinok na redukovanie emisií oxidov dusíka. (European Commission, 2014; Vejvoda a kol, 2002)

Materiály katalyzátorov

Vývoj katalyzátorov prebieha už nejakú dobu. Prvý patent využívajúci katalyzátor v SCR technológii za použitia amoniaku bol podaný v Amerike už v roku 1957. Prvé katalyzátory boli vyrábané zo vzácnych kovov platiny, tieto katalyzátory však boli veľmi drahé. Výskumníci v Japonsku začali používať vanádium, titanium a wolfrán, čo malo za následok výrazné zníženie cien katalyzátorov. Neskôr v 80-tých rokoch začali využívať rôzne oxidy kovov ako napríklad oxid titaničitý, vďaka čomu sa im podarilo rozšíriť teplotné okno reakcie. Ďalší vývoj priniesol zeolity, čo opäť zväčšilo teplotné okno, no použitie týchto materiálov je stále pomerne drahé. Od roku 1980 do roku 2008 sa cena katalyzátoru znížila z $34\ 000\$/\text{m}^3$ na približne $5\ 000\$/\text{m}^3$. (Fengyu a kol., 2017; United States Environmental Protection Agency, 2019)

Oxid titaničitý

Oxid titaničitý TiO_2 sa javí ako najviac vyhovujúci nosič katalyzátoru. Má vysokú aktivitu a je odolný proti SO_2 . Ako hlavné aktívne zložky sa používajú oxid vanadičný, oxid wolframový a ďalšie zložky, ktoré majú menšie zastúpenie sú Mo, Fe, Cr, Cu, Co a Mn. Oxid vanadičný V_2O_5 je najdôležitejšou aktívnou zložkou, a to vďaka jeho schopnosti dobre redukovať oxidy dusíka. Jeho nevýhodou je však to, že podporuje oxidáciu oxidu siričitého. Z tohto dôvodu sa vo väčšine prípadov používa kombinácia oxidu vanadičného s menším množstvom oxidu wolframového WO_3 , ktorý redukuje konverziu oxidu siričitého pod 1%. Oxid kremičitý SiO_2 pomáha stabilizovať štruktúru a oxid molybdénový MoO_3 , ktorý robí katalyzátor odolnejším voči otrave zo stopových prvkov. Je však potrebné podotknúť, že obsah oxidu vanadičného je tým nižší, čím je

vyššia teplota, pretože konverzia oxidu siričitého je silne závislá na teplote. (Vejvoda a kol, 2002; European Commission, 2017)

Nosič, v tomto prípade TiO_2 , tvorí viac než 90% zloženia katalyzátora, aktívne zložky majú podiel 5 až 10%. Tento typ katalyzátora vyžaduje teplotné rozmedzie 300 – 450°C, presná teplota závisí od jednotlivých podielov použitých zložiek. S týmito zložkami sa vyrábajú katalyzátory doskového aj blokového typu. Ako už bolo spomenuté vyššie, u katalyzátorov je možné nastaviť rôzne hustoty kanálov. V prípade neodprášených spalín sa optimálne objemové rýchlosti pohybujú v rozmedzí 1 000 až 3 000 h^{-1} a pre odprášené spaliny 5 000 až 10 000 h^{-1} . (Vejvoda a kol, 2002; European Commission, 2017)

Zeolity

Zeolity sú vysokoporézne prírodné alebo syntetické hlinitokremičitany, ktoré fungujú podobne ako katalyzátory na báze kovov. Tieto typy katalyzátorov nie sú veľmi používané, avšak v istých aplikáciách je nutné ich použiť, najmä vďaka možnosti ich použitia v rozmedzí teplôt 350 až 600°C. Ďalšou výhodou zeolitov je ich veľký vnútorný povrch, dobrá pórovitosť a zachycovanie veľkého množstva amoniaku, čo zamedzí jeho úniku v prípade predávkovania. Taktiež vďaka tomu, že sú z keramického materiálu, je možné ich po vyčerpaní použiť na výrobu keramiky. Tieto katalyzátory sú však citlivé na spaliny s obsahom popola, preto je najideálnejšie ich aplikovať na zdroje s čistým palivom. (European Commission, 2017; The Babcock & Wilcox, 2005; Vejvoda a kol, 2002)

Oxid železitý

Základ u tohto typu katalyzátora tvorí oxid železitý (Fe_2O_3) s hlavným aktívnym prvkom oxidom chromitým (Cr_2O_3). Vyrábala sa vo forme peliet, prípadne ako doskový, alebo blokový katalyzátor. V dnešnej dobe sa už nevyrába vzhľadom k tomu, že jeho aktivita je až o 40% nižšia ako v prípade katalyzátora na báze oxidu titaničitého. (Vejvoda a kol, 2002)

Aktívne uhlie

Aktívne uhlie sa vyrába vo forme peliet, pričom hlavný podiel na zložení má hnedé alebo práškové uhlie, ktoré je zmiešavané s inertnými prvkami. Aktívne uhlie je pri vyšších teplotách pomerne nestabilné, preto sa používa pri teplotách spalín 100 – 220 °C. Vzhľadom k tomu sa používa len v koncovej konfigurácii (tail-end). Jeho výhodou je však to, že je relatívne lacný a po použití je možné ho spáliť. (European Commission, 2017; Vejvoda a kol, 2002)

Životnosť a deaktivácia katalyzátorov

Katalyzátor postupom času stráca svoj účinok, mieru starnutia vyjadruje tzv. katalytická aktivita. So znižovaním aktivity katalyzátora dochádza k znižovaniu reakčnej rýchlosti a k znižovaniu odstráneného množstva NO_x . Nasledujúca rovnica vyjadruje

deaktiváciu katalyzátora postupom času: (United States Environmental Protection Agency, 2019)

$$K = K_0 e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (6.8)$$

Kde:

K_0 – pôvodná aktivita katalyzátora

τ – konštantná doba životnosti katalyzátora

t – čas [s]

Doba prevádzky katalyzátora však nie je jediným parametrom, ktorý ma vplyv na jeho aktivitu. Podľa Vejvoda a kol. (2002) existujú 3 hlavné príčiny, ktoré vedú k strate aktivity katalyzátoru:

- Otrava stopovými prvkami
- Usadzovanie prachu a iných zlúčenín
- Erózia

Otrava katalyzátora je hlavnou príčinou jeho deaktivácie. Pri spaľovaní uhlia vznikajú rôzne látky a zlúčeniny, ktoré pôsobia ako katalytické jedy. Medzi tieto látky patria oxid vápenatý, oxid horečnatý, draslík, sodík, arzén a ďalšie. Pri ochladení spalín tieto látky difundujú do aktívnych miest v katalyzátore a spôsobujú ich poškodenie, alebo zablokovanie. Arzén spôsobuje deaktiváciu katalyzátora najčastejšie, pretože pri teplotách nad 1 400°C oxiduje na oxid arzeničitý, ktorý sa rozteká a pri ochladení spalín sa viaže na popol. Účinnou metódou odstránenia arzenu zo spalín je aplikovanie oxidu vápenatého, ktorý bráni jeho viazaniu na katalyzátor. Aktivitu otrávených katalyzátorov je možné obnoviť regeneráciou. (United States Environmental Protection Agency, 2019; Vejvoda a kol., 2002)

Usadzovanie prachu a ďalších zlúčenín spôsobuje blokovanie pórov katalyzátoru. Miera zanášania sa líši podľa typu použitého paliva, typu zdroja a aj použitého typu katalyzátora. Doskové katalyzátory sa v porovnaní s katalyzátormi typu honeycomb menej zanášajú, avšak pri mechanickom, alebo tepelnom namáhaní sa jeho účinná vrstva odlupuje. Vysoký obsah a zrnitosť popola v spaliniách môžu mať na katalyzátor aj pozitívny účinok a pomáhať udržiavať jeho aktivitu. (United States Environmental Protection Agency, 2019; Vejvoda a kol., 2002)

V prípade, že spaliny majú rýchlosť prúdenia vyššiu než 4 m/s môže dochádzať k erózii katalyzátora, ktorá je spôsobená nárazmi popola obsiahnutého v spaliniách do katalyzátoru. Katalyzátory, ktoré sú kalené majú lepšiu odolnosť proti erózii, toto opatrenie však znižuje počet aktívnych kanálov. (United States Environmental Protection Agency, 2019; Vejvoda a kol., 2002)

Orientačná doba životnosti katalyzátorov sa podľa rôznych zdrojov mierne líši. Pre porovnanie bola vytvorená orientačná Tabuľka 13, ktorá porovnáva doby životnosti katalyzátorov pre rôzne druhy paliva.

Tabuľka 13 Orientačná doba životnosti katalyzátorov rozdelená na základe použitého paliva

	VeJVoda a kol. (2002)	BAT (2017)
Palivo	Doba životnosti [roky]	Doba životnosti [roky]
Zemný plyn	6 až 7	8 až 12
Kvapalné paliva	5	
Uhlie	3 až 4	3 až 7

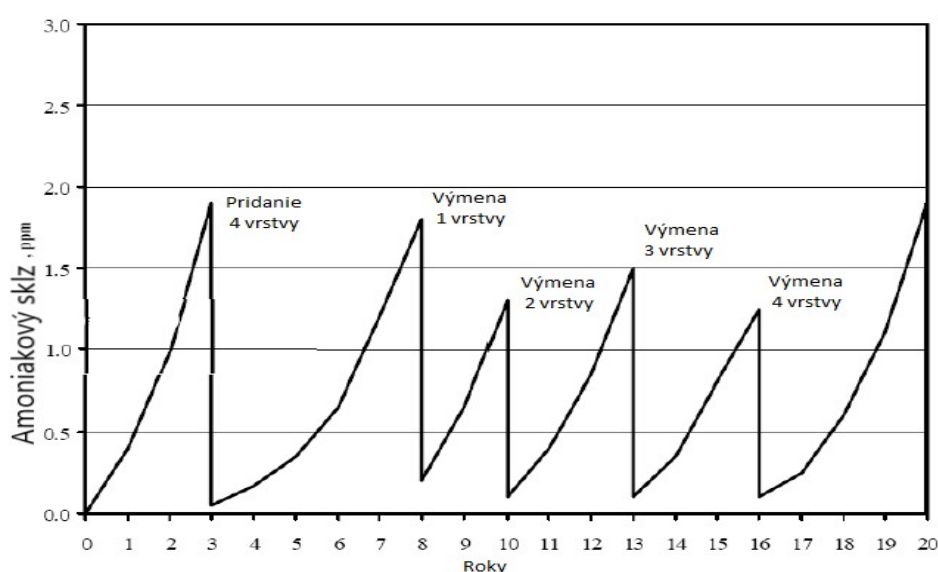
Zdroj: Vlastné spracovanie na základe VEJVODA, J. a kol. *Technologie ochrany ovzduší a čišťení odpadných plynů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2002. ISBN 978-80-70-80517-6; European Commission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. doi:10.2760/949. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eurscientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>

Vo všeobecnosti je teda možné skonštatovať, že katalyzátory, ktoré sú používané v zdrojoch využívajúcich uhlie majú najkratšiu dobu životnosti, pričom s kvalitnejším palivom sa táto doba predlžuje.

Ako bolo uvedené vyššie, životnosť katalyzátora sa odvíja od viacerých faktorov, ktoré sú špecifické pre každé zariadenie. V súčasnosti je trendom katalyzátory čo najviac regenerovať, podľa BAT používaná varianta spočíva až v štyroch regeneráciách každej vrstvy, čo znamená približne 20-ročný cyklus a značnú úsporu v prevádzkových nákladoch. Ďalším využívaným riešením podľa BAT je ponechanie voľnej vrstvy v katalyzátore, ktorá slúži ako rezervná v prípade poklesu účinnosti redukcie oxidov dusíka.

Pri katalyzátoroch, ktoré sú využívané celoročne sa vypracováva tzv. plán prevádzky katalyzátora, ktorý určuje po akej dobe sú vymenené alebo pridané jednotlivé vrstvy, aby bol čpavkový sklz udrжанý v prijateľnej miere. Príklad plánu prevádzky katalyzátora je uvedený na Obrázku 23.

Obrázok 23 Príklad plánu prevádzky katalyzátora



Zdroj: United States Environmental Protection Agency (EPA). *Cost Reports and Guidance for Air Pollution Regulations*. 2019. North Carolina: Research Triangle Park. Dostupné z: <https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/cost-reports-and-guidance-air-pollution>

Regenerácia katalyzátorov

Znižovaním aktivity katalyzátora dochádza obvykle k zvyšovaniu množstva amoniaku v spalinách. Pri dosiahnutí maximálnej možnej miery čpavkového sklzu je nutné jednotlivé vrstvy katalyzátora regenerovať, vyčistiť alebo vymeniť. (United States Environmental Protection Agency, 2019)

Čistenie katalyzátoru predstavuje odstránenie popolčeka a ďalších častíc, ktoré sa na ňom uložia v priebehu procesu. Čistenie môže prebiehať pri prevádzke, vtedy sú využívané tzv. ofukovače, ktoré tieto nánosy odstránia. Druhou možnosťou je odstavenie prevádzky, pri ktorej sa katalyzátor rozmontuje a vyčistí. (United States Environmental Protection Agency, 2019)

Proces regenerácie predstavuje odstránenie jedov a obnovu aktivity katalyzátora. Pre odstránenie jedov sa využívajú chemické činidlá, ktoré obnovia aktivitu. Prípadne sa využíva teplotná regenerácia pri vysokých teplotách, ktorá zabezpečí odparenie látok v katalyzátore. Tieto procesy môžu taktiež prebiehať počas prevádzky alebo v rozmontovanom stave, záleží to od miery upchatia katalyzátoru. V prípade, že katalyzátor nie je možné zregenerovať, je potrebné ho vymeniť. (United States Environmental Protection Agency, 2019)

Konfigurácia SCR

Jednou z najdôležitejších častí návrhu technológie selektívnej katalytickej redukcie je umiestnenie reaktoru s katalyzátorom do samotného systému kotla. Ako už bolo spomenuté vyššie, jedným z rozhodujúcich faktorov umiestnenia je reakčná teplota, zloženie spalín a priestorové obmedzenie. Na základe týchto podmienok vznikli tri základné konfigurácie.

High dust

Obrázok 24 znázorňuje konfiguráciu high dust (vysoký prach) niekedy nazývanú aj hot side. Charakteristické pre tento typ umiestnenia reaktoru je vysoký obsah prachových častíc v spalinách a vysoká teplota. Samotný reaktor je umiestnený medzi ekonomizérom a ohrievačom vzduchu.

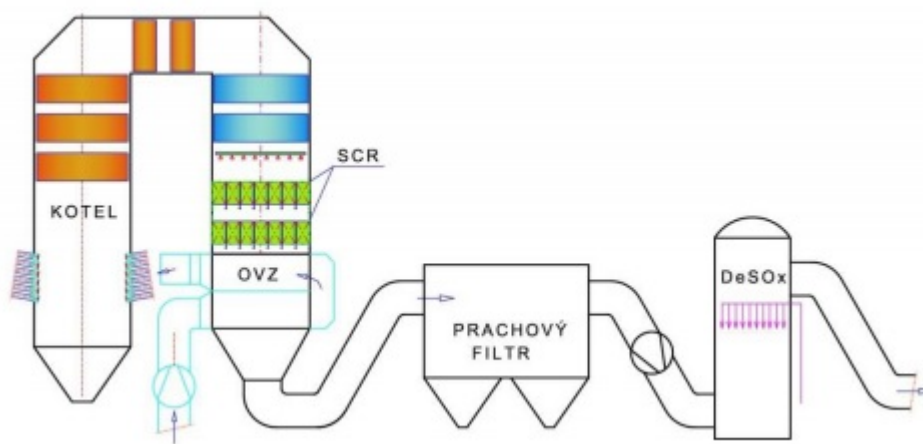
Výhodou tejto konfigurácie je práve vysoká teplota za ekonomizérom, takže nie je nutná inštalácia dohrevu spalín pred vstupom do katalyzátoru. Ideálne rozmedzie teplôt sa pohybuje medzi 370 až 400 °C (The Babcock & Wilcox, 2005). Problémom je, že v niektorých kotloch sa toto teplotné okno nenachádza na vhodnom mieste, v takom prípade sa zavádza napríklad bypass ekonomizéru. Ďalším problémom je vysoký obsah prachových častíc, čo znamená, že je potrebná inštalácia ofukovačov a katalyzátor musí mať dostatočne veľké otvory, aby nehrozilo usadzovanie a umožňovalo sa ľahšie čistenie. (The Babcock & Wilcox, 2005; United States Environmental Protection Agency, 2019; European Commission, 2017)

Na dno SCR reaktora sa umiestňuje zásobník, v ktorom sa zhromažďuje popol s časticami oddelenými od prúdu spalín. Výstup zo zásobníka je pripojený na systém

spracovania popola celého systému. Spaliny pokračujú do ohrievača vzduchu. V niektorých systémoch sa udržaním dostatočne vysokej rýchlosti spalín eliminuje potreba inštalácie zásobníku. (United States Environmental Protection Agency, 2019)

Konfigurácia high dust je aj napriek nutnému zásahu do konštrukcie kotla a vyššie uvedeným negatívam najviac využívaným typom sekundárneho opatrenia pre redukcii oxidov dusíka a považuje sa za najúspornejší spôsob redukcii. Je nutné podotknúť, že pre inštaláciu tejto technológie je potrebný dostatok priestoru medzi ekonomizérom a ohrievačom vzduchu, v opačnom prípade je možné využitie nasledujúcich konfigurácií. (United States Environmental Protection Agency, 2019)

Obrázok 24 Konfigurácia High dust – usporiadania v existujúcom 2 ťahu kotla



Zdroj: Provyko s.r.o. SCR- *Selektivní katalytická redukce*. [online]. ©2019 [cit. 19.11.2019]. Dostupné z: <https://provyko.cz/cs/scr-selektivni-katalyticka-redukce/>

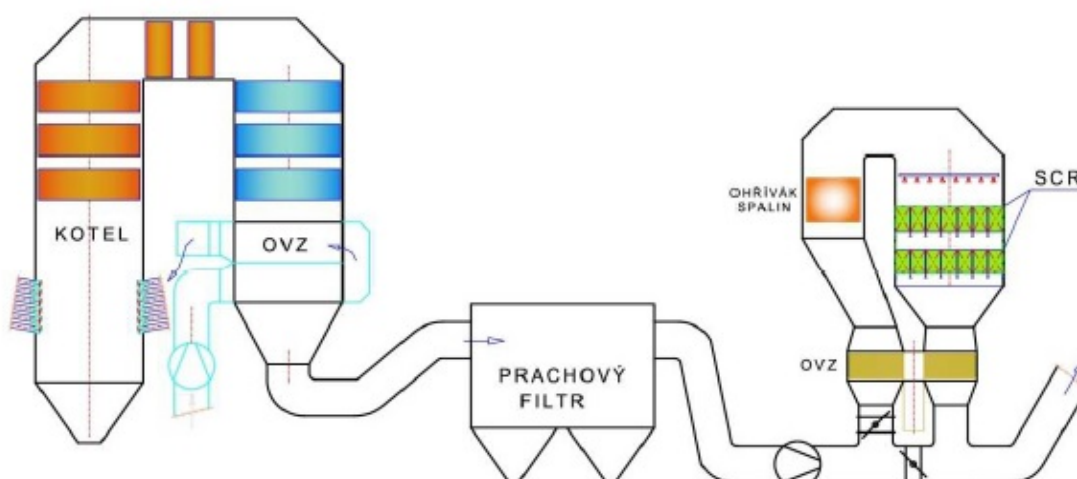
Low dust

Low dust (nízky prach) technológia sa vyznačuje umiestnením v miestach kotla, kde sú spaliny už prakticky bez prachu. Zvyčajne sa využíva umiestnenie za odlučovačom popola a pred ohrievačom vzduchu, ako je zobrazené na Obrázku 25.

Táto konfigurácia má oproti high dust konfigurácii významnú výhodu, a to nižšie mechanické namáhanie katalyzátora. Vďaka nízkemu obsahu prachu, sa dá očakávať vyššia životnosť u katalyzátorov v porovnaní s high dust konfiguráciou. Ďalšou výhodou low dust je, že nie je potrebný zásobník popola. Nízky obsah popola znamená taktiež menšie nároky na veľkosť katalyzátora, pretože spaliny neobsahujú také množstvo častíc, ktoré by sa mohli v katalyzátore usadzovať. Vymenované výhody prinášajú v porovnaní s high dust konfiguráciou nižšie náklady.

Nevýhodou low dust je potreba dohriať spaliny na pracovnú teplotu katalyzátora, ktorá býva 316 až 343°C (The Babcock & Wilcox, 2005), pretože sa spaliny pri prechode cez prachový filter ochladzujú. Na ohrev spalín sa využíva regulácia teploty pomocou ekonomizéru a v niektorých prípadoch inštalácia dohrevu spalín. Vďaka nutnosti rozsiahlych konštrukčných a priestorových úprav sa táto konfigurácia v prípade starších kotlov uvádza ako neekonomická. (European Commission, 2017)

Obrázok 25 Konfigurácia Low dust – usporiadanie za prachovým filtrom



Zdroj: Provyko s.r.o. SCR- *Selektivní katalytická redukce*. [online]. ©2019 [cit. 19.11.2019]. Dostupné z: <https://provyko.cz/cs/scr-selektivni-katalyticka-redukce/>

Tail end

Tail end konfigurácia sa umiestňuje na koniec celého systému, to znamená za všetky zariadenia na čistenie spalín. Vďaka umiestneniu za odsirením spaliny neobsahujú oxidy síry a znižuje sa riziko deaktivácie katalyzátora, čo predstavuje výhodu v porovnaní s predchádzajúcimi konfiguráciami.

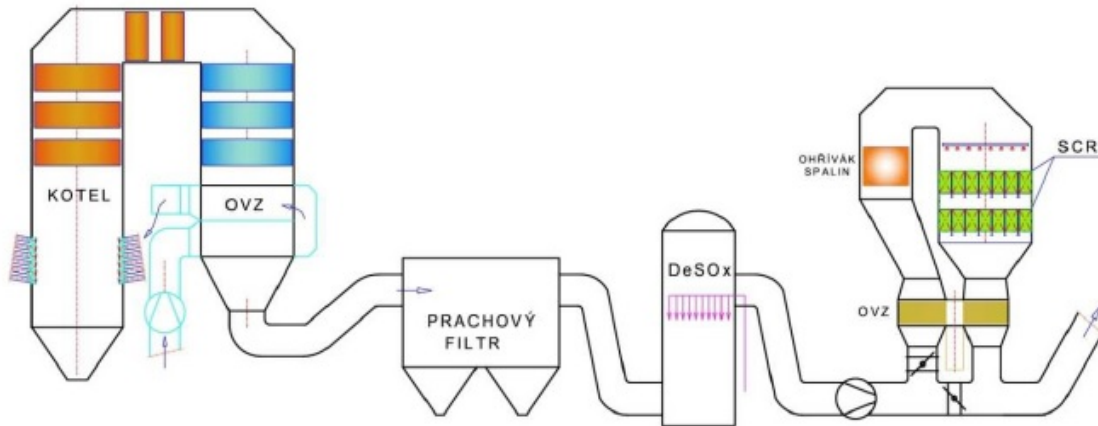
Spaliny za odsirením majú nízku teplotu, obvykle 65 – 75 °C v závislosti na type odsirenia spalín. Táto teplota je nedostatočná pre katalytickú redukciu v katalyzátore, spaliny musia byť teda znova ohriate na 300 až 350°C. Ohrev spalín na požadovanú teplotu je realizovaný regeneračným výmeníkom typu spaliny – spaliny, kde sa časť tepla spalín vystupujúcich zo SCR reaktora predá spalínám vstupujúcim do reaktora. Následne sa spaliny dohrievajú na požadovanú teplotu doplnkovým horákom na zemný plyn alebo olej, prípadne parným ohrevom. Dodatočný ohrev spalín vyžaduje v porovnaní s predchádzajúcimi konfiguráciami vyššie investičné aj prevádzkové náklady. Prevádzkové náklady na katalyzátor sú však podstatne nižšie vďaka tomu, že katalyzátor je spomedzi všetkých troch variant najmenej namáhaný.

Ďalšou z výhod tail end konfigurácie je to, že ohrev spalín pracuje nezávisle od spaľovacieho zariadenia, čo umožňuje jeho flexibilnejšiu prevádzku a spaľovacie zariadenie dokáže pracovať vo väčšom rozsahu a s viacerými druhmi paliva.

Ako už bolo spomenuté, tail end konfigurácia ma pomerne vysoké investičné náklady vzhľadom k dodatočným zariadeniam potrebným na fungovanie technológie a aj vzhľadom k využitému priestoru. Táto konfigurácia sa javí ako vhodné riešenie, v prípade že by zásah do kotla vyžadoval veľké investičné náklady, alebo v prípade dostatočného priestoru na inštaláciu tejto konfigurácie, vzhľadom k tomu že spaľovacie zariadenie môže pracovať počas celej doby výstavby.

Obrázok 26 zobrazuje tail end konfiguráciu umiestnenú za prachovým filtrom a odsirením.

Obrázok 26 Konfigurácia Tail end – usporiadanie za odsirením



Zdroj: Provyko s.r.o. SCR- *Selektivní katalytická redukce*. [online]. ©2019 [cit. 19.11.2019]. Dostupné z: <https://provyko.cz/cs/scr-selektivni-katalyticka-redukce/>

Nasledujúca tabuľka zjednodušene porovnáva jednotlivé konfigurácie selektívnej katalytickej redukcie.

Tabuľka 14 Porovnanie jednotlivých SCR technológií

	High dust	Low dust	Tail end
Prevádzková teplota	370 - 400 [°C]	280 - 400 [°C]	300 - 350 [°C]
Znečisťujúce látky v spalinách	NO _x Prachové častice Kyslé plyny	NO _x Prachové častice	NO _x
Výhody	Bez dohrevu	Bez dohrevu, v prípade použitia nízkoteplotných katalyzátorov, nízka koncentrácia popola	Nízka koncentrácia znečisťujúcich látok Najdlhšia životnosť katalyzátoru
Nevýhody	Abrazia a usadzovanie Nízka životnosť katalyzátoru	Neekonomické pre staršie jednotky, obvykle nutný dohrev	Potrebná doba nahrievania Vyššie prevádzkové a investičné náklady

VÝPOČTOVÁ ČASŤ

7. Návrh technológie

Táto práca sa zaoberá návrhom ohrevu spalín pre technológiu SCR v konfigurácii tail end. Návrh vychádza z reálnych podmienok, odmeraných na reálnom zdroji Teplárni Trmice. Výpočet bude realizovaný na základe zloženia spalín za odsírením, teploty spalín za odsírením a požadovanou teplotou na vstupe do katalyzátora. Pre toto zadané technické riešenie je predmetom tejto diplomovej práce návrh výmenníku tepla typu spaliny – spaliny. Tento výmenník umožní vďaka odpadnému teplu zo spalín vystupujúcich z reaktora predohrev spalín a spoločne s dohrevom spalín zaistí požadovanú teplotu spalín na vstupe do katalyzátora.

Úlohou výmenníku je ohriať spaliny prichádzajúce do katalyzátora na požadovanú teplotu a ochladiť spaliny vystupujúce z katalyzátora. Ďalšie podkapitoly budú teda obsahovať návrh jednotlivých zariadení a potrebné výpočty.

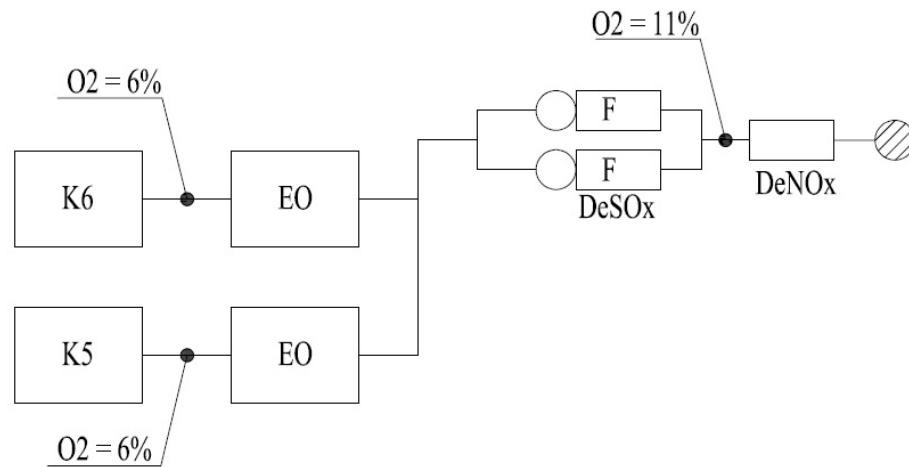
7.1. Voľba technológie SCR

Návrh je realizovaný pre čiastočnú prevádzku Teplárne Trmice spoločnosti ČEZ a.s., kde je aktuálne inštalovaných šesť parných kotlov s celkovým nominálnym tepelným výkonom 469,2 MWt. Každý z kotlov je vybavený samostatným elektroodlučovačom (EO), ktorý je napojený na odsírenie. Odsírenie je realizované v dvoch linkách spoločných pre všetky kotle. (Energoprojekt Praha, 2017)

Vzhľadom k plánovanej prevádzke a ekologizácii kotlov K1 až K4 boli zvolené pre návrh SCR jednotky kotle K5 a K6. Tieto kotle sú schopné pokryť primárne potreby dodávok tepla do siete CZT a výroby elektriny.

Podľa nameraných a prevádzkových skúseností je obsah kyslíka za kotlom približne 6%. Tento obsah sa vplyvom prisávania vzduchu po spalinovej trase zvyšuje. Obsah kyslíka v spalinách za odsírením bol určený na 11%. Nasledujúci obrázok zobrazuje zjednodušenú schému zapojenia SCR technológie (DeNOx).

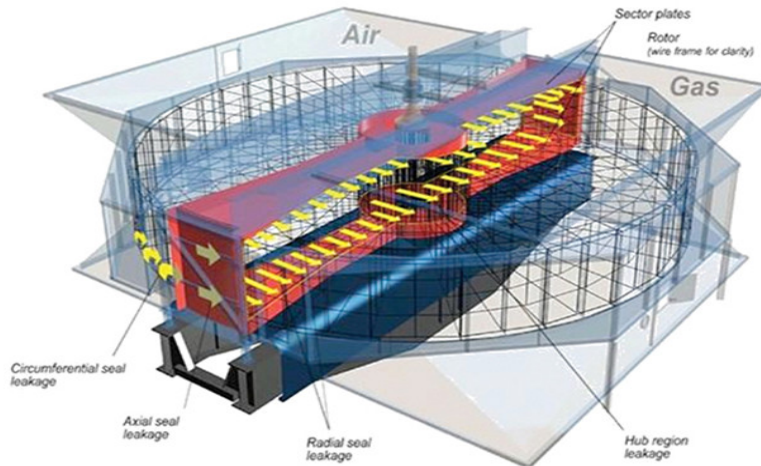
Obrázok 27 Technologická schéma uvažovaného návrhu



7.2. Voľba typu výmenníku

Podľa viacerých zdrojov (Lee, Chung, Kim, Bae & Cho, 2017; Howden Group, 2019; Burmeister & Wain, 2019) sú najpoužívanejšie typy výmenníkov na ohrev spalín regeneračné výmenníky typu Ljungstroem.

Obrázok 28 Výmenník typu Ljungstroem



Zdroj: Zhangjiagang HuaDong Boiler Co., Ltd. *Regenerative Rotary Air Preheater / Gas Air Heat Exchanger Ljungstrom Heating Elements*. [online]. ©2019 [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.boilerfabrication.com/sale-9447891-regenerative-rotary-air-preheater-gas-air-heat-exchanger-ljungstrom-heating-elements.html#>

Ohrievač typu Ljungstroem má rotujúce koleso uložené na axiálnych ložiskách. Toto koleso obsahuje zväzky zvlneného plechu, ktoré pri pomalých otáčkach prechádzajú prúdom teplejších spalín, kde akumulujú teplo, ktoré sa následne predáva chladnejším spalínám. V tejto práci bude pre návrh použitý tento typ výmenníku. Tento typ výmenníku je však problém navrhnuť, pretože si firmy strážia podklady pre výpočet v rámci firemného „know-how.“ (Dlouhý, 2011)

Druhou možnosťou môže byť použitie trubkového výmenníku. V prípade existujúcich kotlov malých a stredných výkonov bol tento typ ohrievača vzduchu historicky najpoužívanejší. Návrh takéhoto typu ohrievača je dnes pomerne dobre známy a existujú overené postupy na jeho výpočet. Trubkový výmenník tepla je možné použiť v systéme spaliny – spaliny, taktiež je možné jeho použitie v širokom rozsahu teplôt, poskytuje možnosť mechanického čistenia a jeho výroba je menej náročná. Rôzne aplikácie regeneračných trubkových výmenníkov na dohrev spalín využíva aj firma Flucorrex AG (2019). Na základe výsledkov a referencií z aplikácií typov výmenníkov je pre toto technické riešenie uprednostňovaný typ Ljungstroem. Tento výber typu výmenníku je odôvodnený tým, že pre požadované parametre sú potrebné veľké rozmery výmenníku a tým aj investičné náklady a tiež je pre danú lokalitu limitujúci priestor pre umiestnenie výmenníku. (Jelemenský, 2011; Dlouhý, 2011)

7.3. Voľba typu dohrevu

Vzhľadom k nutnosti regenerácie spalín vystupujúcich z regeneračného výmenníku Ljungstroem bude potrebná inštalácia dohrevu spalín na teplotné okno požadované pre reakciu v katalyzátore.

Jednou z možností je inštalácia plynového horáku, ktorý spaľuje zemný plyn, jednou z hlavných nevýhod tejto varianty je samotné spaľovanie plynu, ktoré má vplyv na zloženie spalín a zvýšenie emisií CO. Ďalšou nevýhodou je potrebné zabezpečenie dodávok plynu a tým zvýšenie nákladov na palivo.

Druhou možnosťou dohrevu spalín je zavedenie parného ohrevu, ktorý sa realizuje inštaláciou výmenníku, do ktorého sa privádza horúca para. Odber pary je realizovaný buď odberom z kotla, alebo z turbíny. V prvom prípade je nutná výstavba regulačnej stanice, čo znamená značnú investíciu. V druhom prípade sú investičné náklady nižšie, problémom je, že para musí dosahovať požadované parametre. Parný ohrev však prináša značnú úsporu v nákladoch na palivo v porovnaní s plynovým ohrevom a taktiež neovplyvňuje zloženie spalín za odsírením.

V tejto diplomovej práci bude pre návrh technológie tail end použitý parný ohrev. Toto riešenie je zvolené vzhľadom na dostupnosť vhodnej odberovej pary v Teplárni Trmice. Parametre pary pre dohrev spalín sú prevzaté zo štúdie Energoprojekt Praha (2017).

7.4. Palivo

Tepláreň Trmice spaľuje hnedé uhlie zo severočeských dolov Bílina typu ps2 (priemyslová zmes). V Tabuľke 15 sú uvedené stredné hodnoty použité pre nasledujúce výpočty.

V tejto diplomovej práci je uvedená časť výpočtov ako názorná ukážka výpočtovej metódy. Všetky výpočty boli následne kontrolované a v niektorých prípadoch počítané len pomocou tabuľkového procesoru MS Excel. Vzhľadom k tomu, že tento program počíta s celými hodnotami čísel a v príklade výpočtu sú jednotlivé hodnoty

zaokrúhľované mohla vzniknúť drobná odchýlka medzi jednotlivými výsledkami v príklade výpočtu a v tabuľke z MS Excel.

Tabuľka 15 Prvkové zloženie paliva

Parameter		Jednotka	Stredná hodnota
Výhrevnosť paliva	Q_i^r	[MJ/kg]	11,5
Hmotnostný podiel vody v palive	W_t^r	[% hm.]	25,40
Hmotnostný podiel popola v palive	A^r	[% hm.]	29,62
Prvkové zloženie horľaviny			
Hmotnostný podiel uhlíka v palive	C^r	[% hm.]	29,99
Hmotnostný podiel vodíka v palive	H^r	[% hm.]	2,52
Hmotnostný podiel dusíka v palive	N^r	[% hm.]	0,46
Hmotnostný podiel kyslíka v palive	O^r	[% hm.]	11,19
Hmotnostný podiel síry v palive	S^r	[% hm.]	0,82

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Energoprojekt Praha. *Odborná pomoc pri optimalizácii spalínového traktu s ohľadom na jeho těsnost.* [PDF štúdia]. ÚJV Řež, a.s., 2017. [Cit. 29.11.2019].

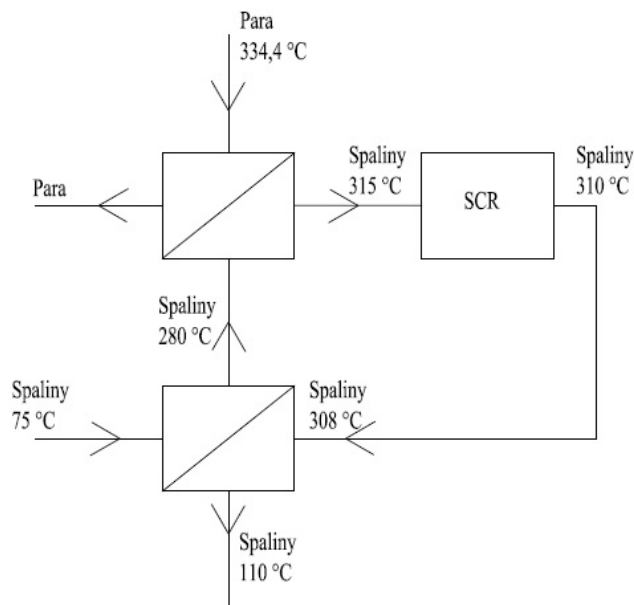
7.5. Vstupné parametre pre návrh SCR

Konfigurácia tail end bola zvolená na základe danej konfigurácie zdroja, ale prednostne na základe vysokej koncentrácie TZL v spalínach. Technológiu high dust nie je možné využiť u spalín vzniknutých spálením hnedého uhlia s vysokým obsahom popola. Technológiu low dust nie je vhodné použiť z dôvodu konfigurácie zdroja.

Celkovú schému selektívnej katalytickej jednotky zobrazuje Obrázok 29. Jednotlivé teploty v návrhu boli volené s ohľadom na použité technológie. Teplota spalín na vstupe do Ljungstroemu (na schéme dole) je daná použitou technológiou a umiestnením SCR jednotky v konfigurácii tail end v Teplárni Trmice.

Výstupná teplota spalín bola zvolená na základe bilancie Ljungstroem (viď kapitola 8.3). Vstupná teplota spalín do katalyzátoru bola zvolená na základe štúdie Energoprojekt Praha (2017), pričom sa obvykle udáva rozsah 250 až 430°C v závislosti na druhu katalyzátoru a zložení spalín. Vzhľadom k tomu, že samotná reakcia v katalyzátore takmer nemá vplyv na teplotu spalín (viď kapitola 6.2.2 – Chemizmus) bola zvolená teplota na výstupe zo SCR 310°C. S ohľadom na straty spalínového potrubia je teplota horúcich spalín na vstupe do Ljungstroemu zvolená na 308°C. Parametre pary sú dané štúdiou Energoprojekt Praha (viď Tabuľka 17).

Obrázok 29 Schéma zapojenia SCR jednotky



Nasledujúca tabuľka obsahuje základné teploty zvolené pre návrh samotnej technológie SCR.

Tabuľka 16 Požadované teploty

Teploty spalín			
Parameter		Jednotka	Hodnota
Teplota spalín za odsírením	t_1	[°C]	75
Teplota spalín na vstupe do SCR	t_2	[°C]	315
Teplota spalín na výstupe zo SCR	t_3	[°C]	310
Teplota spalín za výmenníkom	t_4	[°C]	110

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Energoprojekt Praha. *Odborná pomoc při optimalizaci spalínového traktu s ohledem na jeho těsnost*. [PDF štúdia]. ÚJV Řež, a.s., 2017. [Cit. 29.11.2019].

Tabuľka 17 Parametre použité pre výpočet parného ohrevu

Parametre parného ohrevu			
Parameter		Jednotka	Hodnota
Menovitý tlak pary	p	[MPa]	13,6
Menovitá teplota pary	t_p	[°C]	535
Teplota sytosti pary	t_p''	[°C]	334,4
Entalpia pary	h_p	[KJ/kg]	3425,1
Entalpia sýtej pary	h_p''	[KJ/kg]	2648,1
Tlak sýtej pary	p	[MPa]	9,2
Entalpia sýtej kvapaliny	h_l''	[KJ/kg]	1555,2

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Energoprojekt Praha. *Odborná pomoc při optimalizaci spalínového traktu s ohledem na jeho těsnost*. [PDF štúdia]. ÚJV Řež, a.s., 2017. [Cit. 29.11.2019].

7.6. Stechiometrický výpočet

Minimálny objem kyslíku potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva:

$$O_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (7.1)$$

$$O_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,29991}{12,01} + \frac{0,02519}{4,032} + \frac{0,0082}{32,06} - \frac{0,11187}{32} \right) = 0,6265 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

Potrebný minimálny objem suchého vzduchu:

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} \quad (7.2)$$

$$O_{VSmin} = \frac{0,6265}{0,21} = 2,983 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

Potrebný minimálny objem vlhkého vzduchu:

$$O_{VVmin} = x_v \cdot O_{VSmin} \quad (7.3)$$

$$O_{VVmin} = 1,016 \cdot 2,983 = 3,031 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

Kde:

x_v – podiel vodnej pary pripadajúci na 1 m³_n suchého vzduchu; pre bežné klimatické podmienky je možné zvolit' podľa Dlouhého (2011) $x_v = 1,016$, odpovedajúce relatívnej vlhkosti $\varphi = 70\%$ a teplote $t_v = 20^\circ\text{C}$

Objem vodnej pary v tomto objeme sa určí ako:

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} = (x_v - 1) \cdot O_{VSmin} \quad (7.4)$$

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} = (1,016 - 1) \cdot 2,983 = 0,048 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

Súčiniteľ prebytku spaľovacieho vzduchu určíme z nameraného obsahu kyslíku v spalinách:

Obsah kyslíku v spalinách 6%:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 6} = 1,4 \text{ [-]} \quad (7.5)$$

Obsah kyslíku v spalinách 11%:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 11} = 2,1 \text{ [-]} \quad (7.6)$$

V diplomovej práci budú uvedené výpočty pre jeden prebytok vzduchu, na výpočet pre druhý prebytok vzduchu bude využitý program MS Excel a uvedená tabuľka výsledkov.

V nasledujúcich rovniciach budú vypočítane skutočné objemy jednotlivých zložiek spalín:

Objem oxidu uhličitého:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VS \min} \quad (7.7)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,29991 + 0,0003 \cdot 2,983 = 0,557 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Objem oxidu siřičitého:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,00820 = 5,599 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.8)$$

Objem dusíku:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VS \min} \quad (7.9)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,00463 + 0,7805 \cdot 2,983 = 2,332 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Objem argónu, ktorý zahrňuje aj ďalšie vzácne plyny:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VS \min} = 0,0092 \cdot 2,983 = 0,027 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.10)$$

Objem vodnej pary vo vlhkých spalinách :

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H_2O}^V \quad (7.11)$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,02519 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,254 + 0,048 = 0,644 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Minimálny objem spalín, ktorý vznikne dokonalým spálením 1 kg paliva pri prebytku vzduchu $\alpha = 1$:

$$O_{SS \min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (7.12)$$

$$O_{SS \min} = 0,557 + 5,599 \cdot 10^{-3} + 2,332 + 0,027 = 2,922 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Objem vlhkých spalín:

$$O_{SV \min} = O_{SS \min} + O_{H_2O} = 2,922 + 0,644 = 3,566 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.13)$$

Výpočet objemov uvedených zložiek platí pre ideálny stav, pre zistenie skutočného objemu je potrebné spraviť prepočet uvedený nižšie.

Objem spalín s prebytkom vzduchu $\alpha > 1$ bude:

$$O_{SV}^{\alpha=1,4} = O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min} \quad (7.14)$$

$$O_{SV}^{\alpha=1,4} = 3,566 + (1,4 - 1) \cdot 3,031 = 4,778 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

$$O_{SV}^{\alpha=2,1} = O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min} \quad (7.15)$$

$$O_{SV}^{\alpha=2,1} = 3,566 + (2,1 - 1) \cdot 3,031 = 6,900 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Objem oxidu uhličitého:

$$O_{CO_2,skut} = 0,557 + (1,4 - 1) \cdot 0,0003 \cdot 2,983 = 0,557 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.16)$$

Objem oxidu siřičitého:

$$O_{SO_2,skut} = 5,599 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.17)$$

Objem dusíku:

$$O_{N_2,skut} = 2,332 + (1,4 - 1) \cdot 0,7805 \cdot 2,983 = 3,26 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.18)$$

Objem argónu, ktorý zahrňuje aj ďalšie vzácne plyny:

$$O_{Ar,skut} = 0,027 + (1,4 - 1) \cdot 0,0092 \cdot 2,983 = 0,038 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.19)$$

Objem vodnej pary vo vlhkých spalinách :

$$O_{H_2O,skut}^S = 0,644 + (1,4 - 1) \cdot (1,016 - 1) \cdot 2,983 = 0,663 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.20)$$

Objem kyslíku:

$$O_{O_2,skut} = (1,4 - 1) \cdot \left(\frac{21}{100} \right) \cdot 2,983 = 0,251 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (7.21)$$

Zloženie spalín

Prepočet skutočného objemu spalín na percentuálne zloženie:

$$x_i = \frac{O_i}{O_{SV}} \cdot 100 \quad (7.22)$$

$$x_{CO_2} = \frac{0,557}{4,778} \cdot 100 = 11,664 [\%]$$

$$x_{SO_2} = \frac{5,599 \cdot 10^{-3}}{4,778} \cdot 100 = 0,117 [\%]$$

$$x_{N_2} = \frac{3,26}{4,778} \cdot 100 = 68,293 [\%]$$

$$x_{Ar} = \frac{0,038}{4,778} \cdot 100 = 0,795 [\%]$$

$$x_{H_2O} = \frac{0,664}{4,778} \cdot 100 = 13,877 [\%]$$

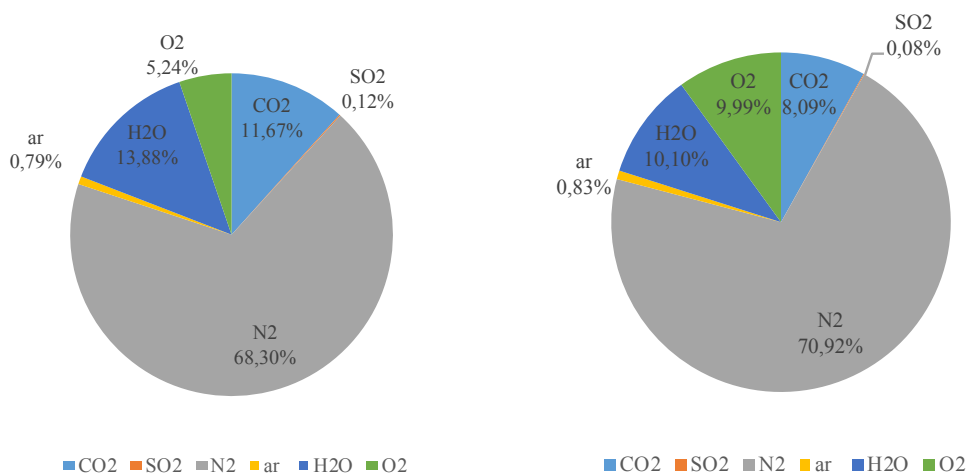
$$x_{O_2} = \frac{0,251}{4,778} \cdot 100 = 5,244 [\%]$$

Kontrola:

$$\sum x = x_{CO_2} + x_{SO_2} + x_{N_2} + x_{Ar} + x_{H_2O} + x_{O_2} = 100 [\%] \quad (7.23)$$

Graf 1 zobrazuje objemové zloženie spalín. Vľavo je zobrazené zloženie spalín pre $\alpha=1,4$. Vpravo je potom možné vidieť objemové zloženie spalín pre $\alpha=2,1$. Konkrétne hodnoty sú uvedené v Tabuľke 18.

Graf 1 Objemové zloženie spalín (vľavo $\alpha=1,4$; vpravo $\alpha=2,1$)



Tabuľka 18 Výsledné hodnoty objemu a zloženia spalín

	Objem zložiek [Nm ³ /kg]		Zloženie spalín [%]	
	$\alpha = 1.4$	$\alpha = 2.1$		
O _{CO₂skut}	0.557	0.558	x _{CO₂}	11.664
O _{SO₂skut}	0.006	0.006	x _{SO₂}	0.117
O _{N₂skut}	3.263	4.893	x _{N₂}	68.293
O _{ar skut}	0.038	0.057	x _{ar}	0.795
O _{H₂O,skut}	0.663	0.697	x _{H₂O}	13.877
O _{O₂skut}	0.251	0.689	x _{O₂}	5.244

8. Návrh regeneračného výmenníku

Ako už bolo spomenuté, návrh bude realizovaný pre rotačný regeneračný výmenník typu Ljungstroem. Na predanie tepla spalín sa využíva akumulácia, pri ktorej sa teplo z teplejších spalín vystupujúcich z reaktoru SCR akumuluje do teplozmennej plochy. Dôležitým faktorom u tohto výmenníku je typ výplne rotoru, na ktorej závisí súčiniteľ prestupu tepla. Samotná výplň je rozdelená na tzv. studený a teplý diel, studená časť rotoru má kvôli častejšej výmene z dôvodu korózie silnejšie plechy a redšiu výplň. (Dlouhý, 2011)

Nasledujúce výpočty budú vzťahované k prebytku vzduchu za odsírením, tzn. $\alpha = 2,1$.

8.1. Návrhové parametre

Pre výpočet zdieľania tepla je potrebné určiť fyzikálne vlastnosti spalín na studenej a teplej strane. V tabuľkách sa však nenachádzajú jednotlivé hodnoty pre dané teploty spalín, preto je nutná interpolácia.

Nasledujúca tabuľka obsahuje hodnoty mernej tepelnej kapacity pre základné zložky spalín pri rôznych teplotách.

Tabuľka 19 Hodnoty mernej tepelnej kapacity pre základné zložky spalín

Teplota t [°C]	Merná tepelná kapacita					
	cp [kJ/kg.K]					
	N ₂	O ₂	Ar	H ₂ O(p)	CO ₂	SO ₂
0	1,039	0,915	0,52	1,859	0,815	0,607
100	1,040	0,923	-	1,893	0,866	0,636
200	1,043	0,935	-	1,894	0,910	0,662
300	1,049	0,95	-	1,919	0,949	0,687
400	1,057	0,965	-	1,948	0,983	0,708

Pozn.: V prípade argónu nebolo možné nájsť merné tepelné kapacity pre rôzne teploty, vzhľadom k tomu, že jeho obsah v spalínach je nízky, nevznikne veľká chyba vo výpočte

Zdroj: Ústav energetiky VŠCHT Praha, *Energetické tabuľky*. [online]. [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://uen.vscht.cz/files/uzel/10466/S81LLUpPLclMzj68UqEkMak0J7sSAA.pdf?redirected>

V ďalšom kroku bude nutná interpolácia pre danú teplotu. Pre príklad bude uvedený výpočet pre teplotu spalín 75°C. Ďalšie teploty budú dopočítané pomocou programu MS Excel a výsledky budú uvedené v tabuľkách.

$$c_{p_{N_2}} = 1,039 + (75 - 0) \cdot \left(\frac{1,040 - 1,039}{100 - 0} \right) = 1,03975 \text{ [kJ/kg.K]} \quad (8.1)$$

Obdobný bude výpočet pre všetky zložky, nakoniec je nutné sčítať jednotlivé merné tepelné kapacity.

$$c_{p_{SP(75)}} = \sum c_{p_i} \cdot x_i = 1,090 \text{ [kJ/kg.K]} \quad (8.2)$$

Tabuľka 20 Hustota jednotlivých zložiek spalín za normálnych podmienok

Teplota	Hustota					
t [°C]	ρ [kg/m ³]					
	N ₂	O ₂	Ar	H ₂ O(p)	CO ₂	SO ₂
0	1.250	1.429	1.784	0.806	1.977	2.926

Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Hustotu vzduchu a spalín je možné určiť pomocou stechiometrických výpočtov podľa nasledujúcich vzťahov (Dlouhý, 2011):

$$\rho_{VV} = \frac{O_{VS \min} \cdot \rho_{VS} + (x_v - 1) \cdot O_{VS \min} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{VV \min}} \quad (8.3)$$

$$\rho_{VV} = \frac{2.983 \cdot 1,29279 + (1,016 - 1) \cdot 2.983 \cdot 0,8058}{3,031} = 1,285 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Kde:

x_v - podiel vodnej pary pripadajúci na 1 m³_n suchého vzduchu (viď kapitola 7.6)

Následne sa určí hustota stechiometrických spalín:

$$\rho_{SV \min} = \frac{\sum_i O_i \cdot \rho_i}{O_{SV \min}} = \quad (8.4)$$

$$= \frac{2,332 \cdot 1,250 + 0,6265 \cdot 1,429 + 0,027 \cdot 1,784 + 0,048 \cdot 0,806 + 0,557 \cdot 1,977 + 0,006 \cdot 2,926}{3,566}$$

$$\rho_{SV \min} = 1,407 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Daná hustota platí pre prebytok vzduchu $\alpha = 1$. Pre prebytok vzduchu $\alpha > 1$ sa hustota určí nasledovne:

$$\rho_{SV} = \frac{O_{SV \min} \cdot \rho_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min} \cdot \rho_{VV}}{O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}} \quad (8.5)$$

$$\rho_{SV} = \frac{3,566 \cdot 1,407 + (2,1 - 1) \cdot 3,031 \cdot 1,285}{3,566 + (2,1 - 1) \cdot 3,031} = 1,348 \text{ [kg/Nm}^3\text{]}$$

Vypočítane podmienky platia pre normálny tlak a teplotu, prepočet na dané podmienky je potrebné realizovať pomocou stavovej rovnice.

$$\rho = \rho_n \cdot \frac{273}{t + 273} \cdot \frac{p}{0,10325} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (8.6)$$

Tabuľka 21 Hodnoty hustoty a mernej tepelnej kapacity pre navrhnuté teploty spalín

Teplota	Hustota	Merná tepelná kapacita
t [°C]	ρ [kg/m ³]	cp [kJ/kg.K]
	Spaliny	Spaliny
75	1,014	1,090
110	0,921	1,092
308	0,607	1,111
315	0,600	1,112

8.2. Potrebné teplo

Aby bolo možné určiť potrebné teplo na ohrev spalín na požadovanú teplotu bude použitý výpočet pomocou entalpie spalín. Výsledná entalpia spalín odpovedá súčtu entalpií jednotlivých zložiek, ktoré sú prevzaté z literatúry (Dlouhý, 2011), a ich objemov, ktoré sú určené pomocou stechiometrického výpočtu. Výpočet bude realizovaný na základe literatúry Dlouhý (2011).

Tabuľka 22 Entalpie jednotlivých zložiek spalín

Teplota	Entalpie jednotlivých zložiek spalín						
	i _i [kJ/kg]						
t [°C]	N ₂	O ₂	Ar	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	vzduch suchý
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	32,5	32,8	23,3	39,1	41,6	46,8	32,6
100	129,5	131,7	93,1	150,6	170,0	191,2	132,3
200	259,9	267,0	186,0	304,5	357,5	394,1	266,2
300	392,1	406,8	278,8	462,8	558,8	610,4	402,5
400	526,7	550,9	371,7	625,9	771,9	836,5	541,7
500	664,0	698,7	464,7	794,5	994,4	1 070,0	684,1
600	804,3	849,9	557,3	968,8	1 225,0	1 310,0	829,6
700	947,3	1 003,0	650,2	1 149,0	1 462,0	1 554,0	978,1
800	1 093,0	1 159,0	743,1	1 335,0	1 705,0	1 801,0	1 129,0

Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

V prvom kroku je potrebné určiť entalpiu stechiometrických spalín a entalpiu minimálneho množstva vzduchu. V práci je uvedený vzorový výpočet, zvyšné entalpie sú dopyčítané pomocou programu MS Excel:

$$I_{S\ min}^t = \sum O_i \cdot i_i^t \quad (8.7)$$

$$I_{S\ min}^{25} = 0,557 \cdot 41,6 + 2,332 \cdot 32,5 + 0,027 \cdot 23,3 + 0,644 \cdot 39,1 + 0,626 \cdot 32,8 + 5,599 \cdot 10^{-3} \cdot 46,8$$

$$I_{S\ min}^{25} = 145,67 \text{ [kJ/kg]}$$

$$I_{V\ min}^t = O_{VS\ min} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2O}^v \cdot i_{H_2O}^t \quad (8.8)$$

$$I_{V\ min}^{25} = 2,983 \cdot 32,6 + 0,048 \cdot 39,1 = 118,02 \text{ [kJ/kg]}$$

Entalpia spalín pri teplote t [$^{\circ}\text{C}$], ktorá vznikne po spálení 1kg tuhého paliva s prebytkom vzduchu α je daná vzťahom:

$$I_S^{t,\alpha} = I_{S\ min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V\ min}^t \quad (8.9)$$

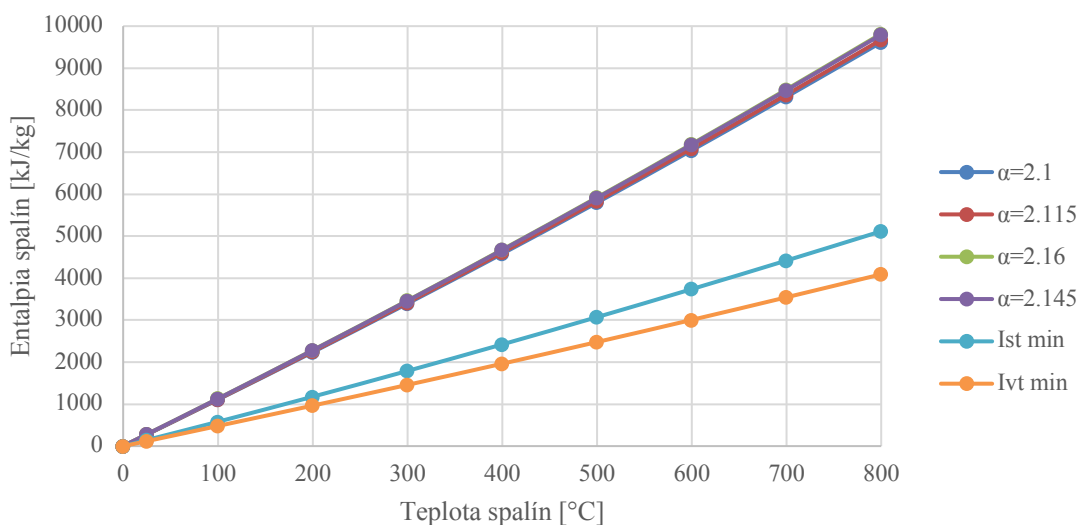
$$I_S^{25;2,1} = 145,67 + (2,1 - 1) \cdot 118,02 = 275,49 \text{ [kJ/kg]}$$

Tabuľka 23 Vypočítané hodnoty jednotlivých entalpií v programe Excel

Teplota	$I_{S\ min}^t$	$I_{V\ min}^t$	$I_S^{t,\alpha=2.1}$	$I_S^{t,\alpha=2.115}$	$I_S^{t,\alpha=2.16}$	$I_S^{t,\alpha=2.145}$
t [$^{\circ}\text{C}$]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
0	0	0	0	0	0	0
25	145,67	118,02	275,49	277,26	281,39	280,80
100	579,84	479,01	1106,75	1113,94	1130,70	1128,31
200	1175,97	963,89	2236,24	2250,70	2284,44	2279,62
300	1789,72	1457,53	3393,00	3414,86	3465,87	3458,59
400	2421,48	1961,75	4579,40	4608,82	4677,48	4667,68
500	3070,68	2477,64	5796,08	5833,24	5919,96	5907,57
600	3737,22	3004,86	7042,56	7087,63	7192,80	7177,78
700	4418,64	3543,06	8316,00	8369,15	8493,15	8475,44
800	5115,27	4090,09	9614,37	9675,72	9818,87	9798,42

Na základe vypočítaných entalpií vznikla závislosť entalpií na teplote pri danom prebytku vzduchu. Z Grafu 2 je následne možné odčítať jednotlivé hodnoty entalpií pre určené teploty použité pri návrhu technológie tail end. Vzhľadom k tomu, že pre dohrev spalín je použitý parný ohrev, zloženie spalín sa nezmení a platí daná závislosť.

Graf 2 Entalpie spalín v závislosti na teplote



Na základe h-t diagramu boli odčítané jednotlivé hodnoty entalpií pre navrhnuté teploty návrhu, ktoré boli spresnené výpočtom pomocou lineárnej interpolácie.

Tabuľka 24 Tabuľka entalpie spalín pre rôzne teploty a prebytky vzduchu

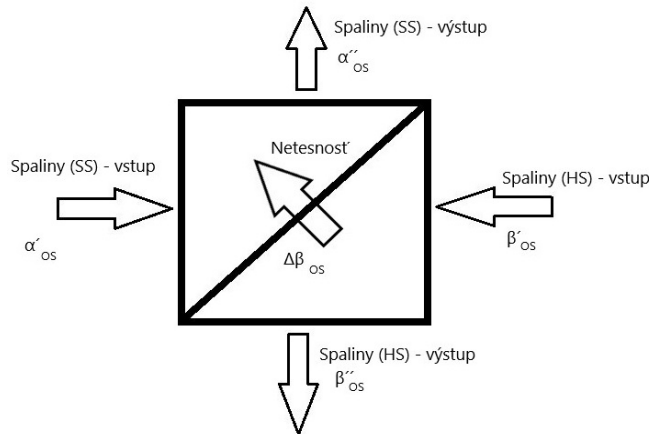
Teplota	$I_s^{t,\alpha=2.1}$	$I_s^{t,\alpha=2.115}$	$I_s^{t,\alpha=2.16}$	$I_s^{t,\alpha=2.145}$
t [°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
75	829,67	835,05	847,60	845,81
110	1219,70	1227,61	1246,08	1243,44
308	3487,91	3510,38	3562,80	3555,31
315	3570,96	3593,96	3647,62	3639,95

8.3. Bilancia Ljungstroem

Kvôli prehľadnosti výpočtu budú jednotlivé strany výmenníku označené ako „Horúca strana“ a „Studená strana“, pričom horúca strana (HS) reprezentuje spaliny vychádzajúce zo SCR reaktoru a vstupujúce do výmenníku. Studená strana (SS) reprezentuje ohrievané spaliny prichádzajúce z odsírenia a vstupujúce do nasledujúceho výmenníku.

Bilancia regeneračného výmenníku typu Ljungstroem je realizovaná na základe literatúry Dlouhý (2011).

Obrázok 30 Bilancia ohrievača spalín



Kde:

- α'_{os} – prebytok vzduchu v spalinách vstupujúcich (SS)
- α''_{os} – prebytok vzduchu v spalinách vystupujúcich (SS)
- β'_{os} – prebytok vzduchu v spalinách vstupujúcich (HS)
- β''_{os} – prebytok vzduchu v spalinách vystupujúcich (HS)
- $\Delta\beta$ – vnútorná netesnosť výmenníku

8.3.1. Bilancia

Z hľadiska návrhu tohto výmenníku budeme rešpektovať stratu vnútornou netesnosťou, ktorá je volená na základe literatúry Dlouhý (2011). Pre typ Ljungstroem je možné určiť prebytky vzduchu, ktoré rešpektujú straty nasledovne:

$$\alpha''_{os} = \alpha'_{os} + \Delta\beta_{os} = 2,1 + 0,015 = 2,115 [-] \quad (8.10)$$

Prebytok vzduchu na horúcej strane, tzn. spaliny vystupujúce zo SCR reaktoru, je volený ako $\alpha = 2,16$, prebytok vzduchu u vystupujúcich spalin sa teda určí ako:

$$\beta''_{os} = \beta'_{os} - \Delta\beta_{os} = 2,16 - 0,015 = 2,145 [-] \quad (8.11)$$

V nasledujúcom kroku bude definovaný bilančný vzťah rešpektujúci vnútornú netesnosť, z ktorého bude možné vyjadriť entalpiu spalin na výstupe (SS):

$$I_{S,vstup}^{SS} - I_{S,výstup}^{SS} + \Delta\beta_{os} \cdot I_{os} = (I_{S,výstup}^{HS} - I_{S,vstup}^{HS}) + Z_{SV}^{OS} \cdot Q_i^r \quad (8.12)$$

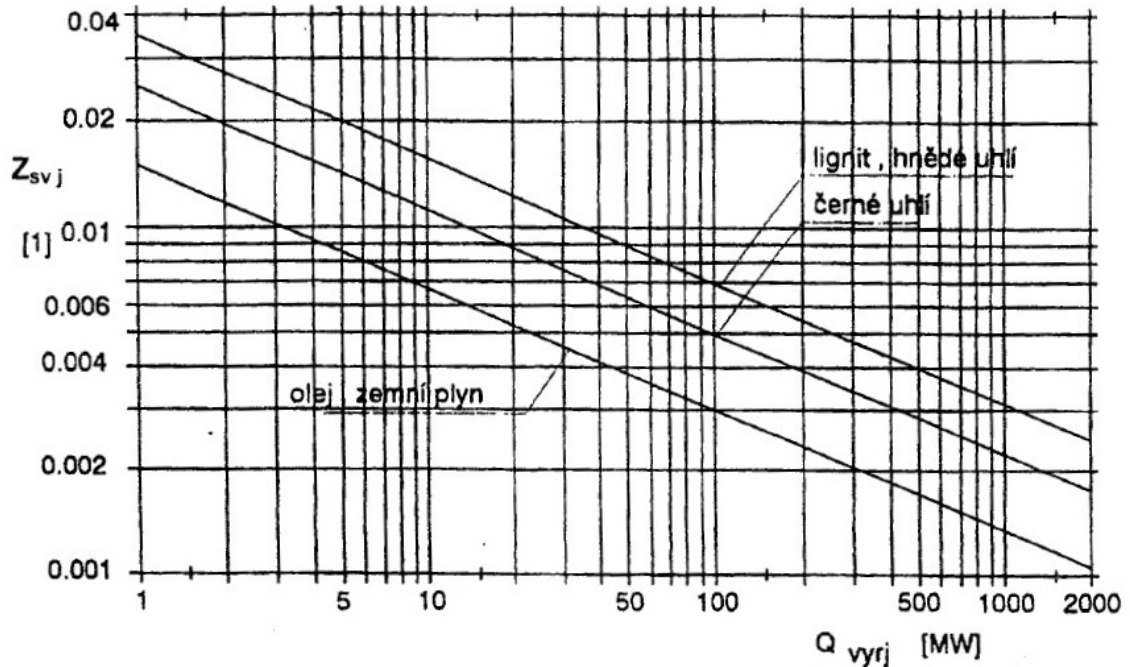
Kde:

- $I_{S,vstup}^{SS}$ – entalpia spalin vstupujúcich (SS) [kJ/kg]
- $I_{S,výstup}^{SS}$ – entalpia spalin vystupujúcich (SS) [kJ/kg]
- I_{os} – entalpia prisávaného vzduchu [kJ/kg]
- $I_{S,výstup}^{HS}$ – entalpia spalin vystupujúcich (HS) [kJ/kg]
- $I_{S,vstup}^{HS}$ – entalpia spalin vstupujúcich (HS) [kJ/kg]
- Z_{SV}^{OS} – strata tepla výmenníku do okolia [-]
- Q_i^r – výhrevnosť paliva [kJ/kg]

Nasledujúci obrázok zobrazuje stratu zdieľaním tepla do okolia. Vzhľadom k tomu, že táto strata predstavuje súčet všetkých čiastkových strát vzťahujúcich sa na jednotlivé bilančné objemy (napr. ohnisko, prehrievač, prihrievač atď.). Strata na

ohrievač spalín bude zvolená ako $Z_{SV}^{OS} = 0,001$. Celková hodnota straty pre danú jednotku by predstavovala približne $Z_{SV}^{OS} = 0,007$.

Obrázok 31 Strata zdieľaním tepla do okolia



Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

$$I_{S,výstup}^{SS} = I_{S,vstup}^{SS} + \Delta\beta_{OS} \cdot I_{OS} - (I_{S,výstup}^{HS} - I_{S,vstup}^{HS}) + Z_{SV}^{OS} \cdot Q_i^r \quad (8.13)$$

$$I_{S,výstup}^{SS} = 829,665 + 0,015 \cdot 168,91 - (1243,437 - 3562,804) + 0,001 \cdot 11500$$

$$I_{S,výstup}^{SS} = 3\,163,066 \text{ [kJ/kg]}$$

Teplotu spalín vystupujúcich z výmenníka na horúcej strane je potom možné určiť ako:

$$t_{s,výstup}^{SS} = 200 + (3163,066 - 2250,703) \cdot \frac{300-200}{3414,861-2250,703} \quad (8.14)$$

$$t_{s,výstup}^{SS} = 278,37^\circ\text{C}$$

8.4. Výpočet

Výpočet regeneračného výmenníku typu Ljungstroem je realizovaný na základe literatúry Dlouhý (2011).

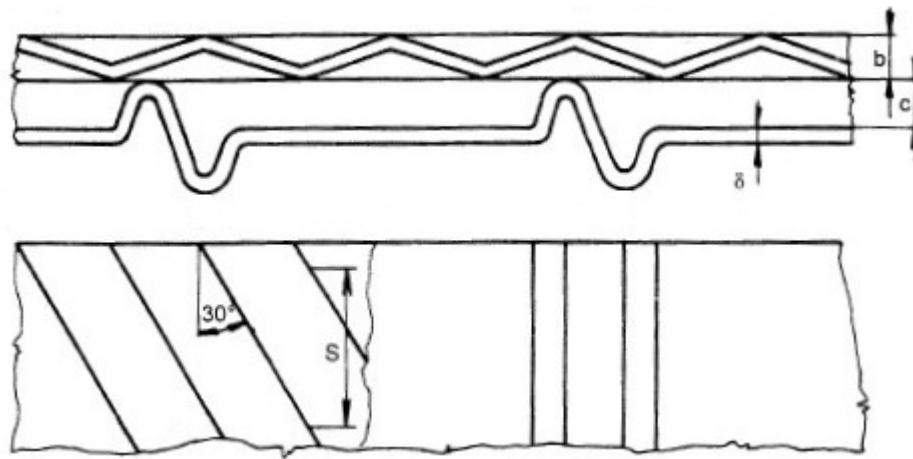
Zvolené parametre pre návrh výmenníku:

$$\text{ØD} = 9,4\text{m};$$

Priemer rotoru bol zvolený s ohľadom na dodržanie potrebnej rýchlosti spalín, tzn., že hodnota prierezu prúdu spalín bude teda prepočítavaná s ohľadom na rýchlosť spalín.

Dôležitým parametrom pri návrhu regeneračného výmenníku typu Ljungstroem je voľba typu výplne rotoru, na ktorom výrazne závisí súčiniteľ prestupu tepla α . Podľa vybranej literatúry existujú tri druhy výplne (viď Tabuľka 25). Pre návrh v tejto diplomovej práci boli zvolené ako výplň výmenníku plechy bez intenzifikácie, s ohľadom na relatívne čisté spaliny za odsírením a cenu výmenníku. Obrázok 32 zobrazuje zvolený typ výplne.

Obrázok 32 Schéma výplne pre regeneračný ohrievač spalín



Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Rotor výmenníku bude rozdelený na 24 segmentov. Pomer jednotlivých častí bude rozdelený v pomere 50:50, čo znamená, že horúca strana bude mať 11 segmentov, studená strana taktiež 11 segmentov. 2 segmenty budú slúžiť ako tesniace.

Pre zvolenú výplň rotoru sa prierez prúdu spalín určí ako:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot x \cdot K_r \cdot K_v \quad (8.15)$$

Kde:

D – priemer rotoru [mm]

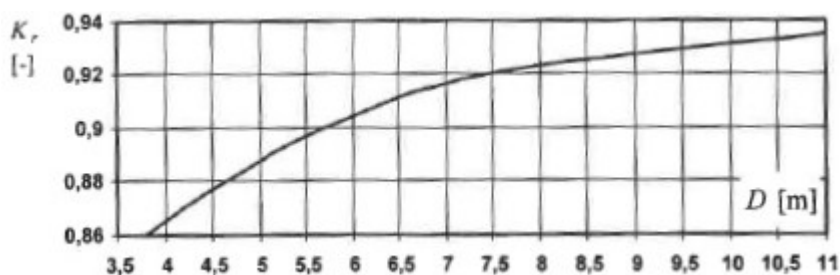
x – diel prierezu spalín x_s [-]

K_r – súčiniteľ rotoru charakterizujúci vplyv priemeru hriadeľa a prepážok na zmenšenie svetlého priemeru rotoru [-]

K_v – súčiniteľ výplne rotoru, ktorý charakterizuje vplyv výplne na zmenšenie svetlého prierezu rotoru [-]

Súčiniteľ K_r je možné určiť z nasledujúceho obrázku:

Obrázok 33 Súčiniteľ rotoru Kr



Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Súčiniteľ K_v je možné určiť z nasledujúcej tabuľky:

Tabuľka 25 Charakteristiky rotoru regeneračného ohrievača spalín v závislosti na d_e

Typ výplne	d_e [mm]	δ [mm]	K_v [-]	S_1 [m ² /m ³]
Hladké plechy	9,6	0,63	0,89	365
Plechy bez intenzifikácie	7,8	0,63	0,86	440
Intenzifikačné plechy	9,8	1,20	0,81	325

Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Počet segmentov na horúcej a studenej strane je totožný:

$$x_{SS} = x_{HS} = \frac{11}{24} \quad (8.16)$$

Po dosadení do vzťahu 8.15:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot 9,4^2 \cdot \frac{11}{24} \cdot 0,925 \cdot 0,86$$

$$F = 25,3 \text{ m}^2$$

Na určenie obojsmernej výhrevnej plochy výmenníku bude potrebné určiť súčiniteľ prechodu tepla k :

$$k = \frac{\xi \cdot P}{\frac{1}{x_{SS} \cdot \alpha_{SS}} + \frac{1}{x_{HS} \cdot \alpha_{HS}}} \quad (8.17)$$

Parameter ξ je súčiniteľ využitia plochy, ktorý nahrádza zanesenie a určuje aká časť čistej plochy je využívaná pre predanie tepelného výkonu. P je parameter nestacionárnosti zdieľania tepla, ktorý je závislý na počte otáčok rotoru. Na základe literatúry Dlouhý (2011) sú zvolené nasledujúce hodnoty parametrov:

- $\xi = 0,85$
- $P = 1$
- Počet otáčok rotoru; $n = 1,5$ ot/min

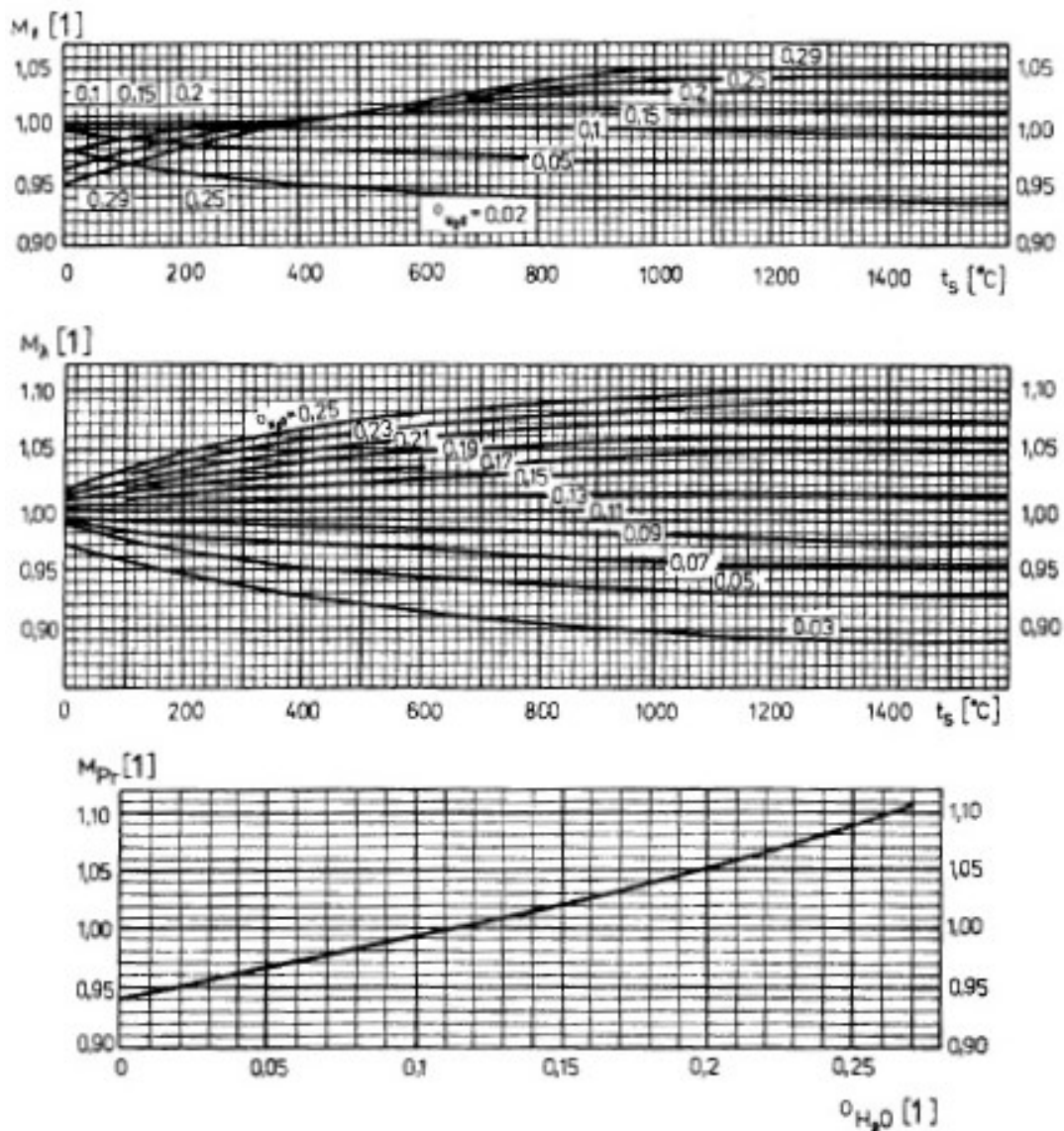
V nasledujúcich krokoch bude potrebné určiť súčinitele prestupu tepla pre horúcu a studenú stranu výmenníku, ktoré sa určia podľa nasledujúceho vzťahu:

$$\alpha_k = A \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \quad (8.18)$$

Tento vzťah je možné použiť za predpokladu že reynoldsove číslo sa v horúcej časti ohrievača pohybuje v rozmedzí $1\ 000 < 10\ 000$. Vzhľadom k tomu je nutné overiť hodnotu reynoldsovho čísla pre horúcu stranu. Nasledujúce výpočty veličín sú vzťahnuté k stredným hodnotám na oboch koncoch výmenníku.

Dlouhý (2011) uvádza stredné hodnoty parametrov pre spaliny, pričom je nutné zohľadniť obsah H_2O v spalinách. Korekcia sa vykonáva korekčným faktorom, ktorý je prevzatý z Obrázka 34.

Obrázok 34 Opravné koeficienty pre prepočet fyzikálnych charakteristík spalin stredného zloženia



Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Tabuľka 26 Fyzikálne charakteristiky spalín stredného zloženia

Teplota	Kinematická viskozita	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	Prandtlovo číslo
t [°C]	$10^{-6} \cdot \nu_{str}$ [m ² /s]	$10^{-2} \cdot \lambda_{str}$ [W/m.K]	Pr _{str} [-]
0	11,9	2,28	0,74
100	20,8	3,19	0,70
200	31,6	4,01	0,67
300	43,9	4,84	0,65
400	57,8	5,70	0,64
500	73,0	6,56	0,62

Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Nasledujúci výpočet bude uvedený ako príklad pre studenú stranu výmenníku. Ďalšie hodnoty sú vypočítané v programe MS EXCEL a uvedené v tabuľke.

Stredná teplota:

$$\bar{t}_s^{SS} = \frac{278,4 + 75}{2} = 176,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.19)$$

Kinematická viskozita pre stredné zloženie spalín, obdobne pre λ a Pr:

$$\nu_{str} = 20,8 + (176,7 - 100) \cdot \frac{31,6 - 20,8}{200 - 100} = 29,084 \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (8.20)$$

Kinematická viskozita:

$$\nu^{SS} = M_\nu \cdot \nu_{str} \quad (8.21)$$

$$\nu^{SS} = 1,01 \cdot 29,084 \cdot 10^{-6} = 29,375 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Súčiniteľ tepelnej vodivosti:

$$\lambda^{SS} = M_\lambda \cdot \lambda_{str} \quad (8.21)$$

$$\lambda^{SS} = 1 \cdot 3,843 \cdot 10^{-2} = 3,843 \cdot 10^{-2} \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

Prandtlovo číslo:

$$Pr^{SS} = M_{Pr} \cdot Pr_{str} \quad (8.22)$$

$$Pr^{SS} = 0,99 \cdot 0,676 = 0,669 \text{ [-]}$$

Tabuľka 27 Fyzikálne charakteristiky spalín pre návrh výmenníku

Stredná teplota	Strana výmenníku	Kinematická viskozita	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	Prandtlovo číslo
t [°C]	[-]	$10^{-6} \cdot \nu$ [m ² /s]	$10^{-2} \cdot \lambda$ [W/m.K]	Pr [-]
176,69	Studená	29,373	3,819	0,670
209	Horúca	33,034	4,085	0,662

8.4.1. Rýchlosť spalín

Na určenie reynoldsovo čísla je potrebné určiť rýchlosť prúdenia spalín. Dlouhý (2011) uvádza, že rýchlosť spalín sa v prípade regeneračných ohrievačov pohybuje v rozmedzí 9 až 11 m/s. Ďalšou možnosťou určenia rýchlosti je využitie nasledujúceho vzťahu:

$$\frac{x_{HS}}{x_{SS}} = \frac{V_S^{HS} \cdot w_S^{HS}}{V_S^{SS} \cdot w_S^{SS}} \quad (8.23)$$

Kde:

V_S^{HS} – prietok spalín na horúcej strane [m³/s]

V_S^{SS} – prietok spalín na studenej strane [m³/s]

w_S^{HS} – rýchlosť spalín na horúcej strane [m/s]

w_S^{SS} – rýchlosť spalín na studenej strane [m/s]

8.4.2. Skutočný prietok spalín

$$V_{S,skut}^{SS} = O_{SV} \cdot \frac{\overline{t_s^{SS}} + 273}{273} \cdot \frac{0,1013}{p_b - \Delta p_S} \cdot M_{pv} \quad (8.24)$$

Kde:

p_b – barometrický tlak [MPa]

Δp_S – absolútna hodnota podtlaku na strane spalín [MPa]

M_{pv} – množstvo spáleného paliva [kg/s]; prevzaté zo štúdie Energoprojekt Praha (2017), $M_{pv} = 82,48t/h$ (kotel K5 + K6)

$$V_S^{SS} = 6,9 \cdot \frac{176,69 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{0,1013}{0,1013 - 0,0023} \cdot 22,91 = 266,38 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Strednú rýchlosť spalín na studenej strane je potom možné určiť ako:

$$\overline{w_S^{SS}} = \frac{V_S^{SS}}{F} = \frac{266,38}{25,3} = 10,53 \text{ [m/s]} \quad (8.25)$$

8.4.3. Reynoldsove číslo

$$Re^{SS} = \frac{\overline{w_S^{SS}} \cdot d_e}{\nu} = \frac{10,53 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}}{29,373 \cdot 10^{-6}} = 2\,796,24 \text{ [-]} \quad (8.26)$$

Tabuľka 28 Výpočtové parametre spalín

Stredná teplota	Strana výmenníku	Skutočný prietok spalín	Absolútna hodnota podtlaku	Stredná rýchlosť spalín	Reynoldsovo číslo
t [°C]	[-]	$V_{S,skut}$ [m ³ /s]	Δp_s [Pa]	w_s [m/s]	Re[-]
176,69	Studená	266,4	2325	10,53	2 796,65
209	Horúca	280,9	675	11,10	2 621,63

8.4.4. Súčiniteľ prestupu tepla

Vzhľadom k tomu, že Reynoldsove číslo vyšlo v požadovanom rozmedzí, je možné použiť už vyššie uvedený vzťah 8.18 pre zistenie súčiniteľa prestupu tepla.

$$\alpha_k^{SS} = A \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \quad (8.27)$$

Kde:

A – koeficient, ktorý závisí na type výplne rotoru, (A = 0,027)

C_t, C_l – opravné koeficienty závislé na teplote prúdu a steny, v tomto prípade výmenníku rovné 1

$$\alpha_k^{SS} = 0,027 \cdot \frac{3,813 \cdot 10^{-2}}{7,8 \cdot 10^{-3}} \cdot (2796,24)^{0,8} \cdot 0,670^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k^{SS} = 64,30 [W/m^2 \cdot K]$$

Súčiniteľ prechodu tepla

$$k = \frac{\xi \cdot P}{\frac{1}{x_{SS} \cdot \alpha_{SS}} + \frac{1}{x_{HS} \cdot \alpha_{HS}}} \quad (8.28)$$

$$k = \frac{0,85 \cdot 1}{\frac{1}{0,458 \cdot 64,30} + \frac{1}{0,458 \cdot 65,09}} = 12,59 [W/m^2 \cdot K]$$

Tabuľka 29 Súčiniteľ prestupu a prechodu tepla

Stredná teplota	Strana výmenníku	Súčiniteľ prestupu tepla	Súčiniteľ prechodu tepla
t [°C]	[-]	$\alpha_k [W/m^2 \cdot K]$	k [W/m ² ·K]
179,65	Studená	64,42	12,61
209	Horúca	65,09	

8.4.5. Teplotný spád

Na rozdiely teplôt ochladzovaného a ohrievaného média je závislý tepelný výkon výmenníku, výkon sa však na rozdielnych miestach teplozmennej plochy mení. Z toho dôvodu sa pre výpočet používa stredný teplotný spád, ktorý je závislý na smere prúdenia spalín. V návrhu výmenníku je uvažované protiprudé zapojenie, tzn. že oba média prúdia voči sebe protismerne. Teplotný spád sa v tomto prípade určí ako stredný logaritmický teplotný rozdiel podľa nasledujúceho vzťahu:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \quad (8.29)$$

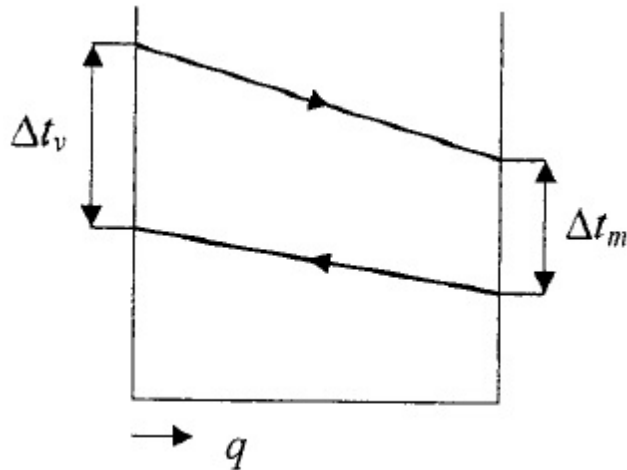
Kde:

Δt_v – väčší rozdiel teplôt oboch médií na konci výhrevnej plochy [K]

Δt_m – menší rozdiel teplôt oboch médií na konci výhrevnej plochy [K]

Nasledujúci obrázok zobrazuje návrhové teploty v protiprúdom zapojení výmenníku.

Obrázok 35 Protiprúde zapojenie výmenníku



Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

$$\Delta t_v = t_{s,výstup}^{HS} - t_{s,vstup}^{SS} = 110 - 75 = 35 \text{ [K]} \quad (8.30)$$

$$\Delta t_m = t_{s,vstup}^{HS} - t_{s,výstup}^{SS} = 308 - 278,4 = 29,6 \text{ [K]} \quad (8.31)$$

$$\Delta t = \frac{35 - 29,6}{\ln \frac{35}{29,6}} = 32,22 \text{ [K]}$$

8.4.6. Výhrevná plocha a výška výhrevnej plochy

Vzhľadom k tomu, že tepelný výkon ohrievača nie je známy, jeho hodnota bude zvolená ako $Q_{návrh} = 70 \text{ MW}$. Pre zvolený tepelný výkon sa následne určí veľkosť obojstrannej výhrevnej plochy. Z tohto výkonu bude ďalej spočítaná výška teplozmennej časti výmenníku.

$$S_{návrh} = \frac{Q_{OS,návrh}}{k \cdot \Delta t} \quad (8.32)$$

$$S_{návrh} = \frac{70 \cdot 10^6}{12,61 \cdot 32,22}$$

$$S_{návrh} = 172\,288,95 \text{ m}^2$$

$$h_{návrh} = \frac{4 \cdot S_{návrh}}{0,95 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot K_r \cdot S_1 \cdot z} \quad (8.33)$$

Kde:

S_1 - veľkosť obojstrannej výhrevnej plochy 1m^3 výplne rotoru, určí sa z Tabuľky 25 [m^2/m^3]

z - počet ohrievačov [-]

$$h_{návrh} = \frac{4 \cdot 172288,95}{0,95 \cdot \pi \cdot 9,4^2 \cdot 0,925 \cdot 440 \cdot 1}$$

$$h_{návrh} = 6,42 \text{ m}$$

Pre ďalší výpočet bola zvolená výška výhrevnej plochy 6,5m. Skutočná veľkosť obojstrannej teplozmennej plochy sa následne určí podľa vzťahu:

$$S = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot K_r \cdot S_1 \cdot h \quad (8.34)$$

$$S = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 9,4^2 \cdot 0,925 \cdot 440 \cdot 6,5$$

$$S = 174\,412,24 \text{ m}^2$$

Po určení skutočnej teplozmennej plochy určíme skutočný tepelný výkon ohrievača.

$$Q_{skut} = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (8.35)$$

$$Q_{skut} = 12,62 \cdot 174412,24 \cdot 32,22 \cdot 10^{-6} = 70,92 \text{ [MW]}$$

Bilančná rovnica pre výmenník:

$$Q_{skut} = \dot{m}_s \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (8.36)$$

Kde:

\dot{m}_s - skutočný prietok spalín [kg/s]

c_p - stredná merná tepelná kapacita spalín [kJ/kg.K]

ΔT - rozdiel teplôt na studenej / horúcej strane výmenníku [K]

Po úprave je možné určiť rozdiel teplôt na jednotlivých stranách výmenníku.

$$\Delta T^{SS} = \frac{Q_{skut}}{\dot{m}_s^{SS} \cdot c_p^{SS}} \quad (8.37)$$

$$\Delta T^{SS} = \frac{70,92 \cdot 10^3}{292,33 \cdot 1,097} = 221,15 \text{ [K]}$$

$$\Delta T^{HS} = \frac{Q_{skut}}{\dot{m}_s^{HS} \cdot c_p^{HS}} \quad (8.38)$$

$$\Delta T^{HS} = \frac{70,92 \cdot 10^3}{308,94 \cdot 1,099} = 208,88 \text{ [K]}$$

Výsledná výstupná teplota na jednotlivých stranách výmenníku sa potom určí ako súčet (SS) alebo rozdiel (HS) vstupnej teploty a rozdielu teplôt (ΔT).

$$t_{s,výstup}^{SS} = t_{s,vstup}^{SS} + \Delta T^{SS} \quad (8.39)$$

$$t_{s,výstup}^{SS} = 75 + 221,15 = 296,15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{s,výstup}^{HS} = t_{s,vstup}^{HS} - \Delta T^{HS} \quad (8.40)$$

$$t_{s,výstup}^{HS} = 308 - 208,88 = 99,12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ako je vidieť z priložených výsledkov, výstupné teploty neodpovedajú požadovaným návrhovým teplotám. V ďalšom postupe je teda nutné upravovať hodnotu tepelného výkonu výmenníku a výšku teplosmernej plochy a iteračnou metódou sa dostať k požadovaným hodnotám. Tento postup bol realizovaný pomocou výpočtového programu MS EXCEL. Výsledkom iteračnej metódy sú hodnoty:

- $Q_{os} = 65,46 \text{ MW}$
- $t_{s,výstup}^{SS} = 279,18^\circ\text{C}$
- $t_{s,výstup}^{HS} = 115,26 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $h = 6 \text{ m}$

Pre čo najpresnejší výsledok je nutné tieto získané teploty dosadiť znova do celého uvedeného výpočtu a iterovať. Výsledkom tohto postupu je výmenník s nasledujúcimi parametrami:

- tepelný výkon výmenníku $Q_{os} = 69,58 \text{ MW}$
- výstupná teplota na studenej strane $t_{s,výstup}^{SS} = 291,8^\circ\text{C}$
- výstupná teplota na horúcej strane $t_{s,výstup}^{HS} = 104,3^\circ\text{C}$
- výška teplosmernej plochy $h = 6 \text{ m}$
- priemer rotoru výmenníku $\varnothing D = 9,4 \text{ m}$

8.5. Voľba regeneračného výmenníku

V rámci tejto diplomovej práce boli porovnávané tri varianty regeneračného výmenníku typu Ljungstroem. Jednotlivé varianty sa líšili v teplotných spádoch na oboch koncoch výmenníku. Cieľom tohto porovnania bolo určiť najvýhodnejšiu variantu z ekonomického pohľadu s ohľadom na potrebu parného dohrevu za regeneračným výmenníkom. V tabuľke 30 sú uvedené základné parametre výmenníkov, ktoré boli určené pomocou vyššie uvedeného postupu.

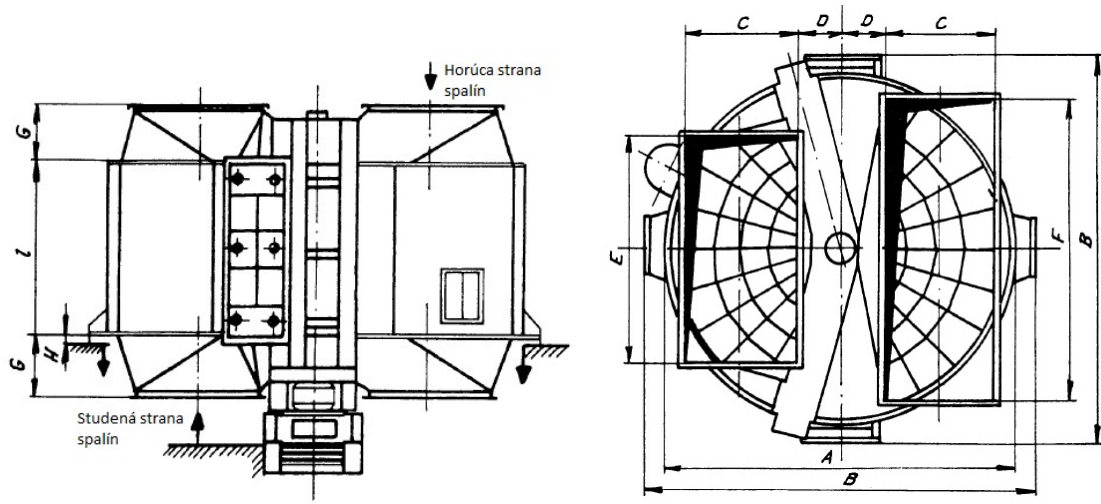
Tabuľka 30 Varianty regeneračného výmenníku Ljungstroem

Parametre regeneračného výmenníku		Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Parameter	Jednotka	Hodnota	Hodnota	Hodnota
Q_{os}	[MW]	69,58	66,83	72,04
$t_{s,výstup}^{SS}$	[$^\circ\text{C}$]	291,83	283,43	296,11
$t_{s,výstup}^{HS}$	[$^\circ\text{C}$]	104,36	112,57	92,99
h	[m]	6,0	5,5	10,5
$\varnothing D$	[m]	9,40	9,40	9,40

Výška výmenníku 10m bola určená ako nerealizovateľná, a to z dôvodu náročnosti výroby a dopravy daného výmenníku. Varianta 3 preto nebude uvažovaná pri ďalších výpočtoch.

8.6. Rozmery regeneračného výmenníku

Obrázok 36 Informatívne rozmery ohrievača Ljungstroem



Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Základné rozmery pre návrh regeneračného ohrievača Ljungstroem boli vybrané na základe uvedenej literatúry a sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 31 Informatívne rozmery ohrievača Ljungstroem

Typ	ø rotoru	A	B	C	D	E	F	G	H
24,5	9 400	9 792	10 430	3 600	1 070	7 690	9 030	1 300	100

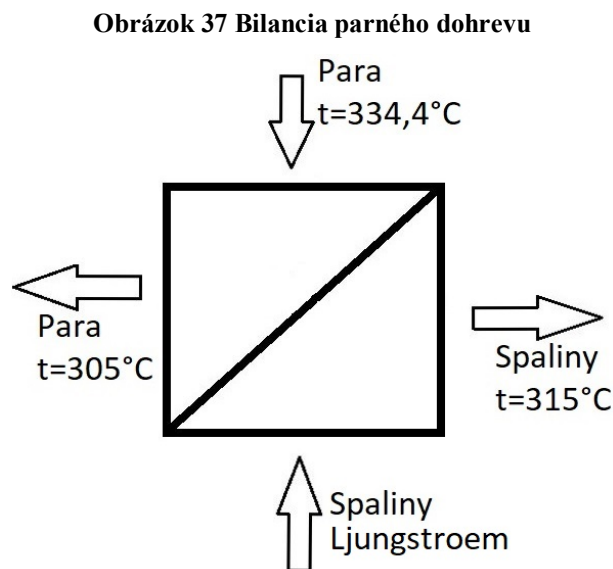
Zdroj: DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

9. Návrh parného dohrevu

Ako už bolo spomenuté v kapitole 7.3, vzhľadom k návrhu tejto technológie pre podmienky na reálnom zdroji, bude pre dohrev spalín na požadované teplotné okno použitý parný ohrev.

V rámci návrhu diplomovej práce je parný dohrev uvažovaný z hľadiska investičných a prevádzkových nákladov.

V tejto konkrétnej aplikácii je možné použitie ostrej pary, ktorá má parametre uvedené v Tabuľke 17. Využitie tejto pary vyžaduje inštaláciu redukčnej stanice pre úpravu pary na požadované parametre, čo bude mať za následok mierne zvýšenie investičných nákladov. Obrázok 37 zobrazuje bilanciu parného dohrevu, pričom na vstupe do výmenníku je uvažovaná upravená para s parametrami z regulačnej stanice. Na strane spalín je na vstupe uvažovaná teplota spalín rovná teplote na výstupe z Ljungstroemu.



Pre jednotlivé varianty regeneračného výmenníku Ljungstroem určíme množstvo tepla, ktoré je potrebné dodať v pare spalínám.

$$Q = \dot{m}_{sp} \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (9.1)$$

Kde:

\dot{m}_{sp} – hmotnostný prietok spalín [kg/s]

c_p – stredná merná tepelná kapacita spalín [kJ/kg.K]

Δt – rozdiel teplôt spalín na vstupe a výstupe [$^{\circ}\text{C}$]

Vzorový výpočet pre variantu 1:

$$Q = 97,93 \cdot 1,11 \cdot (315 - 292) = 2500,15 \text{ [kW]}$$

Tabuľka 32 Množstvo tepla pre jednotlivé varianty

		Varianta 1	Varianta 2
Parameter	Jednotka	Hodnota	Hodnota
Q	[kW]	2 500,55	3 504,62

V ďalšom kroku určíme spotrebu pary.

$$\dot{m}_p = \frac{Q}{h_p'' - h_l''} \quad (9.2)$$

Kde:

h_p'' - entalpia sýtej pary [kJ/kg]

h_l'' - entalpia sýtej kvapaliny [kJ/kg]

$$\dot{m}_p = \frac{2500,55}{2648,1 - 1555,2} = 2,29 \text{ [kg/s]}$$

Tabuľka 33 Spotreba pary na dohrev spalín

		Varianta 1	Varianta 2
Parameter	Jednotka	Hodnota	Hodnota
\dot{m}_p	[kg/s]	2,29	3,21
\dot{m}_p	[t/h]	8,24	11,54

V ďalšom postupe je potrebné kontaktovať výrobcu regeneračného výmenníku Ljungstroem, u ktorého sa zistí konkrétna cena za uvedené varianty výmenníku.

Vzhľadom k cene za výmenník sa určí bilancia na základe straty na výkone v pare, ktorú je potrebné dodať do parného dohrevu.

Uvažované straty:

- V1 – 11,54 [t/h] pary, strata na výkone 2,5 [MW]
- V2 – 8,24 [t/h] pary, strata na výkone 1,8 [MW]

S predpokladaným ročným využitím kotlov 6 800 hodín/rok a cene za elektrinu 1 000 Kč/MWh by návratnosť v podobe investície výmenníku s vyšším tepelným výkonom mala byť maximálne 6 rokov.

10. Spotreba amoniaku

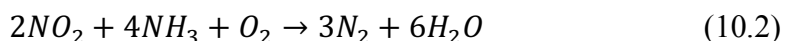
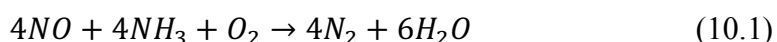
Táto kapitola je venovaná výpočtu potrebnej dávky amoniaku do spalín, ktorá zabezpečí aby prebehla redukcia v katalyzátore. Výpočet je realizovaný na základe vstupnej koncentrácie NO_x pred vstupom do reaktoru a požadovanej koncentrácie NO_x na výstupe z reaktoru (v tomto prípade požadovaná koncentrácia pre splnenie emisného limitu podľa nových požiadaviek BAT)

Tabuľka 34 Tabuľka požadovaných parametrov

Parametre na vstupe do katalyzátoru			
Koncentrácia NO _x (NO) pred vstupom do katalyzátoru	C _{NO_x, vstup}	600	[mg/Nm ³]
Objemový prietok spalín	V _{spalín}	160	[Nm ³ /s]
Pomer NO/NO ₂		93/7	[%]
Požadované parametre na výstupe z katalyzátoru			
Koncentrácia NO _x (NO) za katalyzátorom	C _{NO_x, výstup}	150	[mg/Nm ³]

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Energoprojekt Praha. *Odborná pomoc při optimalizaci spalínového traktu s ohledem na jeho těsnost*. [PDF štúdia]. ÚJV Řež, a.s., 2017. [Cit. 29.11.2019].

Chemické reakcie, ktoré prebiehajú pri reakcii amoniaku v SCR:



Z danej rovnice vyplýva, že k odstráneniu 1 molu NO je potrebné dodať 1 mol NH₃. K odstráneniu 1 molu NO₂ je potrebné dodať 2 moly NH₃.

Tabuľka 35 Tabuľka molárnych hmotností

Látka	M	Jednotka	Hodnota
NO	M	[g/mol]	30,01
NO ₂	M	[g/mol]	46,01
NH ₃	M	[g/mol]	17,03

Množstvo NO_x, ktoré je potrebné odstrániť:

$$\Delta m_{NO_x} = m_{NO_x \text{ vstup}} - m_{NO_x \text{ výstup}} = 600 - 150 = 450 \text{ [mg/Nm}^3\text{]} \quad (10.3)$$

Z toho množstvo NO a NO₂:

$$\Delta m_{NO} = 0,93 \cdot \Delta m_{NO_x} = 418,5 \text{ [mg/Nm}^3\text{]} \quad (10.4)$$

$$\Delta m_{NO_2} = 0,07 \cdot \Delta m_{NO_x} = 31,5 \text{ [mg/Nm}^3\text{]} \quad (10.5)$$

Z daných hodnôt je možné určiť, aké množstvo danej látky je potrebné odstrániť:

$$\Delta \dot{m}_{NO} = \Delta m_{NO} \cdot \dot{V}_{SP} = 418,5 \cdot 160 = 66\,960 \text{ [mg}_{NO}/\text{s]} \quad (10.6)$$

$$\Delta \dot{m}_{NO} = 241\,256 \text{ [g}_{NO}/\text{hod]}$$

$$\Delta \dot{m}_{NO_2} = \Delta m_{NO_2} \cdot \dot{V}_{SP} = 31,5 \cdot 160 = 5\,040 \text{ [mg}_{NO_2}/\text{s]} \quad (10.7)$$

$$\Delta \dot{m}_{NO_2} = 18\,144 \text{ [g}_{NO_2}/\text{hod]}$$

Prepočtom pomocou molárnej hmotnosti je možné určiť počet molov danej látky:

$$M_{NO} = \frac{\Delta \dot{m}_{NO}}{M_{NO}} = \frac{241256}{30,01} = 8\,039,19 \text{ [mol}_{NO}/\text{hod]} \quad (10.8)$$

Na základe vyššie uvedenej rovnice platí rovnosť:

$$M_{NO} = M_{NH_3} = 8\,039,19 \text{ [mol}_{NH_3}/\text{hod]} \quad (10.9)$$

Z toho vyplynie potrebné množstvo amoniaku na redukciu NO:

$$\dot{m}_{NH_3}^{NO} = M_{NH_3} \cdot M_{NH_3} = 8039,19 \cdot 17,03 = 136\,907,41 \text{ [g}_{NH_3}/\text{hod]} \quad (10.10)$$

$$\dot{m}_{NH_3}^{NO} = 136,9 \text{ [kg}_{NH_3}/\text{hod]}$$

Výpočet pre NO₂:

$$M_{NO_2} = \frac{\Delta \dot{m}_{NO_2}}{M_{NO_2}} = \frac{18144}{46,01} = 394,35 \text{ [mol}_{NO_2}/\text{hod]} \quad (10.11)$$

$$M_{NH_3} = 2 \cdot M_{NO_2} = 2 \cdot 394,35 = 788,7 \text{ [mol}_{NH_3}/\text{hod]} \quad (10.12)$$

$$\dot{m}_{NH_3}^{NO_2} = M_{NH_3} \cdot M_{NH_3} = 788,7 \cdot 17,03 = 13\,431,56 \text{ [g}_{NH_3}/\text{hod]} \quad (10.13)$$

$$\dot{m}_{NH_3}^{NO_2} = 13,43 \text{ [kg}_{NH_3}/\text{hod]}$$

Celková spotreba amoniaku je potom daná ako:

$$\dot{m}_{NH_3} = \dot{m}_{NH_3}^{NO} + \dot{m}_{NH_3}^{NO_2} = 150,33 \text{ [kg}_{NH_3}/\text{hod]} \quad (10.14)$$

10.1. Čpavkový sklz

Ako už bolo spomenuté v kapitole 6.2.2., po reakcii v katalyzátore uniká určité množstvo amoniaku spolu so spalínami do komína.

Podľa štúdie Fengyu a kol. (2017) býva účinnosť katalyzátorov približne 90%. Na základe toho bol zvolený čpavkový sklz ASR = 1,1. Pre prehľadnosť výpočtu bude v nasledujúcom výpočte koncentrácia NO a NO₂ v spalínach uvádzaná už len ako koncentrácia NO₂.

$$\dot{M}_{NO_2} = \dot{M}_{NO} + \dot{M}_{NO_2} \quad (10.15)$$

$$\dot{M}_{NO_2} = 8\,039,19 + 394,35 = 8\,433,54 \text{ [mol}_{NO_2}/\text{hod]}$$

$$ASR = \frac{\dot{M}_{NH_3}}{\dot{M}_{NO_2}} \rightarrow \dot{M}_{NH_3,ASR} = \dot{M}_{NO_2} \cdot ASR \quad (10.16)$$

$$\dot{M}_{NH_3,ASR} = 8433,54 \cdot 1,1 = 9\,276,89 \text{ [mol}_{NH_3}\text{/hod]}$$

$$\dot{m}_{NH_3,ASR} = 9276,89 \cdot 17,03 = 157\,985,44 \text{ [g}_{NH_3}\text{/hod]} \quad (10.17)$$

$$\dot{m}_{NH_3,ASR} = 157,99 \text{ [kg}_{NH_3}\text{/hod]}$$

$$\dot{m}_{NH_3,sklz} = \dot{m}_{NH_3,ASR} - \dot{m}_{NH_3} = 157,99 - 150,33 = 7,66 \text{ [kg}_{NH_3}\text{/hod]} \quad (10.18)$$

Celkové množstvo amoniaku unikajúceho so spalinami do ovzdušia je 7,66 kg/hod.

10.2. Spotreba vody

V nasledujúcom kroku je nutné určiť množstvo vody potrebné k dávkovaniu amoniaku. Na vstrekovanie sa používa roztok s koncentráciou čpavku 20%. Potrebné množstvo amoniaku je známe z predchádzajúceho výpočtu.

Celkový hmotnostný tok čpavkovej vody sa určí ako:

$$\dot{m}_{\odot,NH_3} = \frac{\dot{m}_{NH_3,ASR}}{0,2} = \frac{157985,44}{0,2} \quad (10.19)$$

$$\dot{m}_{\odot,NH_3} = 789\,927,2 \text{ g}_{NH_3}\text{/hod} = 789,93 \text{ [kg}_{NH_3}\text{/hod]}$$

Hmotnostný tok vody:

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{\odot,NH_3} \cdot 0,8 = 789927,2 \cdot 0,8 \quad (10.20)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 631\,941,76 \text{ g}_{H_2O}\text{/hod} = 631,94 \text{ [kg}_{H_2O}\text{/hod]}$$

10.3. Emisný limit

S nástupom emisných limitov od roku 2021 je sprísnený aj emisný limit pre emisie NH₃, čo znamená, že pri návrhu dávkovania amoniaku pre systém SCR je potrebné brať do úvahy tento limit. BAT uvádza emisný limit pre SCR <3 – 10 mg/Nm³.

$$\dot{m}_{NH_3,sklz} = 2\,127,78 \text{ [mg/s]}$$

$$c_{NH_3,výstup} = \frac{\dot{m}_{NH_3,sklz}}{\dot{V}_{spalín}} = \frac{2127,78}{160} = 13,3 \text{ [mg/Nm}^3\text{]} \quad (10.21)$$

Z vypočítanej hodnoty emisií amoniaku na výstupe z katalyzátora vyplýva, že pri danej miere čpavkového sklzu je problém dosiahnuť splnenie emisného limitu.

Vzhľadom k tejto skutočnosti bude od roku 2021 pravdepodobne značným problémom splnenie oboch emisných limitov pre oxidy dusíka aj amoniaku zároveň.

11. Návrh katalyzátoru

Návrh rozmerov katalyzátoru je spravidla vytvorený na základe CFD modelu, ktorý sa používa na numerickú analýzu tokov tekutín. Prípadne je volený na základe firemného „know-how“. Podľa BAT je návrh rozmerov katalyzátoru optimalizovaný pre obsah prachu v spalinách. Taktiež je závislý na charakteristikách prachu a prípustnom poklese tlaku v reaktore. Jednou z podmienok katalyzátorov je to, aby bol dodržaný nízky pokles tlaku a taktiež aby sa prachové častice neusadzovali. Aktivita katalyzátoru, objem spalín, redukcia NO_x, zloženie spalín a ich teplota a obsah jedov sú hlavné charakteristiky určujúce objem katalyzátoru. (European Commission, 2017)

Zjednodušený návrh uvádza United States Environmental Protection Agency (2019). Vzhľadom k tomu, že nie je známa aktivita katalyzátoru, budú podľa tohto návrhu uvedené základné výpočty pre návrh katalyzátoru. Po konzultácii s vedúcim diplomovej práce boli zvolené základné parametre katalyzátoru podľa existujúcich riešení, pričom podľa dostupných informácií je možné upravovať výšku katalytickej vrstvy (počet vrstiev) podľa prietoku spalín, a to pri zachovaní šírky a hĺbky katalyzátoru.

Prietok spalín pri požadovanej teplote a tlaku určíme podľa stavovej rovnice:

$$\dot{V}_{sp,kat} = \frac{p_n \cdot \dot{V}_s \cdot T_{kat}}{T_n \cdot p_{kat}} \quad (11.1)$$

Kde:

p_n – normálny tlak, $p = 101,325$ [kPa]

T_n – normálna teplota, $T = 273,15$ [K]

\dot{V}_s – prietok spalín [Nm³/s]

T_{kat} – požadovaná teplota na vstupe do katalyzátoru [K]

p_{kat} – tlak pri prevádzke katalyzátoru [kPa]

$$\dot{V}_{sp,kat} = \frac{101325 \cdot 160 \cdot (273,15 + 315)}{273,15 \cdot 100000} = 349,08 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

11.1. Plocha prierezu reaktoru

Plocha prierezu katalyzátoru je závislá na rýchlosti spalín a povrchovej rýchlosti. Podľa literatúry je optimálna povrchová rýchlosť spalín $w_{sp} = 4,88$ m/s. V prípade dodržania rýchlosti sa plocha určí ako (United States Environmental Protection Agency, 2019):

$$A_{kat} = \frac{\dot{V}_{sp,kat}}{w_{sp}} \quad (11.2)$$

$$A_{kat} = \frac{349,08}{4,88} = 71,53 \text{ [m}^2\text{]}$$

Samotná plocha reaktoru býva o 15% väčšia oproti ploche katalyzátora:

$$A_{SCR} = 1,15 \cdot A_{kat} = 82,26 [m^2] \quad (11.3)$$

Kde:

A_{SCR} – prierezová plocha SCR reaktoru [m^2]

11.2. Hĺbka a šírka reaktoru

Reálne rozmery sú závislé od uloženia jednotlivých modulov vo vrstve katalyzátora. Podľa literatúry sa pre jednotlivé moduly využívajú bežné rozmery šírky 1m a hĺbky 2m, pričom podľa usporiadania modulov môže byť reaktor štvorcového alebo pravouhlého tvaru. Pre prípad štvorcového usporiadania sa hĺbka a šírka odhaduje nasledovne (United States Environmental Protection Agency, 2019):

$$l = w = (A_{SCR})^{1/2} \quad (11.4)$$

Kde:

l – hĺbka SCR reaktoru [m]

w – šírka SCR reaktoru [m]

Vo štvorcovej konfigurácii bude teda hĺbka katalyzátora $l = 9,07m$ a šírka taktiež $w = 9,07$.

11.3. Počet vrstiev katalyzátora

Ako prvé je potrebné odhadnúť počet vrstiev katalyzátora. Tento odhad je následne kontrolovaný vypočítaním výšky katalyzátora pre každú vrstvu samostatne. Prvotný odhad počtu vrstiev sa určuje podľa celkového objemu a plochy katalyzátora. Počiatočná výška katalytickej vrstvy býva spravidla $h'_{vrstvy} = 0,95 m$. Počet vrstiev sa zaokrúhľuje na najbližšie celé číslo, pričom minimom sú aspoň dve vrstvy katalyzátora. Počet vrstiev sa určí ako (United States Environmental Protection Agency, 2019):

$$n_{vrstiev} = \frac{V_{kat}}{h'_{vrstvy} \cdot A_{kat}} [-] \quad (11.5)$$

Kde:

V_{kat} – teoretický objem katalyzátora [m^3], ktorý sa určí ako:

$$V_{kat} = \frac{-\left(\dot{V}_{sp,kat} \cdot \ln \left[1 - \left(\frac{\eta_{NO_x}}{ASR}\right)\right]\right)}{K_{kat} \cdot A_{špecifický}} \quad (11.6)$$

Kde:

η_{NO_x} – účinnosť odstránenia NO_x [%]

ASR – čpavkový sklz [-]

K_{kat} – aktivita katalyzátora [s^{-1}]

$A_{špecifický}$ – špecifický povrch katalyzátora [m^2/m^3]

Vzhľadom k tomu, že aktivitu katalyzátoru a špecifický povrch katalyzátoru je možné získať len priamo od výrobcu katalyzátoru, nie je možné určiť teoretický objem katalyzátoru.

11.4. Výška vrstvy katalyzátoru

Pomocou odhadnutého počtu vrstiev sa určí výška jednotlivých vrstiev katalyzátora. Podľa literatúry sa výška vrstiev katalyzátora pohybuje v rozsahu od 0,76 do 1,52m. Výška sa určí podľa nasledujúceho vzťahu (United States Environmental Protection Agency, 2019):

$$h_{vrstvy} = \left(\frac{V_{kat}}{n_{vrstiev} \cdot A_{kat}} \right) + 0,3 [m] \quad (11.7)$$

Pre inštaláciu katalytických vrstiev sa zohľadňuje priestor pod a nad katalytickou vrstvou prídavkom 0,3 m.

11.5. Celkový počet vrstiev

Vo vyššie uvedenom počte vrstiev nie sú zahrnuté vrstvy pre budúcu inštaláciu. Vzhľadom k plánu prevádzky katalyzátora (viď kap. 6.2.2 – Životnosť a deaktivácia katalyzátorov) sa odporúča výpočet aj s voľnými vrstvami katalyzátora. Celkový počet vrstiev sa následne určí ako (United States Environmental Protection Agency, 2019):

$$n_{celk} = n_{vrstiev} + n_{voľných\ vrstiev} [-] \quad (11.8)$$

Kde:

$n_{voľných\ vrstiev}$ – počet voľných vrstiev katalyzátoru pre budúcu inštaláciu [-]

11.6. Výška reaktoru

Následne sa určí celková výška reaktoru, ktorá zahŕňa počiatočné aj budúce vrstvy katalyzátora (United States Environmental Protection Agency, 2019).

$$h_{SCR} = n_{celk} \cdot (c_1 + h_{vrstvy}) + c_2 [m] \quad (11.9)$$

Kde:

c_1 – konštanta používaná v priemyslovej praxi; $c_1 = 2,13 [m]$

c_2 – konštanta používaná v priemyslovej praxi; $c_2 = 2,74 [m]$

11.7. Rozmery katalyzátoru

Ako bolo spomenuté na začiatku kapitoly, po konzultácii s vedúcim diplomovej práce boli zvolené parametre katalyzátoru na základe použitých riešení. Tieto parametre sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

Tabuľka 36 Základné parametre katalyzátoru

Parametre katalyzátoru		
Parameter	Jednotka	Hodnota
Šírka reaktoru	[m]	13
Hĺbka reaktoru	[m]	13
Počet katalytických vrstiev	[-]	2
Výška jednotlivých vrstiev	[m]	1,2
Celková výška reaktoru	[m]	7
Tlaková strata technológie	[Pa]	380

Tabuľka 37 Parametre spalín pri menovitom výkone

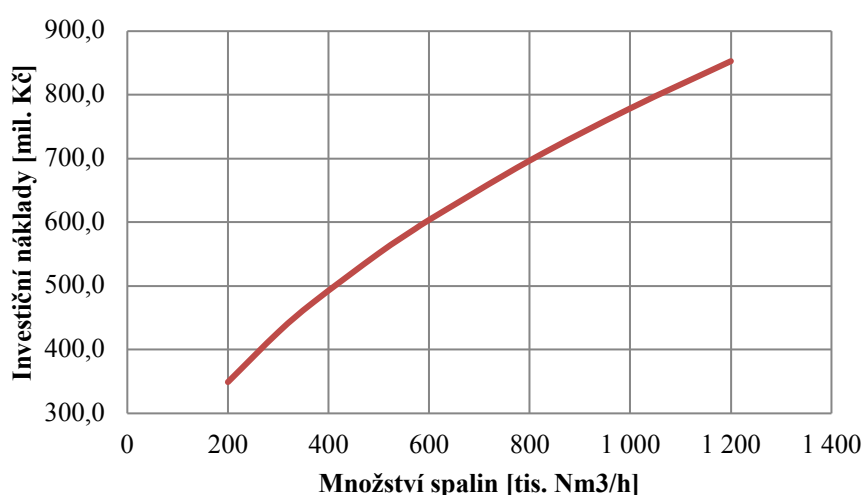
Parametre spalín		
Parameter	Jednotka	Hodnota
Množstvo spalín	[Nm ³ /h]	570 000
Teplota spalín na vstupe do katalyzátoru	[°C]	315
Rýchlosť spalín cez katalyzátor	[m/s]	4,15

12. Investičné náklady

Na oboch kotloch K5 aj K6 sa nachádzajú dva OVZ. Investíciou do obnovy týchto ohrievačov vzduchu by sa výrazne znížilo množstvo prisávaného falošného vzduchu, čo by malo za následok zníženie spotreby paliva aj investičných nárokov na inštaláciu SCR jednotky. Aktuálna koncentrácia O₂ za OVZ sa pohybuje približne na úrovni 11%, pričom doporučená koncentrácia je 6%. Veľké množstvo prisávaného falošného vzduchu do veľkej miery ovplyvňuje energetickú náročnosť opätovného ohreву spalín na požadované teplotné okno. Celkové náklady za výmenu OVZ a zatesnenie elektrostatických odlučovačov predstavujú 55 mil. KČ. (Energoprojekt Praha, 2017)

Nasledujúci obrázok zobrazuje závislosť investičných nárokov na množstve spalín pre SCR technológiu v konfigurácii tail-end.

Graf 3 Závislosť investičných nákladov na množstve spalín



Zdroj: Energoprojekt Praha. *Odborná pomoc při optimalizaci spalínového traktu s ohledem na jeho těsnost.* [PDF štúdia]. ÚJV Řež, a.s., 2017. [Cit. 29.11.2019].

Na základe štúdie Energoprojekt Praha (2017) bol vytvorený odhad investičných nárokov na jednotlivé technológie (viď Tabuľka 38). Pri vyššie spomenutej investícii do obnovy jednotlivých OVZ je možné dosiahnuť zníženie investície o 100 mil. KČ. Odhadované investičné náklady budú približne 600 mil. KČ.

Tabuľka 38 Investičné náklady SCR

Zložka	Jednotka	Hodnota
Technológia	Kč	408 169 130
ASŘTP – meranie a regulácia	Kč	44 573 071
Elektro inštalácia	Kč	12 019 704
Stavebná časť	Kč	122 701 149
Projekt a povoľovacia dokumentácia	Kč	22 536 946
Celkom	Kč	610 000 000

Zdroj: Energoprojekt Praha. *Odborná pomoc při optimalizaci spalínového traktu s ohledem na jeho těsnost.* [PDF štúdia]. ÚJV Řež, a.s., 2017. [Cit. 29.11.2019].

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

13. Meranie

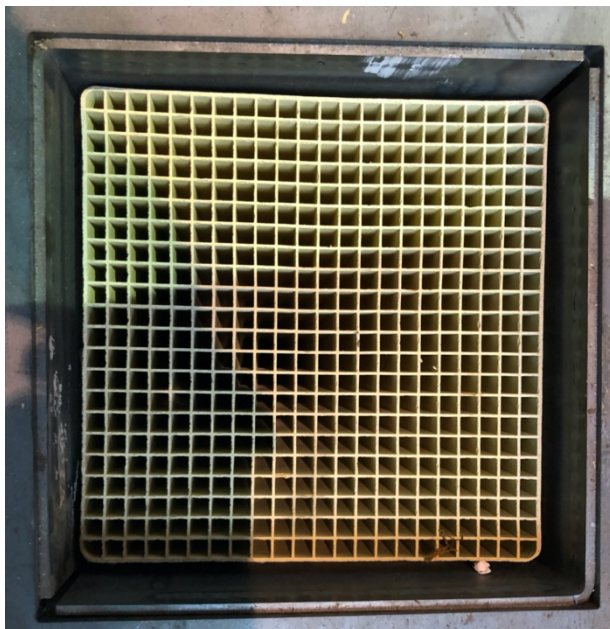
V rámci tejto diplomovej práce boli uskutočnené dva merania na pilotnej jednotke umiestnenej v laboratóriu turbín a kotlov ČVUT v Prahe. Tieto merania boli uskutočnené so zámerom demonštrovania účinnosti technológie SCR v konfigurácii tail end. Na tejto pilotnej jednotke prebieha výskum redukcie NO_x v spalinách v rámci CCS technológie oxyfuel spaľovania. Jedno meranie bolo realizované v režime spaľovania oxyfuel, druhé meranie prebiehalo v režime spaľovania so vzduchom.

13.1. Popis technológie

Samotný reaktor je napojený na výstup z cyklónového odlučovača z fluidného kotla, ktorý má výkon 500 kW. Spaliny za reaktorom sú zavedené do komína. Toto zapojenie odpovedá konfigurácii tail end. (Envir & Power, 2017)

V tele reaktoru sú umiestnené katalyzátory typu honeycomb (viď kap. 6.2.2 časť Blokové katalyzátory). Reaktor je taktiež vybavený usmerňovačom toku spalin a aparátou slúžiacou na meranie. Rozmery katalyzátoru sú cca 160x160x1260 mm. Dávkovanie sorbentu (NH_3) je zabezpečené prívodom do potrubia so spalinami pred reaktorom. (Envir & Power, 2017)

Obrázok 38 Štruktúra katalyzátoru honeycomb (vľavo) a pohľad na odkryté telo reaktoru (vpravo)



Zdroj: Vlastná fotodokumentácia



13.2. Technický popis a parametre

Pred vstupom do reaktoru je inštalované prívodné potrubie, pomocný ventilátor, vstupná meracia trať a ohrievač spalín, ktorý zabezpečuje dodržanie teplotného okna. Nasleduje samotný reaktor s katalyzátorom, za ktorým je výstupná meracia časť trate a potrubie vedúce do komína. (Envir & Power, 2017)

Vzhľadom k vysokým prevádzkovým teplotám je reaktor ukotvený do podlahy a jeho najviac tepelne namáhané časti sú uchytené osovo vedenými spojmi. Na tele reaktora je taktiež umiestnená izolácia s hrúbkou 100mm. (Envir & Power, 2017)

Ohrev spalín je realizovaný pomocou vysokoteplotného ohrevu, ktorý slúži aj ako predohrev potrubnej trasy a reaktoru pred nabiehaním systému, taktiež zabraňuje kondenzácii vlhkosti v spalínach. Nasledujúca tabuľka uvádza základné parametre ohrevu. (Envir & Power, 2017)

Tabuľka 39 Základné parametre ohrevu

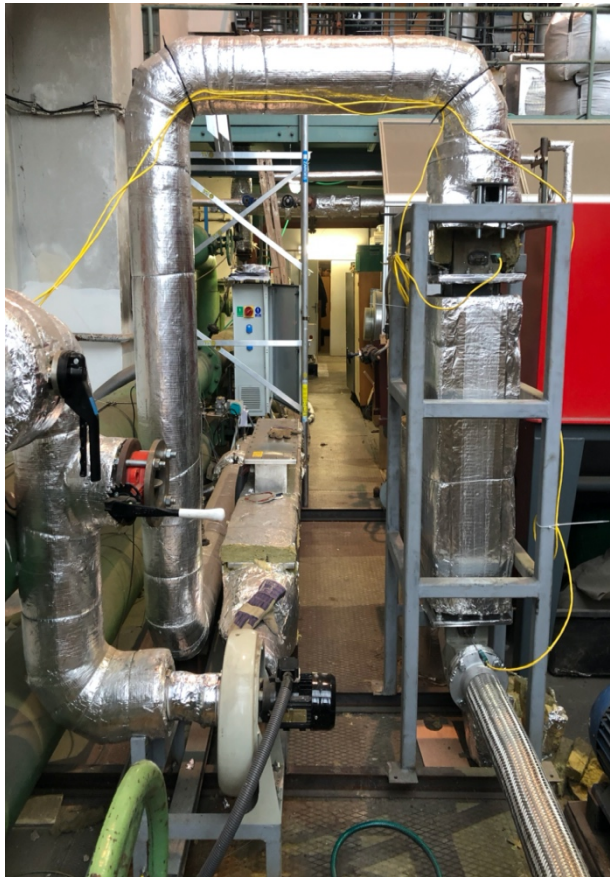
Parametre ohrevu	
Príkon	15 kW
Počet stupňov	5
Dĺžka ohrievača	2450 mm
Tlaková strata	140 Pa
Pripojenie	DN 150 PN 6

Zdroj: Vlastné spracovanie na základe Envir & Power Ostrava. *Výzkum redukce NO_x ve spalínách v rámci CCS technologie oxyfuel spalování*. 2017. [Cit. 14.12.2019].

Prívod spalín je realizovaný potrubím s rozmerom DN100 (114x4mm), ktoré je izolované po celej dĺžke, pričom hrúbka izolácie potrubia dosahuje 50mm. Teplota spalín na výstupe z cyklónového odlučovača je približne 120°C a ohrev je realizovaný na požadované teplotné okno 300 – 350°C. Spaliny prúdia reaktorom rýchlosťou 4,5 m/s o prietoku 150 Nm³/hod. Do spalín sa vstrekuje 100% plyný čpavok. (Envir & Power, 2017)

Obrázok 39 zobrazuje celkovú zostavu reaktoru, vľavo dole na obrázku sa nachádza spalínový ventilátor, na ktorý nadväzuje elektroohrev spalín. Spalínová trasa pokračuje potrubím až do reaktoru (vpravo na obrázku), kde je viditeľné pripojenie meracej časti.

Obrázok 39 Zostava reaktoru



Zdroj: Vlastná fotodokumentácia

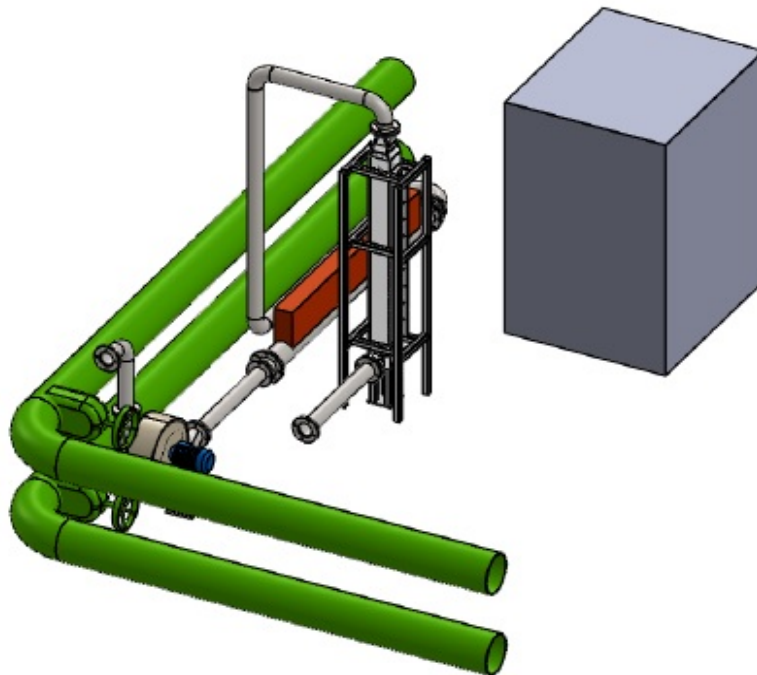
Obrázok 40 zobrazuje zostavu reaktoru z opačnej strany, odkiaľ je možné vidieť pripojenie dávkovania čpavku (vpravo na obrázku), ktoré je napojené za elektroohrevom spalín. Spaliny pokračujú potrubím (hore na obrázku). V tejto časti je viditeľná predpríprava na termočlánok pre jednorazové meranie teplôt.

Obrázok 40 Zostava reaktoru pohľad z opačnej strany



Zdroj: Vlastná fotodokumentácia

Obrázok 41 3D model zapojenia SCR jednotky



Zdroj: Envir & Power Ostrava. *Výzkum redukce NO_x ve spalinách v rámci CCS technologie oxyfuel spalování*. 2017. [Cit. 14.12.2019].

13.3. Realizácia merania

Merania boli uskutočnené v dňoch 16.7 a 29.11.2019 na vyššie spomínanom zariadení.

1) Palivo

Ako palivo bolo použité hnedé uhlie z lomu Bílina (Severočeské doly a.s.). Katalógové označenie HP1. Katalógové parametre paliva sú uvedené v kapitole 2.1.4.

2) Príprava požadovaných parametrov

Cieľom úpravy spaľovacieho procesu bolo dosiahnuť požadovanú teplotu na vstupe do katalyzátoru. Pri dosiahnutí požadovanej teploty 325 °C začalo dávkovanie amoniaku do prúdu spalín a samotné meranie. V druhom meraní pri režime oxyfuel nebolo možné dosiahnuť požadovanú teplotu. Z toho dôvodu začalo meranie pri teplote 250 °C.

3) Zaznamenávanie hodnôt

Hodnoty boli zaznamenávané na dvoch počítačoch, pričom každý zaznamenával časť rozdielnych parametrov. Zároveň prebiehalo ručné zapisovanie hodnôt do predom pripravených tabuliek. Jednotlivé hodnoty boli zaznamenávané v 10 minútovom časovom intervale. Pre účely tejto diplomovej práce boli zaznamenávané nasledujúce parametre:

- Hodnota emisií NO_x na vstupe do katalyzátoru [ppm]
- Hodnoty emisií NO_x na výstupe z katalyzátoru [ppm]
- Teplota na vstupe do katalyzátoru [°C]
- Teplota na výstupe z katalyzátoru [°C]
- Koncentrácia NH₃ na výstupe z katalyzátoru [mg/Nm³]
- Prietok spalín [Nm³/hod]
- Obsah H₂O v spalínach [%]
- Teplota meraná prostredníctvom termočlánku pred vstupom do reaktoru [°C]

Vzhľadom k spresneniu požadovaných výsledkov tejto diplomovej práce prebiehalo ručné meranie teploty pred vstupom do reaktoru (viď Obrázok 40). Meranie spočívalo v nainštalovaní termočlánku do spalínového potrubia, pričom termočlánok bol pripojený na 2-kanálový teplomer značky Testo (testo 922). Výstup z merania bol kompletizovaný prostredníctvom tabuľkového procesora MS EXCEL.

4) Dávkovanie NH₃

Jednotlivé dávky amoniaku boli najskôr určené teoreticky na základe rovníc procesu (viď kap. 6.2.2). Na základe týchto vypočítaných hodnôt boli určené nasledujúce dávky NH₃: 12,88; 10,17; 8,8; 5,2; 2,5 g/hod pre režim oxyfuel a dávky NH₃: 10; 8; 4; g/hod pre režim so vzduchom.

- Režim oxyfuel

Vzhľadom k nedostatočným výsledkom merania, kedy pri prvej dávke amoniaku jednotlivé hodnoty emisií NO_x na výstupe z katalyzátoru neodpovedali očakávaným hodnotám, bol počet dávok znížený na dve a to: 2,5 a 5 g/hod.

V momente keď sa hodnoty emisií NO_x na výstupe z katalyzátoru ustálili sa prešlo na vyššiu dávku amoniaku a meranie s ďalšou dávkou pokračovalo až do momentu, keď bolo ukončené spaľovanie v režime oxyfuel. V danej chvíli bolo ukončené aj dávkovanie NH_3 . Pre účely zistenia prechodového stavu od ukončenia dávkovania amoniaku boli zaznamenávané jednotlivé hodnoty až do odstavenia spaľovacieho zariadenia.

- Vzduchový režim

Dávkovanie začalo na najvyššej dávke amoniaku a to 10 g/hod. Pri ustálení výstupných hodnôt emisií NO_x sa prešlo na nižšiu dávku 8 g/hod. Keďže sa hodnoty emisií na výstupe takmer nemenili, prešlo sa na najnižšiu dávku amoniaku 4 g/hod a pri trvajúcom stave, tzn. že hodnoty na výstupe sa takmer nemenili, bolo dávkovanie amoniaku ukončené.

13.4. Vyhodnotenie merania

Na pilotnej jednotke boli v rámci diplomovej práce uskutočnené dva merania. Vzhľadom k tomu, že v Teplárni Trmice prebieha spaľovanie so vzduchom, pre vyhodnotenie boli použité dáta z tejto jednotky pri režime spaľovania so vzduchom. Namerané hodnoty pri režime oxyfuel teda poslúžia ako východisko pre ďalšie merania. V Prílohách k tejto diplomovej práci budú uvedené namerané hodnoty z oboch meraní.

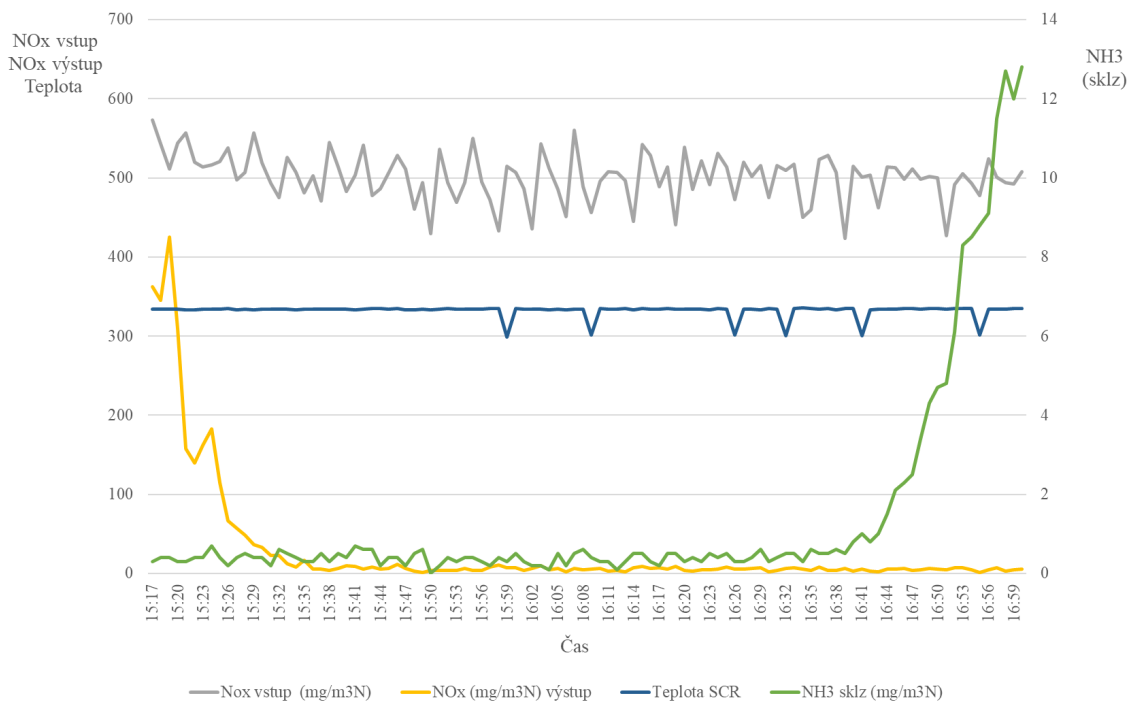
13.4.1. Dávka NH_3 10 g/hod

Nasledujúci graf zobrazuje vývoj oxidov dusíka na výstupe z reaktoru a čpavkového sklzu v závislosti na čase. Hodnoty oxidov dusíka a teplota pred vstupom do reaktoru slúžia pre orientačné účely. Mierne kolísanie teplôt v grafe je pravdepodobne zapríčinené chybou merania.

V danom časovom intervale bola použitá dávka amoniaku 10 mg/hod. Pri tejto dávke je možné vidieť, že hodnota čpavkového sklzu sa pomerne dlho pohybovala na istej hranici približne $1 \text{ mg/m}^3\text{N}$, až kým nezačala rásť. Tento stav bol pravdepodobne zapríčinený tzv. presýtením katalyzátoru amoniakom, pri ktorom už bol katalyzátor nasýtený do takej miery, že nebol schopný poňať viac amoniaku a ten začal prechádzať systémom do komína.

Ako vyplýva z tohto grafu krivka hodnôt vstupných oxidov dusíka veľmi neodpovedá hodnotám výstupných oxidov dusíka. Tento stav bol taktiež zapríčinený vysokou dávkou amoniaku. Navyše je potrebné podotknúť, že ustálenie meraných hodnôt trvá v prípade kotla nejakú dobu.

Graf 4 Časový vývoj meraných hodnôt



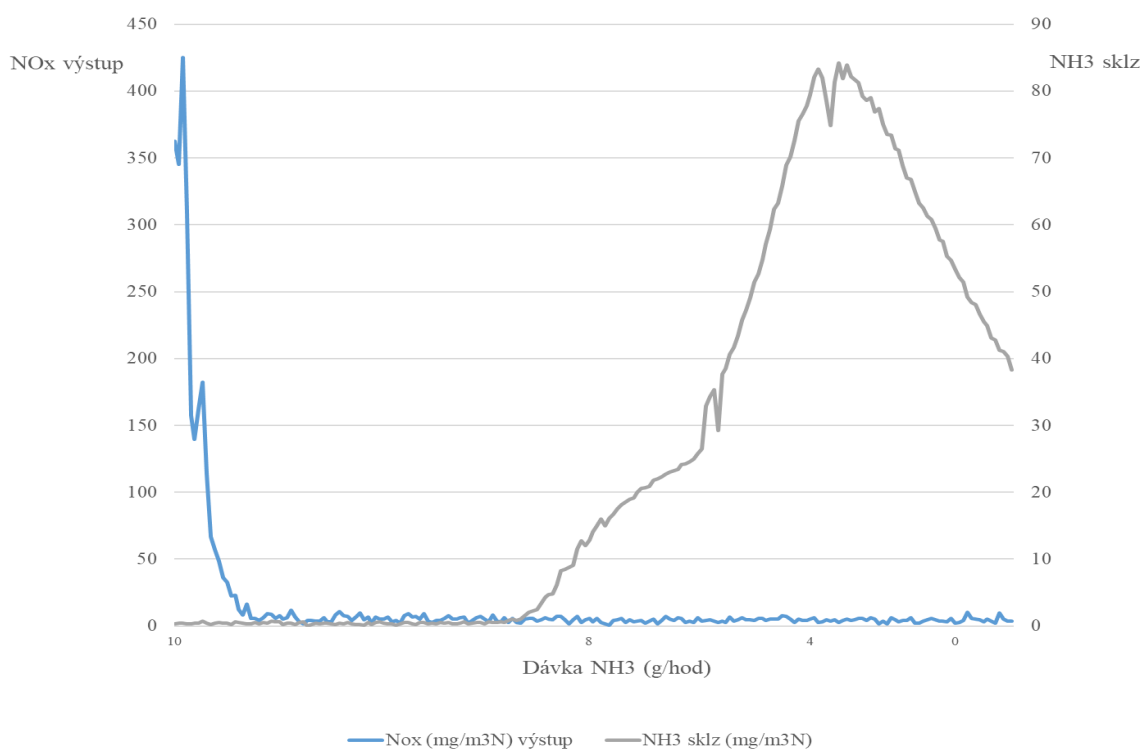
13.4.2. Rôzne dávky NH₃

V danom meraní bol zvolený postup, ktorý bol uvedený v kapitole 13.3, to znamená, že sa začalo s vyššou dávkou amoniaku, pričom sa ďalšie dávky znižovali. Dávkovanie bolo nasledovné: 10; 8; 4 g/hod.

Priložený graf znázorňuje závislosť emisií NO_x a čpavkového sklzu na jednotlivých dávkach. Vyhodnotenie rôznych dávok potvrdzuje tvrdenie z predchádzajúceho merania (viď kapitola 13.4.1) a to, že katalyzátor bol presýtený amoniakom. Na priloženom grafe je možné vidieť, že hodnota čpavkového sklzu mala tendenciu stúpať aj po znížení dávky amoniaku, pričom pri správnom fungovaní a pri zníženej dávke by mala hodnota čpavkového sklzu klesať. Hodnota čpavkového sklzu začala klesať až takmer v polovici dávky 4g/hod.

Predchádzajúce tvrdenia potvrdzujú taktiež namerané hodnoty emisií NO_x na výstupe z katalyzátoru. Tie sa pri nižších dávkach amoniaku držali na podobnej hladine ako pri najvyššej dávke. Dokonca nezačali stúpať ani pri zastavení dávkovania amoniaku do prúdu spalín.

Graf 5 Vývoj hodnôt v závislosti na rôznych dávkach amoniaku



13.4.3. Miera redukcie NO_x

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené priemerné hodnoty emisií oxidov dusíka na vstupe a výstupe z katalyzátoru pri rôznych dávkach amoniaku. Hodnota emisií NO_x na výstupe je spriemerovaná až z hodnôt, pri ktorých sa výstup ustálil, tzn. že hodnoty emisií sa pohybovali rádovo v jednotkách mg/m³N. Mierne nezrovnalosti vstupných emisií sú spôsobené odchýlkou v meraní.

Táto tabuľka opäť potvrdzuje prechádzajúce tvrdenia, pri zastavení dávkovania amoniaku je však vidieť mierny nárast výstupných emisií, čo by mohlo znamenať, že sa z katalyzátoru začal uvoľňovať nahromadený amoniak a pri pokračovaní spaľovania s nízkou dávkou amoniaku by sa katalyzátor nakoniec vyčistil.

Tabuľka 40 Priemerné emisie NO_x na vstupe a výstupe

Dávka NH ₃	Jednotka	No _x vstup	Jednotka	No _x výstup	Jednotka
10	[g/hod]	501,23	[mg/m ³ N]	5,61	[mg/m ³ N]
8	[g/hod]	477,84	[mg/m ³ N]	4,35	[mg/m ³ N]
4	[g/hod]	455,18	[mg/m ³ N]	4,25	[mg/m ³ N]
0	[g/hod]	454,21	[mg/m ³ N]	4,80	[mg/m ³ N]

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo v úvode vymedziť základné pojmy, ktoré súvisia s témou emisií a ochranou ovzdušia, palivovou základňou v ČR, nadväzujúcou legislatívou a technológiou dostupnou k znižovaniu emisií oxidov dusíka.

Pojmy ochrana ovzdušia a definovanie zdrojov znečistenia ovzdušia boli uvedené v kapitole jedna. Kapitola dva popisuje palivovú základňu v ČR, pričom sa zameriava na fosílna palivá, a to primárne na hnedé uhlie, ktoré je použité ako palivo pre výpočtovú aj experimentálnu časť tejto práce. Táto kapitola priniesla rozbor palivovej základne a zaujímavý pohľad na budúcnosť energetického mixu v Českej republike.

V tretej kapitole teoretickej časti sú vymedzené pojmy definované legislatívou, a to napríklad stacionárne zdroje či emisné limity. Podrobne boli ďalej definované emisné limity špecifické pre zadanie výpočtovej časti práce. Bez základnej vedomosti legislatívy zaoberajúcej sa znečisťovaním ovzdušia dnes nie je možné prevádzkovať alebo navrhnuť spaľovacie zariadenie. Táto časť práce teda účelne dopĺňa teoretický rámec tejto problematiky.

Kapitola štyri ďalej popisuje samotné oxidy dusíka a ich vplyv na životné prostredie. Na túto časť plynulo nadväzuje kapitola päť, ktorá sa zaoberá tvorbou oxidov dusíka v procese spaľovania.

Záver teoretickej časti je venovaný technológiám dostupným pre znižovanie oxidov dusíka. Samotná kapitola je rozdelená na primárne a sekundárne opatrenia, pričom podstatná časť kapitoly sa zaoberá selektívnou katalytickou redukciou, v rámci ktorej sú definované mechanizmy procesu, druhy katalyzátorov a požiadavky na katalyzátory. Poznatky z tejto časti tvorili základ pre návrh výpočtu a taktiež sú aplikované vo vyhodnotení experimentálnej časti.

Hlavný prínos teoretickej časti teda spočíval v pochopení danej problematiky a rozšírenia poznatkov potrebných pre účely výpočtovej a experimentálnej časti.

Výpočtová časť sa v úvode venuje voľbe a návrhu technológie, ktoré slúžia ako základ pre výpočet technológie SCR v Teplárni Trmice. Na základe poznatkov z teoretickej časti, podkladov zo štúdie Energoprojekt Praha (2017) a konzultácie s vedúcim diplomovej práce boli zvolené jednotlivé druhy zariadení v SCR konfigurácii tail end. V siedmej kapitole sú taktiež definované vstupné parametre pre návrh a stechiometrické výpočty, ktoré boli následne využité pre výpočet parametrov jednotlivých zariadení pre reálny zdroj.

Na stechiometrický výpočet priamo nadväzuje kapitola osem, ktorá detailne popisuje návrh regeneračného výmenníku Ljungstroem v troch variantách. Tento výmenník tvorí podstatnú časť celej technológie. Aby bolo možné orientovať sa vo výpočte, jednotlivé strany výmenníku boli označené ako „Horúca strana“ a „Studená strana“. Vzhľadom k nutnosti interpolácie jednotlivých výsledkov a prepočtu všetkých nadväzujúcich vzťahov bol výpočet realizovaný v tabuľkovom procesore MS EXCEL.

Výstup z tohto programu je uvedený v podobe tabuliek na konci každého výpočtu. Vzhľadom ku konštrukčným nárokom na výrobu výmenníku Ljungstroem bola jedna z variant vyradená.

Výpočet pokračuje kapitolou deväť a teda bilančným návrhom parného dohrevu, ktorý zabezpečuje dohriatie spalín na požadované teplotné okno pre zvolený typ katalyzátoru. Pri zohľadnení tohto návrhu je potrebné brať do úvahy závislosť výmenníku na odberovej pare, ktorá je dostupná v Teplárni Trmice. Výpočet bol realizovaný pre dve varianty s rozdielnymi výstupnými teplotami spalín z výmenníku Ljungstroem. Na konci výpočtu je v tejto kapitole uvedený náčrt bilancie z ekonomického pohľadu, ktorý by bolo vhodné realizovať pred finálnym výberom danej varianty.

V kapitole desať je uvedený podrobný výpočet dávky amoniaku, ktorý slúži ako reakčné činidlo pre reakciu v katalyzátore. Tento výpočet je realizovaný na základe vstupného množstva spalín do katalyzátoru a vstupnej koncentrácie NO_x , pričom cieľom návrhu bolo dosiahnuť požadovaný emisný limit.

Kapitola jedenásť popisuje výpočet rozmerov katalyzátoru. Na konci kapitoly sú uvedené parametre katalyzátoru na základe existujúcich riešení.

Výpočtovú časť uzatvára kapitola dvanásť, v ktorej sú uvedené investičné nároky na výstavbu technológií potrebných pre prevádzku SCR technológie v konfigurácii tail end. V tejto kapitole je možné vidieť, že ekologizácia spaľovacích zariadení vyžaduje značné investičné náklady. Zníženie investičných nárokov je možné dosiahnuť obnovením jednotlivých zariadení, ktoré sú súčasťou prevádzky teplárne.

Návrh samotných častí technológie SCR v konfigurácii tail end bol koncipovaný tak, aby bolo možné dosiahnuť emisné limity pre oxidy dusíka platné od roku 2021.

Experimentálna časť je zahrnutá v kapitole trinásť. Experiment bol realizovaný v rámci prebiehajúceho výskumu na existujúcej pilotnej jednotke umiestnenej v laboratóriu ČVUT. Meranie bolo zamerané na demonštrovanie účinnosti technológie SCR v konfigurácii tail end. Popis merania je uvedený na začiatku trinásťej kapitoly. Pri daných parametroch dosahovala účinnosť redukcie NO_x približne 90%, čo je hodnota odpovedajúca danej technológii. Táto hodnota však bola dosiahnutá pri vysokej miere čpavkového sklzu, ktorá vzhľadom k nastupujúcim emisným limitom nie je vyhovujúca. Tieto merania však boli uskutočnené ako jedny z prvých meraní na tejto jednotke, takže nie je možné konštatovať, že aj pri nižších dávkach by bola miera čpavkového sklzu natoľko vysoká. Vzhľadom k uvedenej skutočnosti je nutné, aby výskum naďalej prebiehal, pričom v budúcnosti by bolo vhodné začať na nižších dávkach amoniaku a pri ustálení výstupných hodnôt emisií oxidov dusíka jednotlivé dávky zvyšovať. Taktiež by bola vhodná dlhšia prevádzka spaľovacieho zariadenia. Vzhľadom k tomu, že pri najnižšej dávke začal katalyzátor vykazovať známky vyčistenia, je možné predpokladať, že katalyzátor by sa pri dlhšej prevádzke vyčistil a výsledky by mali väčšiu vypovedajúcu hodnotu.

V nadväznosti na výpočtovú časť bola v rámci tejto diplomovej práce vytvorená schéma zapojenia SCR technológie v konfigurácii tail end pre realizáciu na skutočnom zdroji v Teplárni Trmice. Schéma obsahuje legendy použitých zariadení a jednotlivých trás látok. Ďalšia schéma priložená k tejto diplomovej práci obsahuje dispozičné umiestnenie samotnej technológie pre danú konfiguráciu v Teplárni Trmice. Dispozičná schéma bola vytvorená na základe podkladov spoločnosti Energoprojekt Praha. Uvedené schémy sa nachádzajú v prílohách k tejto diplomovej práci.

Zoznam literatúry

BLEJCHAŘ, T. a kol. *CFD Model of SNCR with Shifting Effect of CO*. [online]. Annual Set The Environment Protection, 2018 [cit. 5.11.2019]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/137821/1506-218X-2018v20p109.pdf?sequence=1>

BUDÍN, J. *Evropská komise přijala zpřísněné emisní limity, platit začnou od poloviny roku 2021*. In: oenergetice.cz [online]. 8.8.2017 [cit. 3.9.2019]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/evropska-komise-prijala-zprisenene-emisni-limity-platit-zacnou-od-poloviny-roku-2021/#comments>.

BURMEISTER & WAIN *Gas Gas Heaters*. [online]. 2019 [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://www.bwsc.com/technical-solutions/upgrades/boiler-based-power-plants/heaters>

Carbounion bohemia, spol. s.r.o. *Jak velké jsou zásoby uhlí v ČR? Přinášíme vám přehled!* [online]. 2018 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.carbounion.cz/radce/jak-velke-jsou-zasoby-uhli-v-cr-prinasime-vam-prehled>

Česká geologická služba. *Surovinové zdroje České republiky*. [online]. Ministerstvo životního prostředí. 2018 [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/publikace/online/surovinove-zdroje/surovinove-zdroje-ceske-republiky-2018.pdf>

Český statistický úřad. *Spotřeba paliv a energie - 2018*. [online]. Český statistický úřad, Praha. 2019 [cit. 5.12.2019]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/spotreba-paliv-a-energie-2018>

ČEZ a.s. *Zemní plyn*. [online]. 2019 [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/zempl_4.html

DLOUHÝ, T. *Spalování a kotle – Tvorba a emise škodlivin při spalování* [prednáška]. Praha: Strojní fakulta ČVUT. 2018 [cit. 30.10.2019]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/SK-pr4.pdf>

DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 3. vydanie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7.

Energetický regulační úřad. *Roční zpráva o provozu plynárenské soustavy ČR za rok 2018*. [online]. Energetický regulační úřad, Jihlava. 2019 [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4583836/Rocni_zprava_provoz_PS_2018.PDF/1769375b-23dc-4cad-9d42-3eca054c3375

Energie pro ČR. *Kde se těží*. [online]. Energie pro ČR. 2019 [cit. 5.12.2019]. Dostupné z: <http://www.naseuhli.cz/kde-se-tezi>

Energoprojekt Praha. *Odborná pomoc při optimalizaci spalínového traktu s ohledem na jeho těsnost*. [PDF štúdia]. ÚJV Řež, a.s., 2017. [Cit. 29.11.2019].

Envir & Power Ostrava. *Výzkum redukce NO_x ve spalínách v rámci CCS technologie oxyfuel spalování*. [PDF štúdia]. 2017. [Cit. 14.12.2019].

European Commission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. [online]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. doi:10.2760/949. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/euro-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>.

European Commission. *Selective catalytic reduction of NO_x in flue gases using iron ore pellets*. 2017. [online]. Netherlands: HOOGO VENS ILMUIDEN BV, 2014. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/29724/factsheet/en>

Evropská agentúra pro životní prostředí [online]. 2010 [cit. 19.8.2019]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/e14927de444653bd1835e374d79d8858.

FENGYU, G. a kol. *A Review on Selective Catalytic Reduction of NO_x by NH₃ over Mn-Based Catalysts at Low Temperatures: Catalysts, Mechanisms, Kinetics and DFT Calculations*. [online]. 2017 [cit. 20.11.2019]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4344/7/7/199/pdf>

FLUCORREX AG [online]. *Gas-Gas*. 2019 [cit. 28.10.2019]. Dostupné z: <http://www.flucorrex.ch/gas-gas-e.html>

FORZATTI, P. Present status and perspectives in de-NO_x SCR catalysis. *Applied Catalysis A*. 2001. 222, 221-236. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0926860X01008328#bBIB4>

GLARBORG, P., JENSEN, A.D. & JOHANSSON, J.E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in energy and combustion science*, 2003, 29, 89-113. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S036012850200031X?token=BF262F3CF7368DF861122366A3E6CA91B6781BC9CE333315303F17749B32D28EB2BF1973147896FD9E17A8C78B7BA3A9>.

HILL, S.C. & SMOOT, L.. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. *Progress in energy and combustion science*, 2000, 26, 417-458. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360128500000113?token=6BB2D7B332C68FD5EBE0E8F74614338529B967E315A22BFD8D4A5AA6A1752F50F3D71FDA3A21C7BB89B5FD1AE58211A7>.

Howden Group [online]. *Gas Gas Heater*. 2019 [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <https://www.howden.com/en-us/products-and-services/heaters/gas-gas-heater>

JELEMENSKÝ, K. Výmenníky tepla – principy, výhody a nevýhody. *Idbjournal*. Bratislava. 2011 [cit. 28.10.2019]. Dostupné z: <https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/idb%20journal%202%202011%2034-36.pdf>

Johnson Matthey Stationary Emissions Control (SEC) [online]. *SCR catalyst – SINOx plate catalyst*. 2017 [cit. 16.11.2019]. Dostupné z: <https://www.jmsec.com/air-pollution-solutions/selective-catalytic-reduction-scr/>

KUBÍN, M. *Elektroenergetika v Českých zemích*. [online encyklopédia]. ČEZ, 2000 [cit. 25.10.2019]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vzdelavani-a-vyzkum/energetika-zabavne/nainstalujte-si/elektroenergetika-v-ceskych-zemich-46381>

LEE, Y.M., CHUNG, H., KIM, S., H., BAE, H., S., CHO, H., H. Optimization of the Heating Element in a Gas-Gas Heater Using an Integrated Analysis Model. *Energies*, 2017, 10, 1932. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en10121932>

LI, K., THOMPSON, S. & PENG, J. Modelling and prediction of NO_x emission in a coal-fired power generation plant. *Control Engineering Practice*, 2004, 12, 707-723. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0967066103001710>

LIM, K.J. a kol. *Environmental Assesment of Utility Boiler Comubstion Modification NO_x Controls*. [online]. 1980 [cit. 28.10.2019]. Dostupné z: <https://nepis.epa.gov/EPA/html/DLwait.htm?url=/Exe/ZyPDF.cgi/9101FPQ1.PDF?Dockey=9101FPQ1.PDF>

LIU, Ch. a kol. Influence of type of burner on NO emissions for pulverized coal preheating method. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 85, 278-286. ISSN 1359-4311, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.081>.

MAJLING, E. Těžba ropy a zemního plynu v České republice – historie a současnost In: *oenergetice.cz* [online]. 19.12.2016 [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ropa/tezba-ropy-a-zemniho-plynu-v-ceske-republice-historie-a-soucasnost/>

MILLER, J.A. & BOWMAN, C.T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in energy and combustion science*. 1989, 15, 287-338. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/0360128589900178>.

Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Zpráva o vývoji energetiky v oblasti ropy a ropných produktů za roky 2017 a 2018*. [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha. 2019 [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/zprava-o-vyvoji-energetickeho-sektoru-v-oblasti-ropy-a-ropnych-produktu-za-roky-2017-a-2018--248105/>

Ministerstvo životního prostředí České republiky. *Integrovaný registr znečišťování*. [online]. 2006 [Cit. 22.7.2018]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/Oxidy_dusiku_Karta_latky_11012019.pdf.

Ministerstvo životního prostředí České republiky. *Ochrana ovzduší*. [online]. MŽPRČR: 2019 [cit. 18.8.2019]. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/cz/ovzdusi>

NORMAN,F., ANDERSSON,K., LECKNER,B. & JOHNSON,F. *Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process*. In Progress in Energy and Combustion Science. 2009; 35 (385-397).

Oddělení analýz a datové podpory koncepcí. *Uhlí, koks a brikety v České republice. Výsledky statistických zjišťování za rok 2018*. [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/tuha-paliva/mesicni-statistika-uhli-2018--243074/>

Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ. *Roční zpráva o provozu ES ČR 2018*. [online]. Energetický regulační úřad, Jihlava. 2019 [cit. 4.12.2019]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c

Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ. *Roční zpráva o provozu teplárenských soustav ČR 2018*. [online]. Energetický regulační úřad, Jihlava. 2019 [cit. 4.12.2019]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/5391330/Zprava_o_provozu_TS_2018.pdf/bec4c828-cc45-4c94-89dd-f156bf49165c

OKD a.s. *Výroční zpráva OKD za rok 2018*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/o-nas/vyrocn-zpravy>

Provyko s.r.o. *SCR- Selektivní katalytická redukce*. [online]. 2019 [cit. 19.11.2019]. Dostupné z: <https://provyko.cz/cs/scr-selektivni-katalyticka-redukce/>

Sev.en Energy AG. *Společnosti skupiny*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/cz/kontakt/>

Sev.en Energy AG. *Těžba a úprava uhlí*. [online]. Severní energetická a.s. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/cz/skupina/severni-energeticka.html>

Sev.en Energy AG. *Těžba uhlí*. [online]. Vršanská uhelná a.s. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/cz/skupina/vrsanska-uhelna.html>

Sev.en Energy AG. *Těžíme a rekultivujeme*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/cz/cinnosti/#tezba-a-rekultivace>

Sev.en Energy AG. *Hlubinný důl*. [online]. Důl kohinoor a.s. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/cz/skupina/dul-kohinoor.html>

Sev.en Energy AG. *Katalog mosteckého uhlí*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://www.7energy.com/files/katalog-uhli2019.pdf>

Severočeské doly a.s. *Základní informace o společnosti*. [online]. 2015 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.sdas.cz/spolecnost/profil-spolecnosti/zakladni-informace-o-spolecnosti.aspx>

Severočeské doly a.s. *Doly Bilina*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.sdas.cz/aktivity/hornicka-cinnost/doly-bilina.aspx>

Severočeské doly a.s. *Doly Nástup Tušimice*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.sdas.cz/aktivity/hornicka-cinnost/doly-nastup-tusimice.aspx>

Severočeské doly a.s. *Katalog hnědého uhlí*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: http://www.sd-bilinskeuhli.cz/dokumenty/Katalog_2019.pdf

Severočeské doly a.s. *Severočeské doly a.s. Data a Fakta*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: https://www.sdas.cz/images/681161750_brozura-sd-fakta-a-cisla_2015_web.pdf

Sokolovská uhelná a.s. *Katalog sokolovského hnědého uhlí a briket na rok 2009*. [online]. 2009 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: https://www.suas.cz/images/dokumenty/142030152149809045aec37_1001625671497f08d8993a2_katalog_SUAS_09.pdf

Sokolovská uhelná a.s. *Stručný profil*. [online]. 2019 [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.suas.cz/spolecnost>

STANMORE, B.R. & VISONA, S.P. Prediction of NO emissions from a number of coal-fired power station boilers. *Fuel Processing Technology*, 2000, 64, 25-46. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382099000697?via%3Dihub>

The Babcock & Wilcox Company. *Steam its generation and use*. 40. vydanie. Miesto: Ohio, U.S.A., The Babcock & Wilcox Company, 1992. ISBN: 0-9634570-0-4.

The Babcock & Wilcox Company. *Steam its generation and use*. 41. vydanie. Miesto: Ohio, U.S.A., The Babcock & Wilcox Company, 2005. ISBN: 0-9634570-1-2.

United States Environmental Protection Agency (EPA). *Cost Reports and Guidance for Air Pollution Regulations*. [online]. North Carolina: Research Triangle Park, 2019 [cit. 17.11.2019]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/cost-reports-and-guidance-air-pollution>

Ústav energetiky VŠCHT Praha, *Energetické tabulky*. [online]. [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <http://uen.vscht.cz/files/uzel/10466/S81LLUpPLclMzj68UqEkMak0J7sSAA.pdf?redirected>

VEJVODA, J. a kol. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2002. ISBN 978-80-70-80517-6.

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

Výzkumné energetické centrum. *Tvorba škodlivin při spalování*. . [online]. Technická univerzita Ostrava, 2015 [cit. 1.11.2019]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/201-tvorba-1.pdf>

Zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší)

Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší

Zhangjiagang HuaDong Boiler Co., Ltd. *Regenerative Rotary Air Preheater / Gas Air Heat Exchanger Ljungstrom Heating Elements*. [online]. 2019 [cit. 24.10.2019]. Dostupné z: <http://www.boilerfabrication.com/sale-9447891-regenerative-rotary-air-preheater-gas-air-heat-exchanger-ljungstrom-heating-elements.html#>

Zoznam tabuliek, obrázkov a grafov

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Prehľad ťažby uhlia spoločnosti Sev.en Energy	18
Tabuľka 2 Prehľad ťažby uhlia spoločnosti Severočeské doly a.s.	19
Tabuľka 3 Základné vlastnosti a prvkové zloženie vybraných druhov uhlia.....	19
Tabuľka 4 Kategórie zdrojov znečisťovania ovzdušia.....	26
Tabuľka 5 Emisné limity pre zdroje o tepelnom príkone > 50 MW.....	27
Tabuľka 6 Emisné limity pre zdroje o tepelnom príkone > 50 MW.....	27
Tabuľka 7 Emisné limity podľa BREF pre zdroje o tepelnom príkone > 50 MW	28
Tabuľka 8 Emisné limity pre kotle a teplovzdušné priamotopné stacionárne zdroje o tepelnom príkone > 0,3 MW - < 50 MW	29
Tabuľka 9 Emisné limity pre piestové spaľovacie motory o tepelnom príkone > 0,3 MW - < 50 MW	29
Tabuľka 10 Emisné limity pre plynové turbíny o tepelnom príkone > 0,3 MW - < 50 MW	29
Tabuľka 11 Hustoty jednotlivých oxidov dusíka a vzduchu	31
Tabuľka 12 Porovnanie jednotlivých typov nízkoemisných horákov	44
Tabuľka 13 Orientačná doba životnosti katalyzátorov rozdelená na základe použitého paliva	58
Tabuľka 14 Porovnanie jednotlivých SCR technológií	62
Tabuľka 15 Prvkové zloženie paliva.....	66
Tabuľka 16 Požadované teploty	67
Tabuľka 17 Parametre použité pre výpočet parného ohrevu.....	67
Tabuľka 18 Výsledné hodnoty objemu a zloženia spalín	71
Tabuľka 19 Hodnoty mernej tepelnej kapacity pre základné zložky spalín.....	72
Tabuľka 20 Hustota jednotlivých zložiek spalín za normálnych podmienok	73
Tabuľka 21 Hodnoty hustoty a mernej tepelnej kapacity pre navrhnuté teploty spalín .	74
Tabuľka 22 Entalpie jednotlivých zložiek spalín	74
Tabuľka 23 Vypočítané hodnoty jednotlivých entalpií v programe Excel	75
Tabuľka 24 Tabuľka entalpie spalín pre rôzne teploty a prebytky vzduchu.....	76
Tabuľka 25 Charakteristiky rotoru regeneračného ohrievača spalín v závislosti na d_e ..	80
Tabuľka 26 Fyzikálne charakteristiky spalín stredného zloženia.....	82
Tabuľka 27 Fyzikálne charakteristiky spalín pre návrh výmenníku.....	82
Tabuľka 28 Výpočtové parametre spalín	83
Tabuľka 29 Súčiniteľ prestupu a prechodu tepla.....	84
Tabuľka 30 Varianty regeneračného výmenníku Ljungstroem	87
Tabuľka 31 Informatívne rozmery ohrievača Ljungstroem	88
Tabuľka 32 Množstvo tepla pre jednotlivé varianty	90
Tabuľka 33 Spotreba pary na dohrev spalín.....	90
Tabuľka 34 Tabuľka požadovaných parametrov	91
Tabuľka 35 Tabuľka molárnych hmotností.....	91
Tabuľka 36 Základné parametre katalyzátoru	97

Tabuľka 37 Parametre spalín pri menovitom výkone.....	97
Tabuľka 38 Investičné náklady SCR	98
Tabuľka 39 Základné parametre ohrevu	100
Tabuľka 40 Priemerné emisie NO _x na vstupe a výstupe	106

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Podiel palív na výrobe tepla brutto – 2018.....	16
Obrázok 2 Podiel palív a technológií na výrobe elektriny brutto – 2018	16
Obrázok 3 Hnedouhoľné panvy a ložiská hnedého uhlia a lignitu v Českej republike ..	17
Obrázok 4 Doly pre ťažbu čierneho uhlia na území Českej republiky	21
Obrázok 5 Prepravný systém plynu Transgas	22
Obrázok 6 Ložiská ropy v ČR	23
Obrázok 7 Schéma reakčnej dráhy ilustrujúca hlavné kroky rýchlej tvorby NO a konverzie palivového dusíka (FN) na NO.....	33
Obrázok 8 Vznik oxidov dusíka v závislosti na teplote.....	34
Obrázok 9 Vplyv zníženia prebytku vzduchu na tvorbu NO _x	39
Obrázok 10 Tvorba CO pri postupnom prívode vzduchu	40
Obrázok 11 Schéma recirkulácie spalín	42
Obrázok 12 Závislosť úrovni emisií na vybraných technikách znižovania NO _x	42
Obrázok 13 Typické riešenie nízkoemisného horáku	44
Obrázok 14 Metóda postupného prívodu paliva v bočnom pohľade na kotol	45
Obrázok 15 Miera denitrifikácie v závislosti na množstve sekundárneho paliva pri rôznych teplotách	46
Obrázok 16 Závislosť účinnosti SNCR na teplote spalín.....	48
Obrázok 17 Rôzne úrovne vstrekovania amoniaku do kotla.....	48
Obrázok 18 Princíp selektívnej katalytickej redukcie.....	50
Obrázok 19 Eley-Ridealov mechanizmus v SCR technológii.....	51
Obrázok 20 Znázornenie SCR reaktoru a jeho vrstiev pre SCR technológiu	53
Obrázok 21 Blokový katalyzátor v nízkej, strednej a vysokej konfigurácii hustoty kanálov	54
Obrázok 22 Zostavovanie doskového katalyzátora pre SCR (vľavo) a detail doskového katalyzátora pre SCR (vpravo)	54
Obrázok 23 Príklad plánu prevádzky katalyzátora	58
Obrázok 24 Konfigurácia High dust – usporiadania v existujúcom 2 ťahu kotla	60
Obrázok 25 Konfigurácia Low dust – usporiadanie za prachovým filtrom	61
Obrázok 26 Konfigurácia Tail end – usporiadanie za odisrením	62
Obrázok 27 Technologická schéma uvažovaného návrhu	64
Obrázok 28 Výmenník typu Ljungstroem.....	64
Obrázok 29 Schéma zapojenia SCR jednotky	67
Obrázok 30 Bilancia ohrievača spalín.....	77
Obrázok 31 Strata zdieľaním tepla do okolia	78
Obrázok 32 Schéma výplne pre regeneračný ohrievač spalín	79
Obrázok 33 Súčiniteľ rotoru Kr	80

Obrázok 34 Opravné koeficienty pre prepočet fyzikálnych charakteristík spalín stredného zloženia.....	81
Obrázok 35 Protiprudé zapojenie výmenníku	85
Obrázok 36 Informatívne rozmery ohrievača Ljungstroem	88
Obrázok 37 Bilancia parného dohrevu.....	89
Obrázok 38 Štruktúra katalyzátoru honeycomb (vľavo) a pohľad na odkryté telo reaktoru (vpravo)	99
Obrázok 39 Zostava reaktoru.....	101
Obrázok 40 Zostava reaktoru pohľad z opačnej strany.....	102
Obrázok 41 3D model zapojenia SCR jednotky.....	102

Zoznam grafov

Graf 1 Objemové zloženie spalín (vľavo $\alpha=1.4$; vpravo $\alpha=2.1$).....	71
Graf 2 Entalpie spalín v závislosti na teplote	76
Graf 3 Závislosť investičných nákladov na množstve spalín	98
Graf 4 Časový vývoj meraných hodnôt.....	105
Graf 5 Vývoj hodnôt v závislosti na rôznych dávkach amoniaku	106

Zoznam príloh

Príloha 1: Komplexná schéma zapojenia SCR technológie - tail end

Príloha 2: Dispozičné umiestnenie SCR technológie - tail end

Príloha 3: Dáta z experimentálneho merania - režim oxyfuel

Príloha 4: Dáta z experimentálneho merania - režim vzduchový