

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2018

**JAN
SLÁNSKÝ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Slánský** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **419948**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Primární opatření pro redukci NO_x při spalování ve fluidní vrstvě ve vzduchovém a oxyfuel režimu

Název diplomové práce anglicky:

Primary measures for NO_x reduction in a fluidized bed in air and oxyfuel combustion mode

Pokyny pro vypracování:

- 1) zpracování literární rešerše zaměřené na principy tvorby NO_x při spalování ve fluidní vrstvě pro vzduchový i oxyfuel režim spalování
- 2) popis primárních opatření redukce NO_x, jejich použitelnost pro spalování ve fluidní vrstvě
- 3) výpočet stechiometrie spalování paliva ve vzduchovém a oxyfuel režimu, diskuse odlišností, určení emisních faktorů
- 4) příprava a realizace experimentů na 30 kW laboratorní fluidní jednotce s cílem identifikace vlivu teploty, přebytku kyslíku a stupňového přívodu oxysličovadla ve vzduchovém a oxyfuel režimu na emise NO_x
- 5) zpracování výsledků a formulace závěrů

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D., ústav energetiky FS

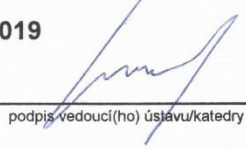
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.06.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**


doc. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

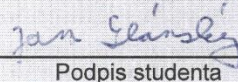

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.

- 2. -05- 2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce doc. Ing. Jana Hrdličky, Ph.D. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, dne

.....

Bc. Jan Slánský

Anotační list

- Jméno autora:** Jan Slánský
- Název DP:** Primární opatření pro redukci NO_x při spalování ve fluidní vrstvě ve vzduchovém a oxyfuel režimu
- Anglický název:** Primary measures for NO_x reduction in a fluidized bed in air and oxyfuel combustion mode
- Akademický rok:** 2017/2018
- Ústav:** Ústav energetiky
- Vedoucí DP:** doc. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.
- Konzultant:**
- Bibliografické údaje:** Počet stran: 61
Počet obrázků: 28
Počet tabulek: 25
Počet příloh: 6
- Klíčová slova:** redukce NO_x, primární opatření, oxyfuel spalování, spalování se vzduchem, fluidní vrstva
- Keyword:** NO_x reduction, primary measures, oxyfuel combustion, air combustion, fluidized bed
- Anotace:** Tato diplomová práce se zabývá porovnáním množství vznikajících oxidů dusíku při spalování ve vzduchovém a oxyfuel režimu v bublinkové fluidní vrstvě. Zároveň sleduje vliv primárních opatření na produkci NO_x. V úvodu práce je provedena rešerše denitrifikačních metod. Součástí práce je také výpočet stechiometrie spalin pro oba spalovací režimy. Následně je provedeno porovnání obou režimů z hlediska množství vzniklých NO_x.

Abstract:

This thesis deals with the comparison of the amount of nitrogen oxides produced in the air and oxyfuel combustion mode in the bubbling fluidized bed. It also monitors the impact of primary measures on NO_x production. Description of the denitrification methods is performed at the beginning of the thesis. Part of the thesis is also the calculation stoichiometry of flue gases for both combustion modes. Subsequently, the two modes are compared in terms of the amount of NO_x produced.

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Janu Hrdličkovi, Ph.D. za odborné konzultace a rady v průběhu zpracování této diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Matěji Vodičkovi za spolupráci při získávání údajů pro experimentální část této práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ, INDEXŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD	12
1 OXIDY DUSÍKU	13
1.1 Rozdělení	13
1.2 Vznik oxidů dusíku	13
1.2.1 Termické NO _x	14
1.2.2 Palivové NO _x	15
1.2.3 Promptní NO _x	15
1.3 Vliv NO _x na životní prostředí.....	15
1.4 Emisní limity.....	16
2 METODY SNIŽOVÁNÍ KONCENTRACÍ NO _x	17
2.1 Primární metody.....	17
2.1.1 Vícestupňové spalování.....	18
2.1.2 Recirkulace spalin.....	20
2.1.3 Nízký přebytek okysličovadla	21
2.1.4 Omezený ohřev vzduchu	21
2.1.5 Nízkoemisní hořáky	21
2.2 Sekundární metody	21
2.2.1 Selektivní katalytická redukce	22
2.2.2 Selektivní nekatalytická redukce	23
3 FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ	25
4 OXYFUEL SPALOVÁNÍ	28
4.1 Technologie CCS	28
4.2 Spalování s čistým kyslíkem.....	28
5 VÝPOČTOVÁ ČÁST	30
5.1 Složení paliva	30
5.2 Přepočet stavů paliva	31
5.3 Stechiometrie pro spalování se vzduchem.....	31
5.4 Stechiometrie pro oxyfuel spalování.....	33

5.5	Emisní faktor.....	35
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	36
6.1	Popis zařízení.....	36
6.2	Popis experimentu.....	37
6.3	Závislost produkce NO _x na teplotě.....	38
6.3.1	Oxyfuel spalování.....	38
6.3.2	Spalování se vzduchem.....	39
6.4	Závislost produkce NO _x na koncentraci kyslíku ve spalinách.....	41
6.4.1	Oxyfuel spalování.....	41
6.4.2	Spalování se vzduchem.....	42
6.5	Závislost produkce NO _x na stupňovém přívodu okysličovadla.....	43
6.5.1	Oxyfuel spalování.....	43
6.5.2	Spalování se vzduchem.....	46
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	50
	ZÁVĚR.....	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	59
	SEZNAM TABULEK.....	60
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

Seznam symbolů, indexů a zkratek

obsah hořlaviny	h [-]
obsah popele	A [-]
obsah vody	W [-]
obsah uhlíku	C [-]
obsah dusíku	N [-]
obsah kyslíku	O [-]
obsah síry	S [-]
obsah vodíku	H [-]
výhřevnost	Q_i^r [MJ/kg]
spalné teplo	Q_S^{daf} [MJ/kg]
minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva	$V_{O_{2min}}$ [Nm ³ /kg]
min. objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva	$V_{VS_{min}}$ [Nm ³ /kg]
min. objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva	$V_{VV_{min}}$ [Nm ³ /kg]
součinitel podílu vodní páry připadající na 1 Nm ³ suchého vzduchu χ_v	χ_v [-]
objem vodní páry	$V_{H_2O}^V$ [Nm ³ /kg]
součinitel přebytku okysličovadla	α [-]
objemy jednotlivých složek spalin	V_i [Nm ³ /kg]
objem suchých spalin	$V_{SS_{min}}$ [Nm ³ /kg]
objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin	$V_{H_2O}^S$ [Nm ³ /kg]
minimální objem vlhkých spalin	$V_{SV_{min}}$ [Nm ³ /kg]
objem spalin z 1 kg paliva s přebytkem vzduchu α	V_{sv} [Nm ³ /kg]
absolutní teplota	T [K]
doba styku	t [s]
mimovrstvová rychlost	v [m/s]
objemový průtok	V [m ³ /s]

průřez	S [m ²]
hmotnostní koncentrace	ρ [g/m ³]
molární hmotnost	M [g/mol]
molární plynová konstanta	R [J/K·mol]
normální tlak	p_N [kPa]
normální teplota	T_N [K]
koncentrace NO _x	ϕ [-]
emisní faktor	ε [g/MJ]
referenční hodnota kyslíku	O_{2ref} [%]
měřená koncentrace kyslíku ve spalinách	$O_{2měř}$ [%]
měřená teplota	$t_{měř}$ [°C]
kontinuální tok paliva dopravníkem	\dot{m}_{kont} [kg/min]
tok paliva do kotle	\dot{m}_{pal} [kg/h]
doba chodu dopravníku	t_{chod} [s]
doba prodlevy dopravníku	t_{prodl} [s]
průtok primárního okysličovadla	\dot{V}_{prim} [Nm ³ /h]
průtok sekundárního okysličovadla	\dot{V}_{sek} [Nm ³ /h]
objem primárního kyslíku	V_{O2in}^{prim} [Nm ³ /kg]
objem sekundárního kyslíku	V_{O2in}^{sek} [Nm ³ /kg]
celkový objem kyslíku	V_{O2in}^{celk} [Nm ³ /kg]
objem primárního vzduchu	V_{VV}^{prim} [Nm ³ /kg]
objem sekundárního vzduchu	V_{VV}^{sek} [Nm ³ /kg]
celkový objem vlhkého vzduchu	V_{VV}^{celk} [Nm ³ /kg]
součinitel přebytku po přivedení primárního okysličovadla	α_{prim} [-]
výška	l [mm]

Horní index

suchý stav

d

stav bez vody a popela

daf

původní stav

r

Úvod

Z důvodu stále se zpřísňujících emisních limitů je nutné hledat způsoby snižování produkovaných škodlivin, aby byly dané limity plněny. Tato práce posuzuje vliv primárních denitrifikačních opatření a druhu použitého okysličovadla na produkci emisí oxidů dusíku, mezi které patří oxid dusnatý, dusičitý a dusný. Kromě oxidu dusného, který je považován za skleníkový plyn, se jedná o toxické plyny, které negativně ovlivňují životní prostředí.

Oxidy dusíku vznikají třemi různými mechanismy. Jedná se o termické NO_x , které vznikají při vysokých teplotách z dusíku obsaženého ve vzduchu. Dále to jsou palivové NO_x , které vznikají z dusíku vázaného v palivu a promptní.

Opatření, pro snižování množství NO_x ve spalinách, jsou rozdělena do dvou základních skupin. Jedná se o primární a sekundární metody. Primární metody se vyznačují malými investičními náklady, jelikož se jedná jen o úpravu stávajícího procesu spalování. Patří mezi ně zejména stupňový přívod okysličovadla a paliva, recirkulace spalin a snížení přebytku okysličovadla. Tyto metody fungují na principu snížení teploty ve spalovací komoře a zmenšení přebytku okysličovadla v zóně hoření. Tato opatření vedou ke snížení termických NO_x . Na rozdíl od primárních opatření redukuje sekundární metody NO_x již vzniklé, obsažené ve spalinách. Je zde třeba instalace nového zařízení, které je investičně nákladné. Dále byl předmětem experimentálních měření vliv spalování s čistým kyslíkem (oxyfuel spalování) na produkci NO_x . Jedná se primárně o metodu zachycování CO_2 ze spalin, kdy je náhradou vzduchu za kyslík odstraněn vzdušný dusík a spaliny jsou tak složeny převážně z CO_2 a vodní páry, což umožňuje snazší separaci CO_2 . CO_2 musí být před dalším využitím zbaven ostatních znečišťujících látek, mimo jiné i zbývajících oxidů dusíku.

Cílem této práce je v první části provedení rešerše mechanismů vzniku NO_x a primárních a sekundárních opatření k redukcí NO_x . Pro konečné porovnání primárních opatření, kterými jsou stupňový přívod okysličovadla, snížení koncentrace kyslíku ve spalinách a teplot při spalování se vzduchem a při oxyfuel spalování, jsou pomocí stechiometrie určeny objemy spalin a následně emisní faktory. Závěrem je provedeno grafické porovnání obou druhů spalování a diskuze výsledků.

1 Oxidy dusíku

1.1 Rozdělení

Dusík je bezbarvý nehořlavý plyn, bez zápachu a chuti. Tvoří dvouatomové molekuly. V molekule je dusík vázán trojnou kovalentní vazbou. Dvouatomový molekulární dusík N_2 , který je ze 78 % obsažen ve vzduchu je inertní, tj. nepodléhá chemickým reakcím. Avšak atomární dusík je velice reaktivní, protože má ve valenční vrstvě tři volné elektrony. Stabilitu se docílí tím, že dusík přijme tři elektrony nebo odevzdá až pět elektronů. [1]

Oxidy dusíku se souhrnně označují jako NO_x , při výpočtu koncentrace se používá NO_2 . Při spalování ve stacionárních zařízeních vzniká především oxid dusnatý NO . Uvádí se, že až 90-99 % z celkového množství oxidů dusíku tvoří právě oxid dusnatý. Dále oxid dusičitý NO_2 , který se na celkovém množství produkovaných NO_x podílí 1-10 % při spalování kapalných paliv a 1-5 % při spalování paliv tuhých. V malém množství se produkuje také oxid dusný N_2O , který vzniká především při nízkoteplotním spalování. Poslední jmenovaný není však brán jako znečišťující látka. Mezi oxidy dusíku se dále řadí také oxid dusitý N_2O_3 a oxid dusičný N_2O_5 . [4] [5]

Oxid dusnatý NO je bezbarvý plyn, který se v přítomnosti kyslíku dále oxiduje na oxid dusičitý NO_2 . Rychlost této oxidace závisí na koncentraci NO .

Oxid dusičitý NO_2 má v plynném stavu červenohnědou barvu, v kapalném stavu je žlutohnědý. Jedná se o velice toxický plyn. S vodní parou tvoří kyselinu dusičnou a kyselinu dusitou, které jsou obsaženy v kyselých deštích. Spolu s uhlíkovými radikály a slunečním svitem se podílí na fotochemickém smogu.

Oxid dusný N_2O je za normálních podmínek bezbarvý plyn s nasládlou vůní. Bývá také nazýván jako „rajský plyn“. Je využíván v medicíně, protože má anestetické účinky. Vzniká rovněž při spalování, ovšem v menším množství než předem jmenované oxidy. Dopad na životní prostředí nespočívá v jeho toxicitě, ale patří mezi tzv. skleníkové plyny, které pohlcují infračervené záření a způsobují globální oteplování zeměkoule. [2] [6]

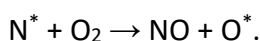
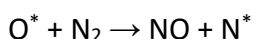
1.2 Vznik oxidů dusíku

Při spalování existují teoreticky tři základní mechanismy vzniku oxidů dusíku:

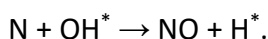
- termické NO_x
- palivové NO_x
- promptní (okamžité) NO_x.

1.2.1 Termické NO_x

Termické oxidy dusíku vznikají oxidací dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu za vysoké teploty nad 1 100 °C. Jejich množství roste s rostoucí teplotou exponenciálně. Tvoří se radikálovými reakcemi, které závisí na spalovacím prostředí. Při spalování uhlí a při přebytku kyslíku reakce probíhá takto:



A při přebytku paliva vypadá reakce následovně:

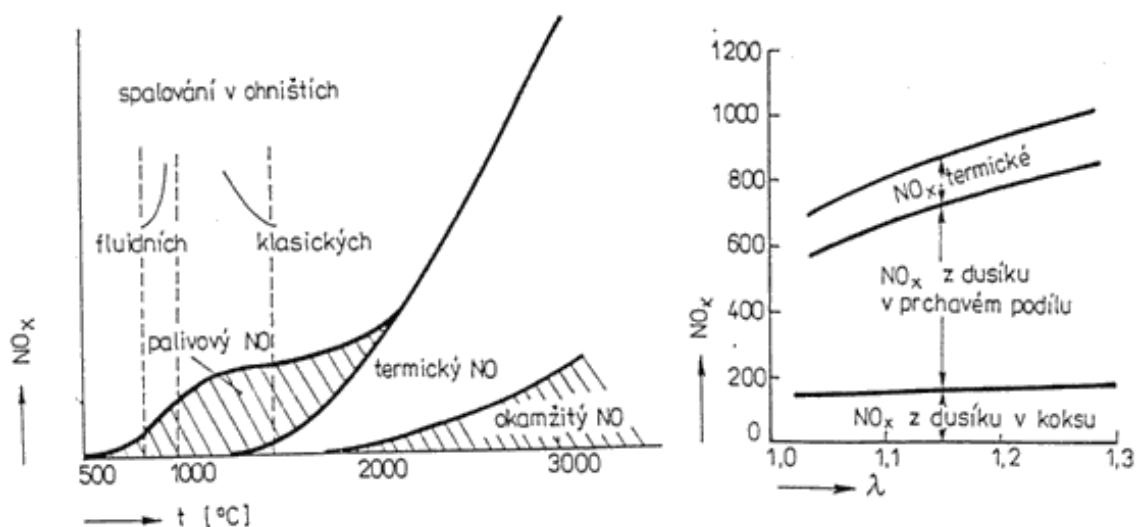


Tvorbu termických NO_x popisuje Zeldovičův vztah:

$$[NO] = k_1 \cdot e^{-\frac{k_2}{T}} \cdot [N_2] \cdot [O_2]^{0,5} \cdot t, \quad (1.1)$$

kde k_1 a k_2 jsou konstanty, T [K] je absolutní teplota a t [s] je doba zdržení.

Z předešlého vztahu vyplývá, že množství produkovaných termických NO_x závisí exponenciálně na absolutní teplotě, koncentraci dusíku, době zdržení a na odmocnině koncentrace kyslíku. U fluidního spalování je jejich produkce zredukována z důvodu nízké teploty spalování. [5]



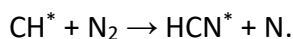
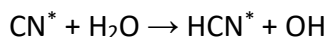
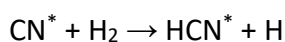
Obr. 1: Vliv teploty a součinitele spalovacího vzduchu na tvorbu NO_x [6]

1.2.2 Palivové NO_x

Palivové oxidy dusíku vznikají oxidací dusíku, který je chemicky vázán v palivu. Mechanismus vzniku je takový, že z původních sloučenin obsahujících dusík v palivu vzniknou relativně jednoduché sloučeniny dusíku ze skupin amidů nebo kyanidů. Ty dále reagují s kyslíkem za vzniku NO nebo s látkami obsahujícími N za vzniku N₂. Ne všichni dusík obsažený v palivu se přemění ve spalinách na NO. Pro vyjádření míry přeměny se používá konverzní poměr, což je podíl dusíku přeměněného na NO a celkového množství dusíku v palivu. S rostoucím obsahem dusíku v palivu klesá konverzní poměr. Významné jsou zejména u topných olejů a biomasy, která je ve vyšší míře hnojena. U zemního plynu jsou palivové NO_x prakticky nulové. V oxyfuel režimu je snížena konverze N na NO. [5]

1.2.3 Promptní NO_x

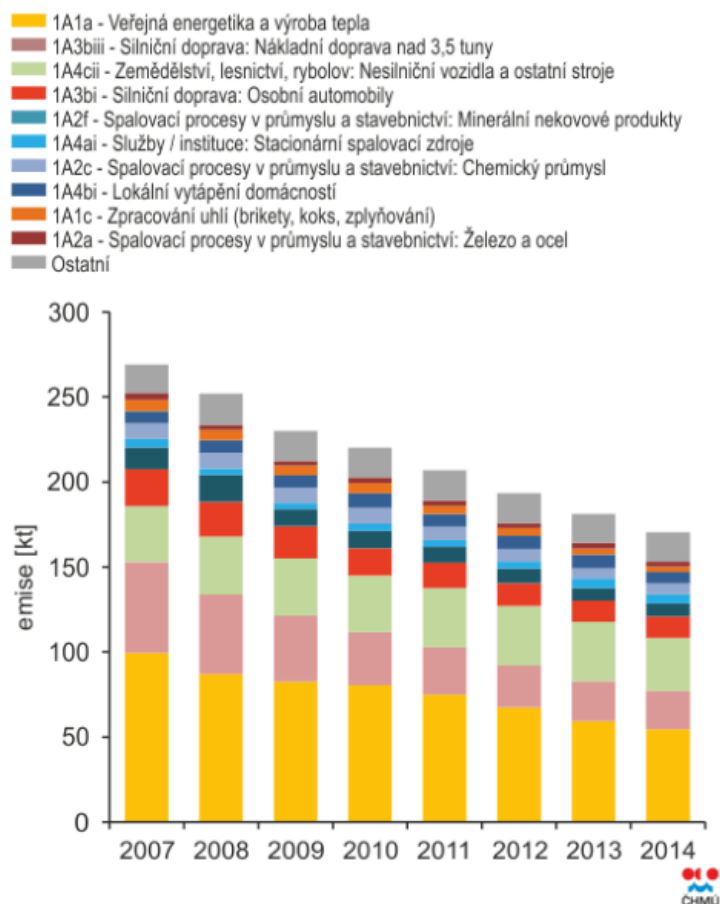
Jedná se o specifický druh palivových oxidů dusíku. Tvoří se reakcemi molekul dusíku za přítomnosti uhlovodíků na okraji plamene. Mechanismus přeměny probíhá takto:



Následná přeměna HCN na NO závisí na teplotě a stechiometrii spalování. Jejich podíl z celkového množství NO_x je zanedbatelný. [5]

1.3 Vliv NO_x na životní prostředí

Dusík je nezbytný pro růst rostlin, avšak oxidy dusíku, zejména NO a NO₂, ve větších koncentracích rostliny poškozují a způsobují větší náchylnost k vnějším vlivům. Oxid dusičitý reagující s vodní parou je součástí tzv. kyselých dešťů a přispívá také ke vzniku přízemního ozonu. Oxid dusnatý reaguje s ozónem a tím zeslabuje ozónovou vrstvu. Následující obrázek znázorňuje roční produkované množství NO_x v České republice v jednotlivých sektorech. [2]



Obr. 2: Vývoj celkových emisí NO_x v letech 2007-2014 v ČR [7]

1.4 Emisní limity

Emisní limity v ČR se řídí dle vyhlášky 452/2017 Sb., která zpracovává příslušné předpisy Evropské unie. Jedná se o novelu vyhlášky 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Stanovuje intervaly, způsob a podmínky zjišťování úrovně znečišťování, dále obecné a specifické emisní limity, způsob výpočtu emisních stropů atd. [8]

Pojem emisní limit je definován v zákoně 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů, jako „nejvýše přípustné množství znečišťující látky nebo skupiny znečišťujících látek vnášené do ovzduší ze stacionárního zdroje“. Emisní limity se dělí na obecné a specifické. Obecné emisní limity jsou stanovovány pro určité znečišťující látky nebo skupiny látek. Specifické emisní limity jsou dány pro jednotlivé typy stacionárních zdrojů. Obecný emisní limit pro oxidy dusíku je stanoven na hodnotě 500 mg/m³. Specifické emisní limity, které definuje vyhláška 452/2017 Sb., jsou vztaženy k

celkovému jmenovitému tepelnému příkonu, pro suchý plyn a normální stavové podmínky. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 1 a 2. [8] [9]

Tab. 1: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje platné do 19. 12. 2018 [8]

Druh paliva	Specifické emisní limity pro NO _x [mg/m ³]					
	uvedení do provozu do 1. 9. 2014			uvedení do provozu po 1. 9. 2014		
	0,3-1 MW	1-5 MW	5-50 MW	0,3-1 MW	1-5 MW	5-50 MW
Pevná paliva	650	650	650 500 ¹⁾	600	500	500
Kapalná paliva	500	500	450	200	200	200
Plynná paliva	200	200	200	100	100	100

1) pro fluidní spalování

Tab. 2: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje platné od 20. 12. 2018 do 31. 12. 2024 [8]

Druh paliva	Specifické emisní limity pro NO _x [mg/m ³]					
	uvedení do provozu do 20. 12. 2018			uvedení do provozu po 20. 12. 2018		
	0,3-1 MW	1-5 MW	5-50 MW	0,3-1 MW	1-5 MW	5-50 MW
Pevná paliva	600	500	500	600	500	300
Kapalná paliva	200	200	200	200	200	200
Plynná paliva	100	100	100	100	100	100

2 Metody snižování koncentrací NO_x

Způsobů snižování koncentrace NO_x ve spalinách je velké množství. Lze je však rozdělit na dvě základní skupiny. Jsou jimi primární a sekundární denitrifikační metody. Primární metody fungují na principu úpravy podmínek vedení spalovacího procesu a sekundární na redukci již vzniklých NO_x ve spalinách.

2.1 Primární metody

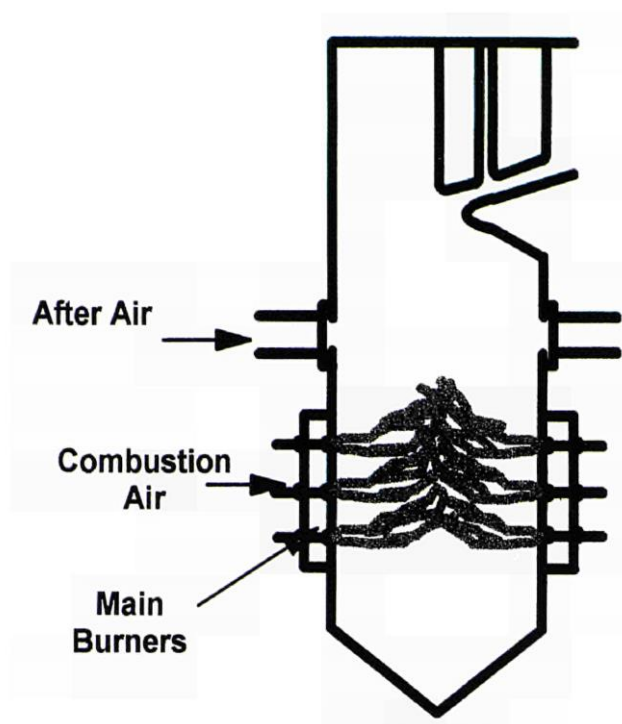
Tvorbu NO_x lze ovlivnit zejména snížením koncentrace spalovacího vzduchu nebo jiného okysličovadla v zóně hoření a dále také snížením spalovací teploty a zkrácením doby pobytu reagujících látek v oblastech příznivých pro vznik NO_x. Těmito metodami se snižuje zejména produkce termických NO_x. Primární metody lze použít i u existujících kotlů s relativně nízkými náklady. Nežádoucími vlivy snižování NO_x jsou zhoršení stability

hoření, zvýšení teploty spalin, zvýšení mechanického i chemického nedopalu, struskování stěn ohniště a koroze v ohništi. [13]

2.1.1 Vícestupňové spalování

Existují dva způsoby vícestupňového spalování. Jedná se o stupňovitý přívod okysličovadla a stupňovitý přívod paliva.

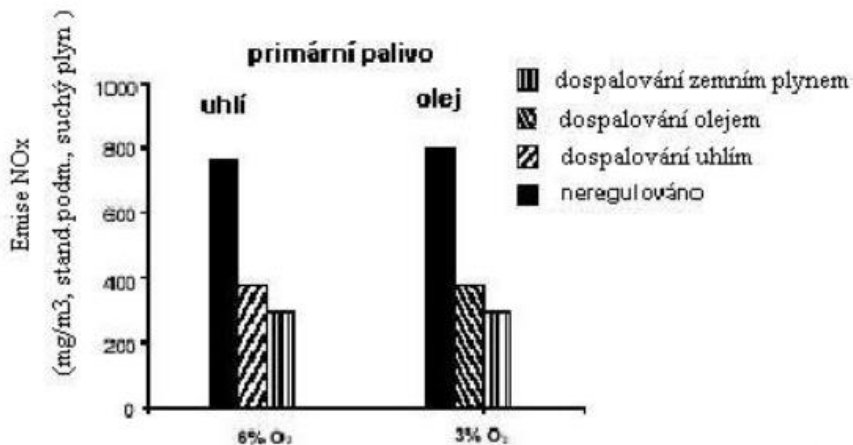
Stupňovitý přívod okysličovadla funguje na principu dávkování ve dvou fázích. V první primární fázi je přivedeno podstechiometrické množství okysličovadla spolu s palivem. Spalování tudíž probíhá při nižší teplotě. Při těchto podmínkách dochází ke vzniku CO, který reaguje s NO a vzniká N_2 . Ve druhé sekundární fázi jsou produkty nedokonalého spalování a zbytek paliva spáleny s přebytkem přivedeného okysličovadla. Zvyšuje se ztráta mechanickým nedopalem. Účinnost snížení NO_x je 20-50 %. Pro tuto metodu se používají speciální typy hořáků. Lze je použít i ve stávajících technologiích. [13] [14]



Obr. 3: Schéma stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu [15]

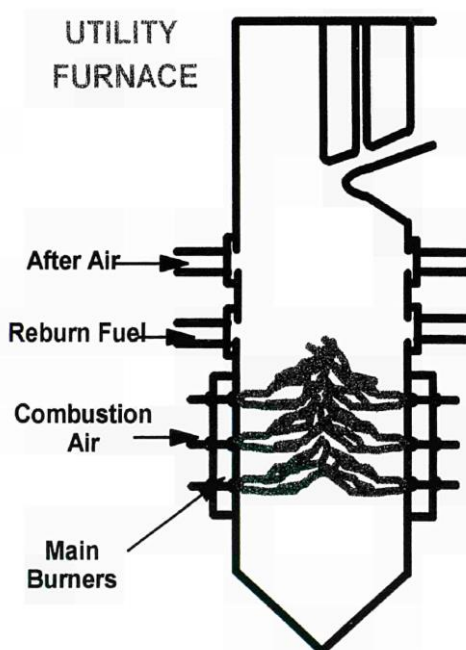
Metoda postupného přívodu paliva nazývaná také jako „reburning“ funguje na podobném principu jako předchozí metoda. Spalování lze rozdělit do tří zón. V primární zóně shoří 80-85 % paliva v oxidační nebo slabě redukční atmosféře. V horní oblasti ohniště je přivedeno další tzv. sekundární palivo. Jedná se o vstřikování

dodatečného uhlovodíkového paliva nad zónu hoření. Často se jedná o stejné palivo použité při primárním spalování. Na obr. 4 jsou porovnána jednotlivá paliva z hlediska vlivu na tvorbu NO_x pro dospalování. [15]



Obr. 4: Porovnání paliv pro dospalování [13]

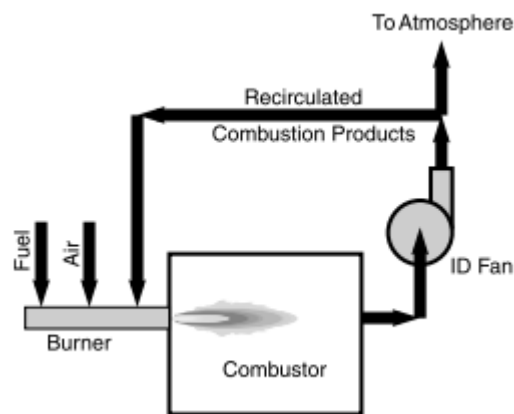
Uhlovodíkové radikály reagují s NO obsaženým ve spalinách a vzniká HCN a dále N₂ a CO₂. Ve třetí zóně se spalování dokončí přivedením konečného dospalovacího oksylichovadla. Výhody této metody jsou zejména účinnost přesahující 70 %, nižší náklady oproti sekundárním metodám. Metoda byla poprvé použita v 80. letech 20. století firmou Babcock & Wilcox a dosažená účinnost se pohybovala kolem 50 %. [15]



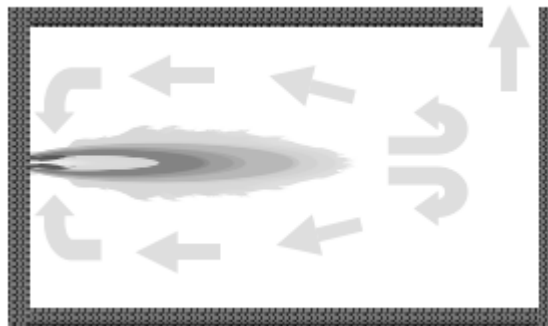
Obr. 5: Schéma postupného přívodu paliva [15]

2.1.2 Recirkulace spalin

Recirkulace spalin je vysoce efektivní a relativně levná metoda pro snížení emisí NO_x . Metoda funguje na principu snížení teploty spalování a obsahu kyslíku ve spalovacím médiu přivedením relativně chladných a inertních spalin vzniklých při spalování. Nejúčinnější se zdá být přivedení spalin přímo do přiváděného okysličovadla. Pro správnou funkci musí být spaliny dostatečně vychlazené a s minimálním obsahem kyslíku. Jedná se o vhodnou metodu pro vysokoteplotní spalovací systémy jako jsou např. výtavné kotle. Může však nastat nestabilita hoření. Existují dva typy recirkulace spalin, vnější a vnitřní. Při vnější recirkulaci spalin se část spalin o teplotě 350-400 °C vrací zpět do spalovacího prostoru. Spaliny se mohou mísit přímo s primárním okysličovadlem nebo s postupně dávkovaným okysličovadlem. Při vnitřní recirkulaci dochází k částečné recirkulaci přímo v ohništi. I když je teplota spalin stále vysoká jsou přece jenom chladnější než teplota plamene. [13] [16]



Obr. 6: Schéma vnější recirkulace spalin [16]



Obr. 7: Schéma vnitřní recirkulace spalin [16]

2.1.3 Nízký přebytek okysličovadla

Jedná se o relativně jednoduché a levné řešení. Dochází ke snížení množství kyslíku ve spalovací komoře na minimální hodnotu potřebnou pro dokonalé spálení paliva. Metoda se může použít i na stávající zařízení a není potřeba žádné přídavné energie. Lze však dosáhnout jen částečného snížení emisí NO_x . Vlivem snížení obsahu kyslíku může docházet k nedokonalému spalování a ke zvyšování obsahu nespáleného uhlíku v popelu. Výsledkem může být snížení účinnosti kotle, škvárování a koroze. [13]

2.1.4 Omezený ohřev vzduchu

Teplota spalovacího vzduchu má vliv na tvorbu zejména termických NO_x u systémů spalujících plyn nebo olej. Vyšší teplota ohřátého vzduchu má za následek vyšší teplotu plamene a špičkové teploty v primární zóně spalování. Snížení teploty ohřátého vzduchu vede ke snížení tvorby NO_x . Tato metoda nelze použít u spalování uhlí v roštových a výtavných ohništích, kde jsou potřeba vysoké teploty pro spalování. Další nevýhodou je zvýšení spotřeby paliva a snížení využití tepla ve spalinách. [13]

2.1.5 Nízkoemisní hořáky

Tuto metodu nelze pochopitelně využít pro fluidní zařízení. Je zde uvedena pro dotvoření výčtu primárních opatření. V klasických hořácích se přivádí palivo s okysličovadlem ze stejného místa. Výsledný plamen se skládá z oxidační zóny a okrajové chladnější sekundární zóny. V primární zóně dochází za vysoké teploty ke vzniku NO_x . Nízkoemisní hořáky upravují přívod okysličovadla s palivem, aby pozdržely směšování, snížily koncentraci kyslíku a snížily teplotu plamene. Nízkoemisní hořáky fungují na principu odstupňovaného přívodu okysličovadla, recirkulace spalin a na principu dávkování paliva. Nové typy hořáků spojují postupný přívod okysličovadla s recirkulací spalin. Nevýhodou prvních typů hořáků je potřeba dodatečného prostoru, pro rozdělení plamene, protože plamen nízkoemisního hořáku je o 30-50 % větší než u klasických hořáků. Tento problém byl vyřešen kombinací rozdělení plamene a dávkováním 30-40 % vzduchu injektáží přímo do každého základního plamene. [13] [14]

2.2 Sekundární metody

Tyto metody slouží k odstranění již vytvořených oxidů dusíku. Většinou se používají v kooperaci s primárními metodami. Většina těchto technologií je založena na přidávání

čpavku, močoviny nebo dalších sloučenin, které reagují s NO_x za vzniku molekulárního dusíku.

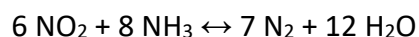
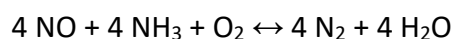
Sekundární metody se dělí na:

- selektivní katalytickou redukcí (SCR)
- selektivní nekatalytickou redukcí (SNCR).

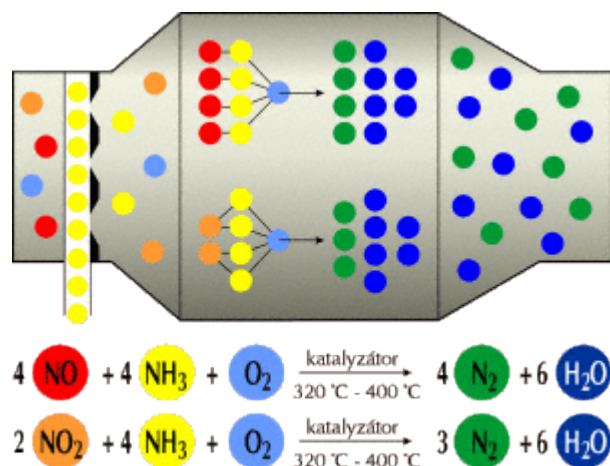
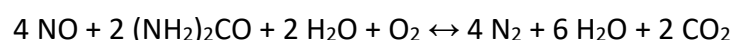
2.2.1 Selektivní katalytická redukce

Selektivní katalytická redukce je hojně používaná pro redukcí NO_x z velkých stacionárních zdrojů. Je založena na redukcí oxidů dusíku čpavkem nebo močovinou za přítomnosti katalyzátoru. Díky katalyzátoru probíhají reakce při teplotách 300-400 °C. Redukční činidlo je vstřikováno do spalin před katalyzátorem. Na povrchu katalyzátoru dochází k redukcí podle uvedených reakcí:

1) reakce NO_x se čpavkem



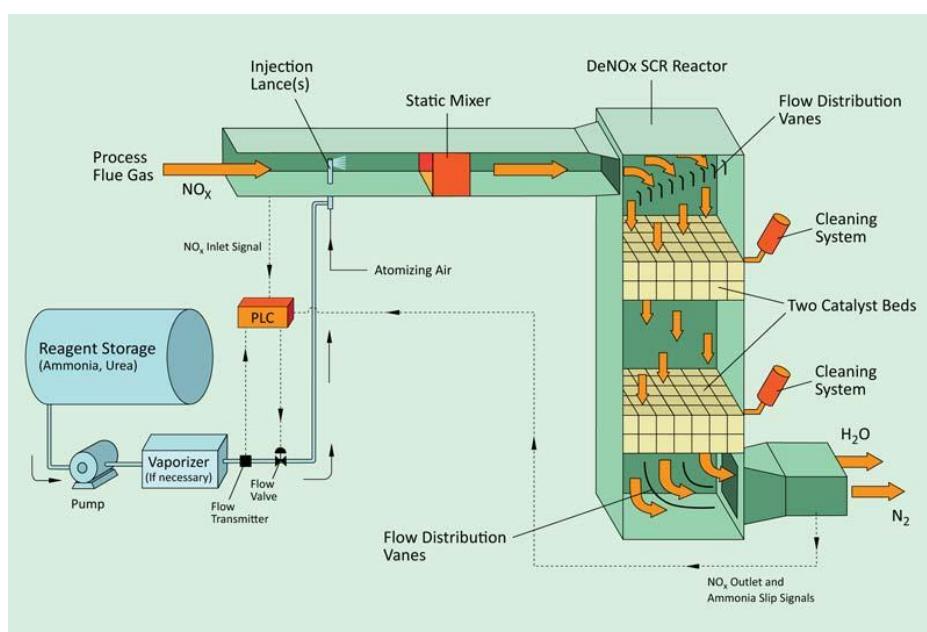
2) reakce NO_x s močovinou



Obr. 8: Princip selektivní katalytické redukce [19]

Katalyzátory jsou vyráběny z oxidů vanadu, molybdenu a wolframu nebo z jejich kombinace. Dále se používají zeolity, což jsou krystalické porézní přírodní nebo syntetické aluminosilikáty, oxidy železa a aktivní uhlí, které obsahuje práškové černé uhlí nebo hnědé uhlí s inertními prvky zpracované do pelet. Použití aktivního uhlí je možné

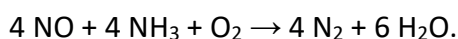
v elektrárnách pouze v koncové části systému. Katalyzátory se vyrábějí s různými průměry kanálků. Jejich průměr se volí podle obsahu tuhých částic ve spalinách podle dovolené tlakové ztráty. Objem potřebného katalyzátoru závisí na objemu spalin, na potřebném snížení NO_x, na složení plynu a teplotě spalin. Katalyzátory mají deskovou strukturu nebo mají podobu „medových pláství“. Životnost se pohybuje okolo 6-12 let. Účinnost SCR je 80-90 %. Další výhodou je možnost použití pro širokou škálu paliv a při přeměně NO_x nevznikají žádné další znečišťující látky. Nevýhodou jsou vysoké investiční náklady a možný únik čpavku. K tomu dochází následkem neúplné reakce čpavku a NO_x, kdy se spalinami odchází i malé množství čpavku. Tento jev se nazývá čpavkový skluz. [13] [18]



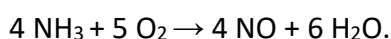
Obr. 9: Schéma SCR [20]

2.2.2 Selektivní nekatalytická redukce

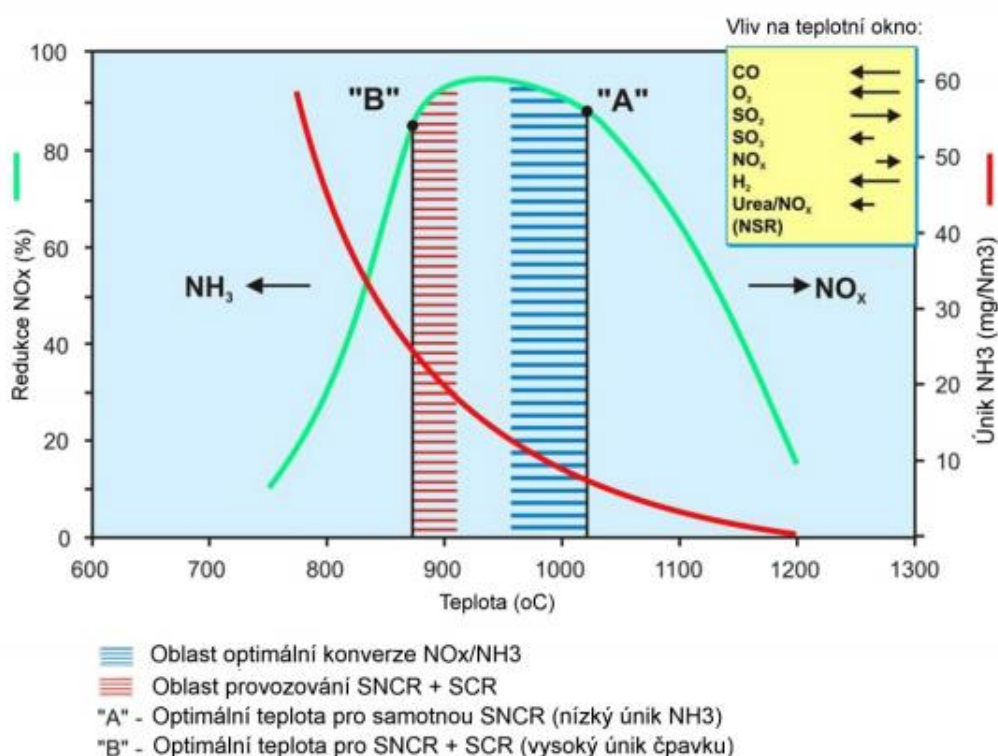
Jedná se o další metodu odstraňování již vytvořených oxidů dusíku ze spalin. Reakce probíhá bez přítomnosti katalyzátoru v rozmezí teplot 850-1100 °C. Jako reakční činidlo se využívá čpavek nebo močovina, které se vstříkují do spalin. Reakce probíhá následovně:



Je nutné dodržet uvedené rozmezí teplot. Při nízkých teplotách je reakční rychlost nízká. To má za následek zvýšení koncentrace čpavku ve spalinách tzv. čpavkový skluz. Při překročení daných teplot dojde k nežádoucí oxidaci čpavku na NO:



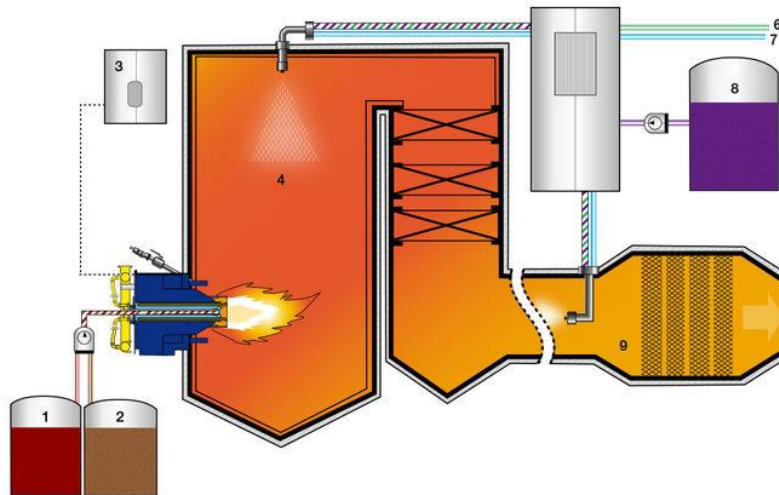
Aby bylo dosaženo vysokého podílu redukce NO_x a nízkého úniku čpavku, je potřeba dobře promísit reakční činidlo se spalinami. Důležitá je také velikost kapek vstřikovaného redukčního činidla. Příliš malé kapky by se odpařovaly rychle a reagovaly by za vysokých teplot. Proti tomu příliš velké kapky by se odpařovaly pomalu a reagovaly by za nízkých teplot. Redukční činidlo se může dopravovat stlačeným vzduchem, párou nebo vodou. Jak již bylo uvedeno, závisí účinnost redukce NO_x zejména na teplotě, závislost je znázorněna na obr. 10. Dále na době zdržení na dané teplotě a na poměru mezi čpavkem a NO_x . Účinnost této metody je 40-60 %. Pro její dosažení je také nutné optimalizovat polohu vstřikovacích trysek. [13] [18] [21]



Obr. 10: Vliv teploty na redukci NO_x [21]

Technologie SNCR se skládá z několika provozních jednotek. Jedná se o zásobník redukčního činidla. Pokud je umístěn ve venkovním prostředí, je nutné vyhřívání. Dále je to samotná redukční jednotka, která se skládá ze směšovacího, rozdělovacího zařízení a vstřikovacího systému. [21]

V některých případech se používá kombinace selektivní katalytické a selektivní nekatalytické redukce. Výhodou je, že čpavkový skluz, který vzniká při nekatalytické redukci, je následně využit v katalyzátoru k další redukci NO_x . Snižuje se čpavkový skluz, zároveň se zvyšuje redukce NO_x a snižují se nároky na objem katalyzátoru. [22]



Obr. 11: Schéma kombinace SCR a SNCR [22]

3 Fluidní spalování

Fluidace je děj, při kterém médium, může jím být vzduch, spaliny nebo jiný plyn, proudící proti směru zemské tíže, vytváří spolu s částicemi suspenzi. Vrstva této suspenze se nazývá fluidní vrstva. Chování fluidní vrstvy ovlivňuje mimovrstvová rychlost proudícího média. Je dána vztahem:

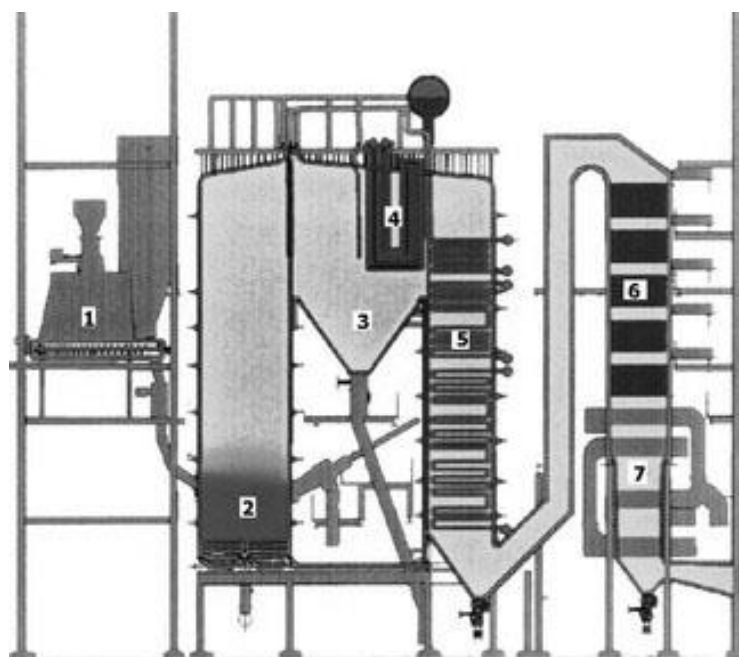
$$v = \frac{V}{S} [m/s], \quad (3.1)$$

kde V je objemový průtok tekutiny a S je průřez fluidačního reaktoru. Skutečná rychlost tekutiny ve vrstvě se nazývá mezerová rychlost, která je dána podílem mimovrstvové rychlosti v a mezerovitosti ϵ . Mezerovitost je definována jako podíl objemu tekutiny ve vrstvě a celkového objemu vrstvy. [26]

Při spalování paliva, jehož hmota není schopná vytvořit stabilní fluidní vrstvu, je nutné jí vytvořit z inertního materiálu, kterým může být popel nebo písek. Na počátku přívodu fluidizačního média přes distributor je nejdříve materiál v klidu až do doby dosažení určité rychlosti, která se nazývá prahová rychlost fluidace. Dochází k vyrovnání odporových a gravitačních sil a materiál se dostává do vznosu. Vytvoří se směs fluidizačního média a paliva, která má vlastnosti obdobné kapalinám. Při dalším zvyšování rychlosti se výška a mezerovitost fluidní vrstvy zvětšuje, až dojde k dosažení prahové rychlosti úletu. Přiváděné médium začíná unášet částice z fluidní vrstvy. Tato oblast odpovídá spalování v práškových kotlích. Při fluidním spalování dochází k intenzifikaci

přenosu tepla a hmoty a v průběhu hoření je směs lépe provzdušněna a promíchána. Fluidní kotle dosahují vysokých účinností z důvodu rovnoměrného vyhoření paliva v celém objemu. [23] [24]

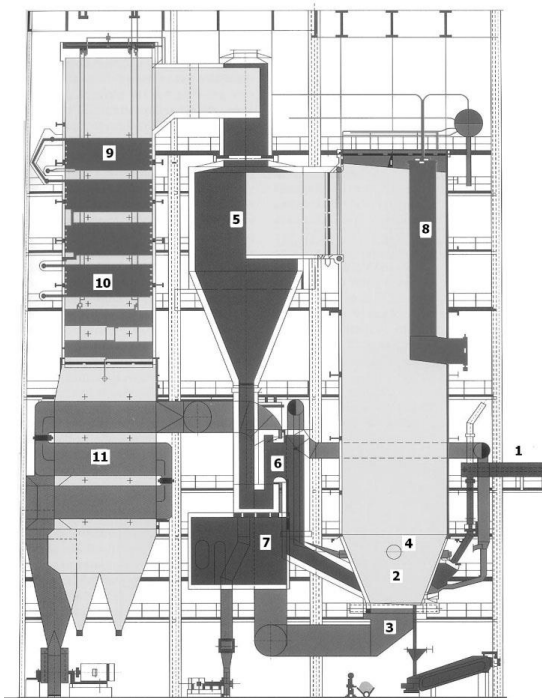
Fluidní spalování se dělí zejména na dva základní typy. Fluidní spalování s bublinkovou fluidní vrstvou se využívá pro nižší tepelné výkony, zhruba do 50 MW. Mimovrstvová rychlost fluidace je nižší, stejně prahová rychlost úletu částic, a fluidní vrstva má jasně patrné ohraničení. Přiváděný vzduch se dělí na primární a sekundární. Primární vzduch je přiváděn přes distributor a tvoří fluidní vrstvu. Vrstva může být tvořena také jinými inertními plyny. Spaliny spolu s tuhými částicemi procházejí dohořivací komorou, kam je přiváděn sekundární vzduch. Poté dochází k odloučení zbytkových částic v cyklónu a následně jsou spaliny vedeny na výhřevné plochy. [23] [27]



Obr. 12: Kotel se stacionární fluidní vrstvou
1 – zásobník paliva, 2 – fluidní vrstva, 3 – obratová komora,
4 a 5 – přehřívák, 6 – ekonomizér, 7 – LUVO [27]

Naopak při spalování s cirkulující fluidní vrstvou není hranice fluidní vrstvy patrná. Rychlost proudícího média je vysoká a fluidní vrstva vyplňuje celou komoru. Část fluidní vrstvy se dostane do cyklónu, kde se odloučí tuhé částice, které se vrací zpět do vrstvy. Pro snadnější regulaci výkonu se může použít externí chladič popela. Popel je zpětně přiváděn do fluidní vrstvy. Výhodou je delší doba setrvání částic ve spalovacím prostoru, a tím pádem lepší vyhoření uhlíku. Distributorem se přivádí podstechiometrické množství

vzduchu. Nad distributor je poté přiveden zbylý vzduch. Tato metoda se využívá pro vyšší výkony až do 700 MW. [23] [27]



Obr. 13: Kotel s cirkulující fluidní vrstvou
 1 – přívod paliva, 2 – fluidní vrstva, 3 – primární vzduch,
 4 – sekundární vzduch, 5 – cyklon, 6 – fluidní uzávěr (sifon),
 7 – externí chladič popele, 8 a 9 – přehřívák, 10 – ekonomizér,
 11 – LUVO [27]

Z důvodu nízké teploty spalování, která se nejčastěji pohybuje v rozmezí 800-900 °C, je výrazně nižší produkce termických NO_x. Další snížení emisí NO_x je dosaženo postupným přívodem oksyličovadla. Primární vzduch je přiváděn přes distributor. Jedná se asi o 70 % z celkového přiváděného vzduchu do kotle. Sekundární vzduch je veden nad distributor nebo do dohořivací komory. Při stále se zpřísňujících emisních limitech je nutné i u fluidního spalování zavádět metody pro snižování NO_x. Fluidní spalování dosahuje ze všech ostatních způsobů spalování tuhých paliv nejvyšší efektivity využití energie a nejnižší produkce emisí. V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty produkovaných NO_x u jednotlivých spalovacích procesů bez aplikovaných primárních a sekundárních opatření. [23] [24]

Tab. 3: Charakteristické emise NO_x podle technologie spalování paliva bez aplikovaných opatření [25]

Technika spalování	koncentrace emisí NO _x [mg/Nm ³]
plynová ohniště	240-1400
kapalná ohniště	500-1700

roštová	500-1700
granulační	500-1700
výtavná	1600-2000
stacionární fluidní	200-500
cirkofluidní	50-400

4 Oxyfuel spalování

4.1 Technologie CCS

Výroba energie ze spalování fosilních paliv sebou nese problém s produkcí skleníkových plynů, které způsobují globální změny klimatu. Nejvíce dominantním přispěvatelem je oxid uhličitý. Je nutné tuto produkci omezovat. Je několik možných přístupů ke snížení produkce skleníkových plynů, jako je například zvyšování účinnosti elektráren, nahrazení fosilních paliv nebo zachytávání a skladování oxidu uhličitého (CCS). K zachytávání oxidu uhličitého produkovaného tepelnými elektrárnami se používají tři základní metody:

- a) spalování se vzduchem a následná separace CO₂ ze spalin – po spalovací zachytávání
- b) spalování s čistým kyslíkem a následná separace CO₂ ze spalin
- c) zplyňování paliva a separace CO₂ z tohoto plynu – před spalovací zachytávání. [28]
[32]

Účinnost separace CO₂ ze spalin se pohybuje okolo 85 % při zohlednění ekonomické efektivnosti. Při větších investičních nákladech je možné dosáhnout až 98% účinnosti separace při použití oxyfuel technologie. [28]

Získaný oxid uhličitý se skladuje pod vysokým tlakem hluboko pod zemí. Může se jednat o uskladnění v prostorách bývalé těžby např.: ropy nebo zemního plynu nebo dojde k jeho rozpuštění ve slané vodě, která je těžší než okolní slaná voda, a proto klesne ke dnu. [31]

4.2 Spalování s čistým kyslíkem

Spalování s čistým kyslíkem, také zvané jako oxyfuel spalování, je jednou z metod zachytávání oxidu uhličitého ze spalin. Použití kyslíku, jako oxidačního média místo vzduchu, má značné výhody. Vzduch obsahuje zhruba 78 % dusíku, který ale nepodporuje

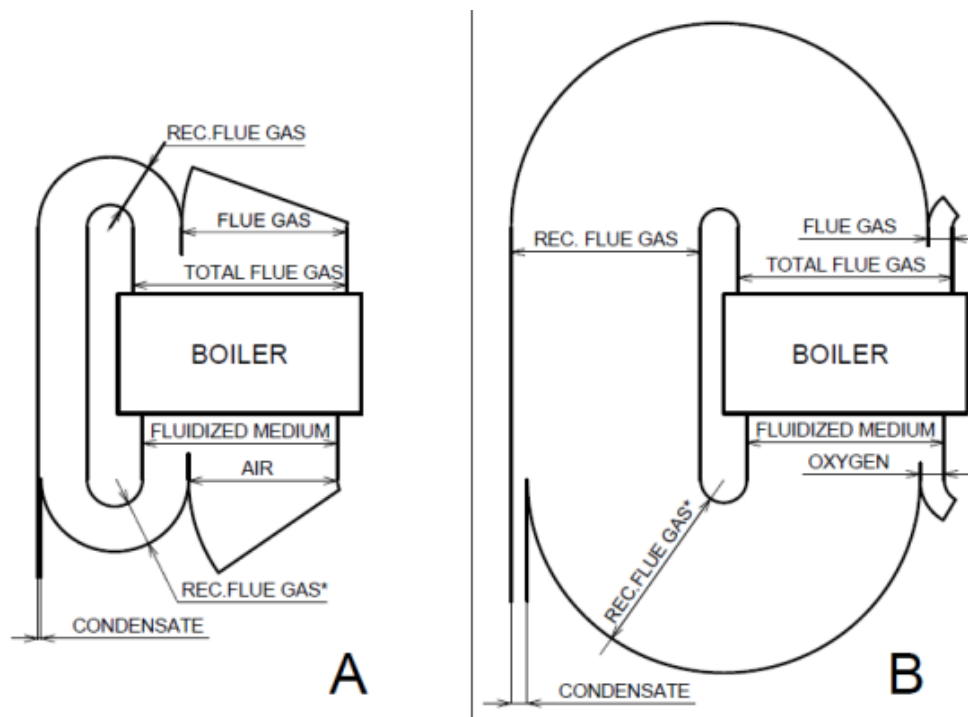
spalování. Jeho odstraněním by se zvýšila koncentrace CO_2 ve spalinách a snížil by se i jejich objem. Výsledkem by bylo zmenšení zařízení pro separaci a zjednodušení procesu separace, protože spaliny jsou z větší části složeny jen z CO_2 a vodní páry, která se snadno odstraní ochlazením spalin pod teplotu rosného bodu vodní páry.



Obr. 14: Schéma oxyfuel technologie [28]

Další výhodou je snížení produkce NO_x . Téměř zcela je omezena tvorba termických a promptních NO_x , které vznikají ze vzdušného dusíku. Na jejich produkci se podílí jen obsah dusíku v palivu. [28] [29]

Hlavním problémem oxyfuel technologie je získávání čistého kyslíku ze vzduchu. Provádí se to pomocí kryogenní metody, která je velice energeticky náročná. Při spalování s čistým kyslíkem dochází k redukci objemu spalin a k růstu teploty v ohništi. Aby ji bylo možné regulovat a aby nedošlo k překročení tepelné únosnosti materiálu, je nutné použít recirkulaci spalin. Význam recirkulace spalin v případě fluidního oxyfuel spalování je dvojitý, a to zvětšit objem fluidačního média a zvětšit průtok teponositele a tím snižovat teplotu plamene, aby bylo docíleno podmínek podobných při spalování se vzduchem. [29] [30]



Obr. 15: Porovnání průtoků plynů při spalování se vzduchem (A) a při oxyfuel spalování (B) [33]

5 Výpočtová část

5.1 Složení paliva

Pro výpočty a měření bylo použito jako palivo na vzduchu sušené, nízkopopelnaté hnědé uhlí z dolu Bílina, jehož prvkové složení je uvedeno v tab. 4. Druh použitého uhlí je hruboprach a jeho obchodní označení je hp1 135.

Tab. 4: Složení hnědého uhlí hp1 135

Hnědé uhlí hp1 135	
W^r	15 %
A^r	8 %
C^{daf}	71,5 %
H^{daf}	5,7 %
N^{daf}	0,87 %
S^{daf}	1,02 %
Q_i^r	21,3 MJ/kg

Jednotlivé indexy udávají stav paliva. Index r značí podíl složky v původním stavu, index d znamená bezvodý stav a index daf udává podíl složky v hořlavině, tedy bez uvažování obsahu vody a popela.

5.2 Přepočet stavů paliva

Pro přepočet mezi jednotlivými stavy paliva byly použity následující vzorce. [34]

$$N^r = N^{daf} (1 - W^r - A^r) [-] \quad (5.1)$$

$$N^r = N^d (1 - W^r) [-] \quad (5.2)$$

$$N^d = \frac{N^r}{(1 - W^r)} [-] \quad (5.3)$$

$$N^d = N^{daf} \cdot (1 - A^d) [-] \quad (5.4)$$

$$N^{daf} = \frac{N^r}{(1 - W^r - A^r)} [-] \quad (5.5)$$

$$N^{daf} = \frac{N^d}{(1 - A^d)} [-] \quad (5.6)$$

Výsledné prvkové složení paliva ve všech stavech je uvedeno v tab. 5. Výsledný obsah kyslíku v původním stavu byl určen, po sečtení všech složek paliva v původním stavu, jako zbývající část do 100 %.

Tab. 5: Prvkové složení paliva

	r [-]	d [-]	daf [-]
C	0,551	0,648	0,715
H	0,044	0,052	0,057
N	0,0067	0,0079	0,0087
S	0,0079	0,0092	0,0102
O	0,161	0,189	0,209
A	0,08	0,094	-
W	0,15	-	-

5.3 Stechiometrie pro spalování se vzduchem

Následující výpočtové vztahy jsou použity z [34]. Pro výpočet minimálního množství kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva byl použit následující vzorec:

$$\begin{aligned}
V_{O_{2min}} &= 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) = \\
&= 22,39 \cdot \left(\frac{0,551}{12,01} + \frac{0,044}{4,032} + \frac{0,0079}{32,06} - \frac{0,161}{32} \right) = \\
&= 1,163 \text{ Nm}^3/\text{kg}.
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Minimální objem suchého vzduchu je při uvažování objemu kyslíku ve vzduchu 21 % dán vztahem:

$$V_{VS_{min}} = \frac{V_{O_{2min}}}{0,21} = \frac{1,163}{0,21} = 5,538 \text{ Nm}^3/\text{kg}. \tag{5.8}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu se určí vynásobením minimálního objemu vzduchu suchého součinitelem χ_v , který vyjadřuje podíl vodní páry, který připadá na 1 Nm³ suchého vzduchu. Pro běžné klimatické podmínky je jeho hodnota $\chi_v=1,016$.

$$V_{VV_{min}} = \chi_v \cdot V_{VS_{min}} = 1,016 \cdot 5,538 = 5,626 \text{ Nm}^3/\text{kg} \tag{5.9}$$

Objem vodní páry ve vzduchu je rozdíl objemu vzduchu vlhkého a suchého.

$$V_{H_2O}^V = V_{VV_{min}} - V_{VS_{min}} = 5,626 - 5,538 = 0,089 \text{ Nm}^3/\text{kg} \tag{5.10}$$

V praxi se do spalovacího procesu přivádí větší množství vzduchu, než je to minimální, aby došlo k dobrému vyhoření paliva, a tím ke snížení ztráty nedopalem. Toto navýšení objemu spalovacího vzduchu udává součinitel přebytku spalovacího vzduchu a je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{V_{VV}^{celk}}{V_{VV_{min}}} = \frac{V_{VS}^{celk}}{V_{VS_{min}}} [-]. \tag{5.11}$$

Objemy složek spalin, které vzniknou při spalování s minimálním objemem vzduchu, se určí ze vztahů uvedených dále.

$$\begin{aligned}
V_{CO_2} &= \frac{22,26}{12,01} \cdot C_r + 0,0003 \cdot V_{VS_{min}} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,551 + 0,0003 \cdot 5,538 = \\
&= 1,022 \text{ Nm}^3/\text{kg}
\end{aligned} \tag{5.12}$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S_r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0079 = 0,0054 \text{ Nm}^3/\text{kg} \tag{5.13}$$

$$\begin{aligned}
 V_{N_2} &= \frac{22,4}{28,016} \cdot N_r + 0,7805 \cdot V_{VS_{min}} = \\
 &= \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0067 + 0,7805 \cdot 5,538 = \\
 &= 4,328 \text{ Nm}^3/\text{kg}
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VS_{min}} = 0,0092 \cdot 5,538 = 0,051 \text{ Nm}^3/\text{kg} \tag{5.15}$$

Součet těchto složek spalín dává celkový minimální objem suchých spalín.

$$\begin{aligned}
 V_{SS_{min}} &= V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} = 1,022 + 0,0054 + 4,328 + 0,051 = \\
 &= 5,406 \text{ Nm}^3/\text{kg}
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

Objem vodní páry ve spalínách je dán vztahem:

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O}^S &= \frac{44,8}{4,032} \cdot H_r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W_r + V_{H_2O}^V = \\
 &= \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,044 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,15 + 0,089 = \\
 &= 0,763 \text{ Nm}^3/\text{kg}.
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Minimální objem vlhkých spalín je dán součtem minimálního objemu suchých spalín a objemu vodní páry ve spalínách.

$$V_{SV_{min}} = V_{SS_{min}} + V_{H_2O}^S = 5,406 + 0,763 = 6,169 \text{ Nm}^3/\text{kg} \tag{5.18}$$

Skutečný objem spalín při spalování s přebytkem vzduchu α je dán vztahem:

$$V_{SV} = V_{SV_{min}} + (\alpha - 1) \cdot V_{VV_{min}} \text{ [Nm}^3/\text{kg]}. \tag{5.19}$$

Součinitel přebytku spalovacího vzduchu se určí z naměřené koncentrace kyslíku ve spalínách podle vztahu:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_{2m\check{e}r}} \text{ [-]}. \tag{5.20}$$

5.4 Stechiometrie pro oxyfuel spalování

Postup výpočtu je proveden obdobně, jako při spalování se vzduchem. Rozdíl je, že nejsou určeny objemy suchého a vlhkého vzduchu, což je vzhledem k použití čistého kyslíku jako okysličovadla pochopitelné a objemy složek spalín a objem vodní páry ve

spalinách jsou zmenšeny o část, na jejíž produkci se podílí vzduch použitý jako okysličovadlo.

Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva se neliší od spalování se vzduchem a je tedy: $V_{O_{2min}} = 1,163 \text{ Nm}^3/\text{kg}$.

Objemy jednotlivých složek spalin se již liší od spalování se vzduchem. Jedná se o objem dusíku a oxidu uhličitého, kde se na jejich produkci u oxyfuel spalování podílí jen dusík a uhlík obsažený v palivu, nikoli ve vzduchu. U spalování se vzduchem byly objemy těchto složek spalin vyšší.

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,551 = 1,020 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5.21)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0067 = 0,0054 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5.22)$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0079 = 0,0054 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5.23)$$

Minimální objem suchých spalin je opět dán součtem všech složek spalin.

$$\begin{aligned} V_{SSmin} &= V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{SO_2} = 1,020 + 0,0054 + 0,0054 = \\ &= 1,031 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Objem vodní páry ve spalinách je oproti spalování se vzduchem zmenšen o vzdušnou vlhkost.

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r = \\ &= \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,044 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,15 = 0,674 \text{ Nm}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Minimální objem vlhkých spalin je dán součtem minimálního objemu spalin suchých a objemu vodní páry ve spalinách.

$$V_{SVmin} = V_{SSmin} + V_{H_2O} = 1,031 + 0,674 = 1,705 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5.26)$$

Součinitel přebytku kyslíku je dán poměrem skutečného objemu vstupujícího kyslíku a minimálního objemu kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva.

$$\alpha = \frac{V_{O_2in}^{celk}}{V_{O_2min}} = \frac{V_{O_2} + V_{O_2min}}{V_{O_2min}} [-] \quad (5.27)$$

Skutečný objem vlhkých spalin se získá zvětšením minimálního objemu vlhkých spalin o objem kyslíku, který nebyl spotřebován při spalování. Ze změřené objemové koncentrace kyslíku ve spalinách se přepočtem podle následujícího vzorce získá objem nezreagovaného kyslíku.

$$V_{O_2} = \frac{V_{SSmin} \cdot O_{2m\check{e}ř}}{1 - O_{2m\check{e}ř}} [Nm^3/kg] \quad (5.28)$$

Pak je skutečný objem vlhkých spalin roven součtu minimálního objemu vlhkých spalin a objemu kyslíku odcházejícího ve spalinách.

$$V_{SV} = V_{SVmin} + V_{O_2} [Nm^3/kg] \quad (5.29)$$

5.5 Emisní faktor

Z důvodu rozdílného objemu spalin při spalování se vzduchem a s čistým kyslíkem je nutné vztáhnout koncentraci NO_x ve spalinách na jinou referenční veličinu, nikoli na objem spalin, který se ve vzduchovém a oxyfuel spalování značně liší. K tomu slouží emisní faktor ε [mg/MJ], tento konkrétně vyjádřený jako hmotnost znečišťující látky vztážená na 1 MJ výhřevnosti paliva. Určí se pro oba režimy shodně podle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\rho \cdot V_{SV}}{Q_i^r} [mg/MJ], \quad (5.30)$$

kde Q_i^r je výhřevnost paliva, V_{SV} je objem vlhkých spalin pro oxyfuel režim dle rovnice (5.29) a pro vzduchový režim dle rovnice (5.19). A ρ je hmotnostní koncentrace NO_x .

Hmotnostní koncentrace pro oba spalovací režimy je dána vztahem:

$$\rho = \varphi \cdot \frac{M \cdot p_N}{R \cdot T_N} [mg/Nm^3], \quad (5.31)$$

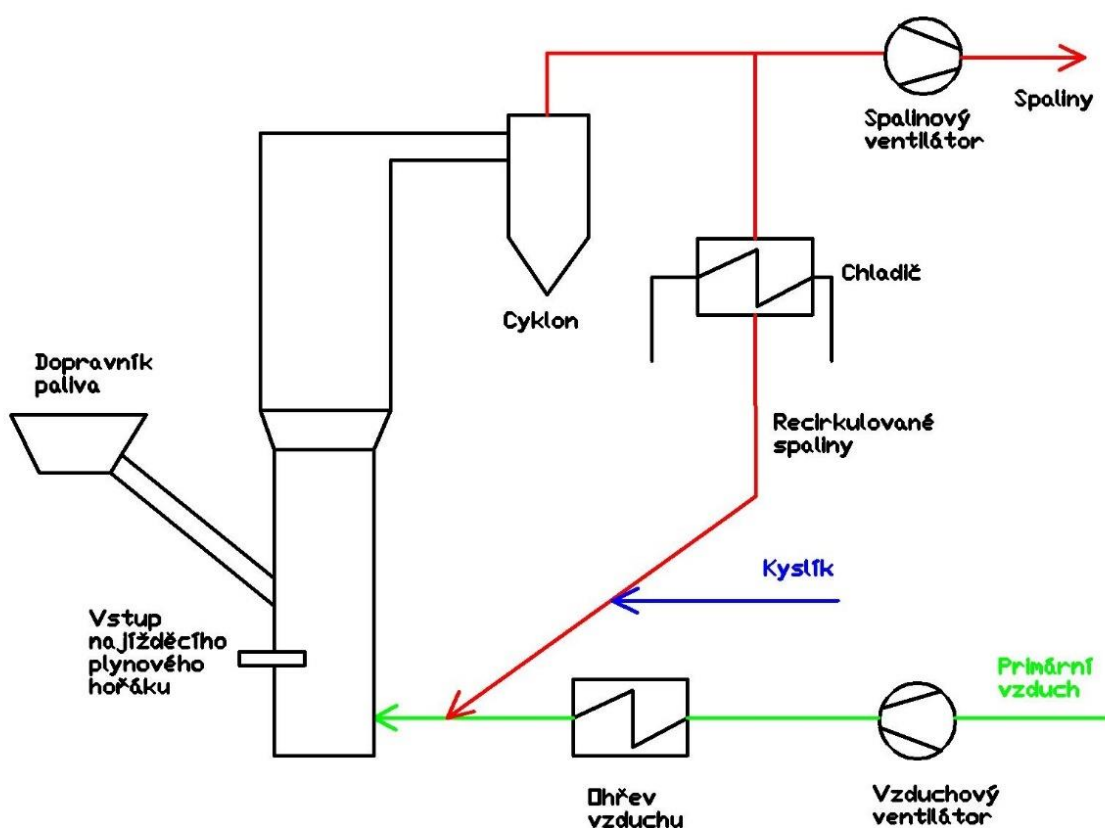
kde φ je naměřená objemová koncentrace NO_x , M je molární hmotnost, jejíž hodnota je pro NO_2 $M = 46$ g/mol, R je molární plynová konstanta a její hodnota je $R = 8,314$ J/K·mol. Teplota $T_N = 273,15$ K a tlak $p_N = 101,325$ kPa jsou hodnoty za normálních termodynamických podmínek.

6 Experimentální část

Cílem experimentální části je změření a porovnání množství produkovaných oxidů dusíku při spalování se vzduchem a při spalování v oxyfuel režimu v závislosti na teplotě, koncentraci kyslíku ve spalinách a na stupňovém přívodu oksyličovadla.

6.1 Popis zařízení

Měření bylo realizováno na laboratorním spalovacím zařízení s bublinkovou fluidní vrstvou o výkonu 30 kW. Schéma zařízení je uvedeno na obr. 16.



Obr. 16: Schéma laboratorního zařízení

Zařízení je tvořeno samotnou spalovací komorou s bublinkovou fluidní vrstvou. Primární vzduch je dopravován do kotle pomocí vzduchového ventilátoru přes elektrický ohřev. Je možné předehřívát fluidní vrstvu i plynovým hořákem. Doprava paliva je realizována pomocí šnekového dopravníku. Spaliny jsou vedeny do cyklonu, kde jsou odloučeny tuhé částice. Z cyklonu je část spalin vedena spalinovým ventilátorem do komína a část je vedena přes chladič zpět do spalovací komory. Recirkulované spaliny

slouží především k řízení teploty fluidní vrstvy, protože umožňují udržet potřebný průtok fluidačního média a zároveň v něm snížit koncentraci kyslíku. Při oxyfuel spalování není používán ventilátor primárního vzduchu, fluidace je zajišťována pouze recirkulovanými spalinami, do kterých je přiváděn kyslík. Průtok kyslíku je měřen pomocí hmotnostního průtokoměru, a samostatný přívod kyslíku jako sekundární okysličovadlo pomocí rotametru. Měřen je dále teplotní profil ve fluidní vrstvě a v dohořivacím prostoru (freeboardu), tlakové poměry, průtok recirkulovaných spalin a kontinuálně je měřeno složení spalin na výstupu z fluidní vrstvy – měřeny jsou koncentrace CO, CO₂, O₂, NO_x a SO₂.

6.2 Popis experimentu

Před zahájením měření je třeba zkontrolovat kvalitu materiálu fluidní vrstvy a vyčistit cyklon. Je také třeba zkalibrovat analyzátor spalin kalibračním plynem. Následuje předehřívání fluidní vrstvy, což je možné plynovým hořákem nebo elektrickým ohřevem primárního vzduchu. Při dosažení potřebné teploty pro vznícení paliva se začne přivádět palivo. Jedná se o hnědé uhlí z dolu Bílina, typ hruboprach. Průtok paliva je regulován změnou doby chodu a prodlevy dopravníku. Poté je třeba dosáhnout zvýšením průtoku paliva teploty kolem 800 °C, podle jednotlivých měření. Teploty jsou měřeny po výšce spalovací komory pomocí termočlánků.

Měření jednotlivých stavů probíhalo po dobu 30 minut. Hodnoty byly zaznamenány v programu Labview, který slouží k řízení spalovacího procesu. Frekvence záznamu hodnot je 2 s. Před začátkem měření je nutné dosáhnout ustálení na daných hodnotách. V průběhu měření by nemělo docházet k výrazným výkyvům, jinak je nutné měření opakovat. Potřebné teploty vrstvy a objemy kyslíku ve spalinách lze udržet pomocí regulace frekvence ventilátoru primárního vzduchu a recirkulace. Pro vyhodnocení jsou použity průměrné hodnoty teplot a koncentrací složek spalin. Analyzovány byly tři různé stavy v oxyfuel režimu i při spalování se vzduchem. Jednalo se o vliv teploty při konstantní koncentraci kyslíku, dále o vliv koncentrace kyslíku ve spalinách při konstantní teplotě vrstvy a jako poslední byl zkoumán vliv stupňového přívodu okysličovadla. Poté byl určen emisní faktor. Jedná se o hmotnost NO_x, která je vztažena na 1 MJ výhřevnosti paliva. Pro jeho určení je třeba přepočítat naměřené objemové koncentrace NO_x na hmotnostní. Ze stechiometrie určit minimální objemy a složení spalin. Poté z naměřených hodnot určit

skutečné objemy spalin. Po určení emisních faktorů je už možné přímo graficky porovnat oba druhy spalování.

6.3 Závislost produkce NO_x na teplotě

6.3.1 Oxyfuel spalování

Měření bylo realizováno pro pět různých teplot. Pro každou naměřenou veličinu byly určeny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky, maximální a minimální objem NO_x ve spalinách. Měření probíhalo při koncentraci kyslíku ve spalinách 6 %. Snahou bylo tuto hodnotu držet konstantní přibližně na této výši. Skutečně naměřené hodnoty při oxyfuel spalování jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6: Naměřené hodnoty v závislosti na teplotě při oxyfuel spalování

Stav	1	2	3	4	5
$\bar{O}_{2m\ddot{e}r}$ [%]	5,93±1,38	4,93±1,07	6,44±1,77	6,45±1,51	6,46±1,25
t [°C]	800	840	880	920	960
$\bar{t}_{m\ddot{e}r}$ [°C]	802±15	848±4	884±9	924±7	962±3
max NO _x [ppm]	406	407	567	582	624
min NO _x [ppm]	202	174	240	288	374
\bar{NO}_x [ppm]	278±40	296±38	414±74	450±68	493±56

V tab. 7 jsou uvedeny skutečné objemy vlhkých spalin pro určení emisního faktoru, určené podle vztahu (5.29). Objem kyslíku ve spalinách V_{O₂} je určen z naměřené koncentrace kyslíku ve spalinách dle rovnice (5.28).

Tab. 7: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin

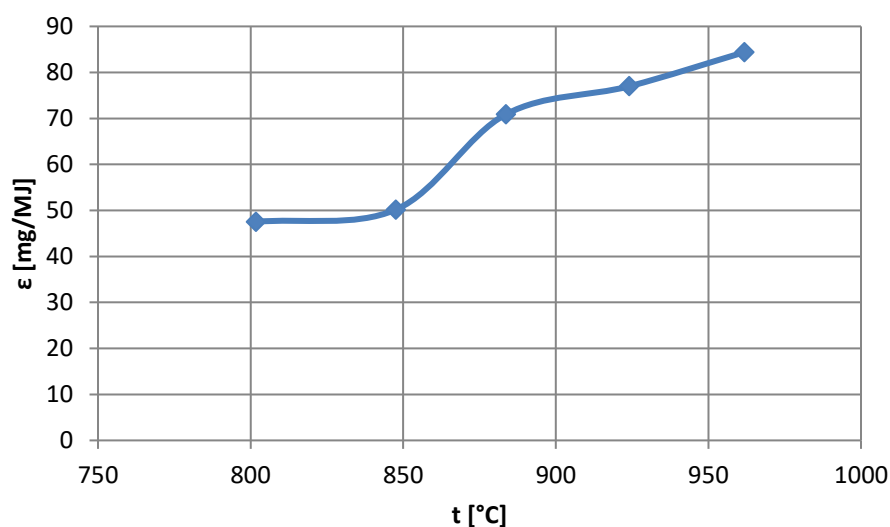
Stav	O ₂ [%]	V _{O₂} [Nm ³ /kg]	α [-], dle (5.27)	V _{SV} [Nm ³ /kg]
1	5,93	0,065	1,056	1,770
2	4,93	0,054	1,046	1,759
3	6,44	0,071	1,061	1,776
4	6,45	0,071	1,061	1,776
5	6,46	0,071	1,061	1,777

Dále je uveden přepočítání naměřené objemové koncentrace NO_x na hmotnostní koncentraci podle vztahu (5.31) a nakonec výpočet emisního faktoru dle vztahu (5.30).

Tab. 8: Určené hodnoty emisního faktoru

Stav	NO _x [ppm]	ρ [mg/Nm ³]	ε [mg/MJ]
1	278	572	48
2	296	607	50
3	414	850	71
4	450	923	77
5	493	1012	84

Závislost emisního faktoru na teplotě při oxyfuel spalování je vynesena do následujícího grafu.



Obr. 17: Závislost emisního faktoru na teplotě v oxyfuel režimu

6.3.2 Spalování se vzduchem

Naměřené hodnoty pro spalování se vzduchem jsou uvedeny v tab. 9. Zpracování naměřených hodnot probíhalo shodně jako v předchozím případě.

Tab. 9: Naměřené hodnoty v závislosti na teplotě při spalování se vzduchem

Stav	1	2	3	4
$\bar{O}_{2m\check{e}r}$ [%]	6,03±0,54	5,7±0,28	5,98±0,44	6,28±0,4
t [°C]	840	880	920	960
$\bar{t}_{m\check{e}r}$ [°C]	839±7	879±6	920±6	961±4
max NO _x [ppm]	319	312	328	336
min NO _x [ppm]	258	278	285	309
\overline{NO}_x [ppm]	287±14	297±6	307±10	326±6

Pro konečný výpočet emisního faktoru je třeba nejprve vypočítat součinitel přebytku kyslíku z naměřených koncentrací kyslíku a poté skutečný objem vlhkých spalin dle rovnice (5.19). V tab. 10 jsou uvedeny určené hodnoty přebytku spalovacího vzduchu a skutečný objem vlhkých spalin.

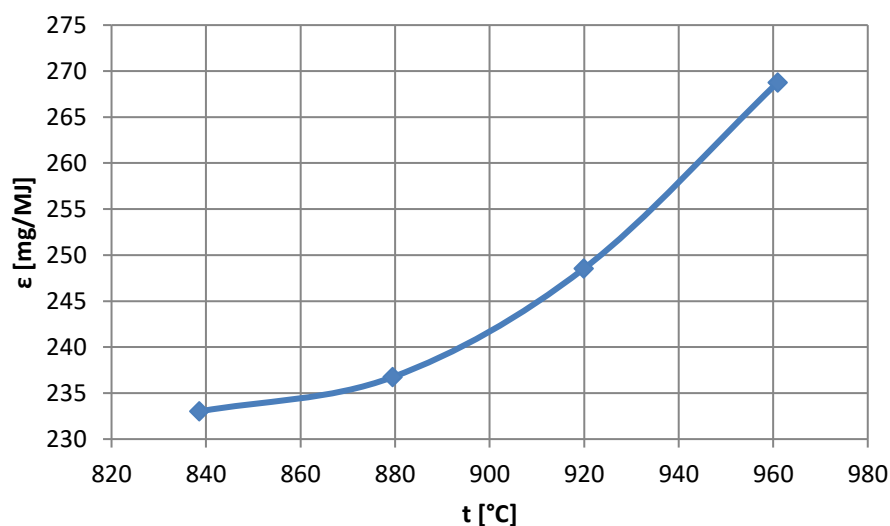
Tab. 10: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin

Stav	O ₂ [%]	α [-], dle (5.20)	V _{sv} [Nm ³ /kg]
1	6,03	1,403	8,434
2	5,70	1,373	8,267
3	5,98	1,398	8,407
4	6,28	1,426	8,568

Z předchozích naměřených a určených hodnot byla vypočítána hmotnostní koncentrace dle vztahu (5.31) a emisní faktor podle (5.30). Následně byly emisní faktory pro uvedené stavy vyneseny do grafu v závislosti na teplotě.

Tab. 11: Určené hodnoty emisního faktoru

Stav	NO _x [ppm]	ρ [mg/Nm ³]	ε [mg/MJ]
1	287	588	233
2	297	610	237
3	307	630	249
4	326	668	269



Obr. 18: Závislost emisního faktoru na teplotě ve vzduchovém režimu

6.4 Závislost produkce NO_x na koncentraci kyslíku ve spalinách

6.4.1 Oxyfuel spalování

Měření probíhalo pro několik stavů o různém přebytku, resp. koncentraci kyslíku ve spalinách. Jak bylo ukázáno výše, stejná koncentrace kyslíku ve spalinách neznamenaá shodný součinitel přebytku oxidisčovadla ve vzduchovém a oxyfuel režimu. Snaha byla teplotu vrstvy udržet konstantní na hodnotě 880 °C.

Tab. 12: Naměřené hodnoty v závislosti na přebytku kyslíku při oxyfuel spalování

Stav	1	2	3	4
O ₂ [%]	3	6	9	12
$\bar{O}_{2m\check{e}r}$ [%]	3,19±1,01	6,42±1,32	8,72±1,17	11,53±1,89
$\bar{t}_{m\check{e}r}$ [°C]	881±7	882±5	882±7	881±6
max NO _x [ppm]	321	483	571	606
min NO _x [ppm]	195	305	388	405
\bar{NO}_x [ppm]	254±32	395±44	483±36	536±37

Postup výpočtu a použité vztahy jsou totožné jako v předchozím případě při oxyfuel spalování.

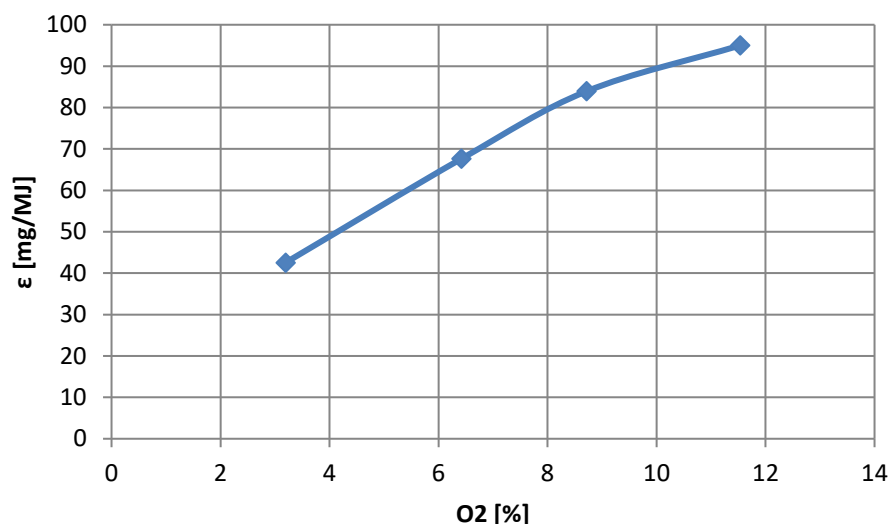
Tab. 13: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin

Stav	O ₂ [%]	V _{O₂} [Nm ³ /kg]	α [-], dle (5.27)	V _{sv} [Nm ³ /kg]
1	3,19	0,034	1,029	1,739
2	6,42	0,071	1,061	1,776
3	8,72	0,098	1,085	1,804
4	11,53	0,134	1,116	1,840

Tab. 14: Určené hodnoty emisního faktoru

Stav	NO _x [ppm]	ρ [mg/Nm ³]	ε [mg/MJ]
1	254	521	43
2	395	811	68
3	483	991	84
4	536	1100	95

Závislost emisního faktoru na koncentraci kyslíku ve spalinách je uvedena na obr. 19.



Obr. 19: Závislost emisního faktoru na koncentraci kyslíku ve spalinách v oxyfuel režimu

6.4.2 Spalování se vzduchem

Měření probíhalo za stejných podmínek jako v případě spalování s čistým kyslíkem. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15: Naměřené hodnoty v závislosti na přebytku kyslíku při spalování se vzduchem

Stav	1	2	3
O ₂ [%]	3	6	9
$\bar{O}_{2m\check{e}r}$ [%]	2,91±0,56	5,87±0,46	9,28±0,64
$\bar{t}_{m\check{e}r}$ [°C]	877±9	880±9	880±7
max NO _x [ppm]	301	324	314
min NO _x [ppm]	185	277	290
\bar{NO}_x [ppm]	244±31	309±10	302±5

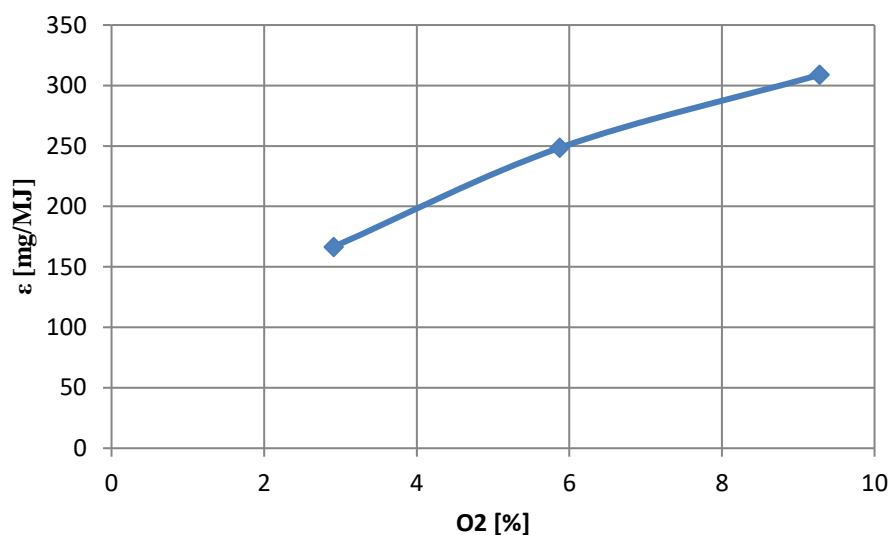
Postup určení následujících veličin je shodný jako v předchozím případě spalování se vzduchem. Následně je vynesena závislost emisního faktoru na koncentraci kyslíku.

Tab. 16: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin

Stav	O ₂ [%]	α [-], dle (5.20)	V _{sv} [Nm ³ /kg]
1	2,91	1,161	7,074
2	5,87	1,388	8,354
3	9,28	1,792	10,624

Tab. 17: Určené hodnoty emisního faktoru

Stav	NO _x [ppm]	ρ [mg/Nm ³]	ε [mg/MJ]
1	244	502	167
2	309	634	248
3	302	619	309



Obr. 20: Závislost emisního faktoru na koncentraci kyslíku ve spalínách ve vzduchovém režimu

6.5 Závislost produkce NO_x na stupňovém přívodu okysličovadla

6.5.1 Oxyfuel spalování

Měření probíhalo pro pět stavů s různým poměrem přiváděného primárního a sekundárního kyslíku. Při stavu jedna byl přiváděn pouze primární kyslík. Teplota fluidní vrstvy byla udržována na hodnotě 880 °C a objem kyslíku ve spalínách na hodnotě 6 %. Zpracování hodnot je shodné jako v předchozích případech.

Tab. 18: Naměřené hodnoty v závislosti na stupňovém přívodu kyslíku

Stav	1	2	3	4	5
prim./sek. [Nm ³ /h]	4,91/0	3,78/1	3,3/1,5	2,66/2	2,25/2,5
$\bar{O}_{2m\check{e}ř}$ [%]	6,64±1,31	6,17±1,7	5,8±0,77	6,06±1,11	5,19±1,15
$\bar{t}_{m\check{e}ř}$ [°C]	876±9	876±13	883±9	881±8	885±16
max NO _x [ppm]	511	422	248	222	346
min NO _x [ppm]	264	150	160	167	239
\overline{NO}_x [ppm]	390±55	260±67	202±21	195±12	293±34

Pro přepočítání průtoku kyslíku na objem v Nm³/kg je třeba určit průtok paliva. Pro jeho výpočet je potřeba znát kontinuální dodávku paliva dopravníkem, dobu prodlevy a chodu dopravníku.

Kalibrovaný kontinuální tok paliva: $\dot{m}_{kont} = 220 \text{ g/min}$

Doba chodu: $t_{chod} = 1,5 \text{ s}$

Doba prodlevy: $t_{prodl} = 4 \text{ s}$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{\dot{m}_{kont}}{60} \cdot \frac{t_{chod}}{t_{chod} + t_{prodl}} = \frac{220}{60} \cdot \frac{1,5}{1,5 + 4} = 1 \text{ g/s} = 3,6 \text{ kg/h} \quad (6.1)$$

Výpočet objemu přiváděného primárního kyslíku je určen podle vztahu:

$$V_{O2in}^{prim} = \frac{\dot{V}_{prim}}{\dot{m}_{pal}} [Nm^3/kg]. \quad (6.2)$$

Pro znázornění míry stochiometrie spalování je určen součinitel přebytku kyslíku po přivedení primárního okysličovadla.

$$\alpha_{prim} = \frac{V_{O2in}^{prim}}{V_{O2min}} [-] \quad (6.3)$$

Pro porovnání je v tab. 19 uveden také součinitel přebytku okysličovadla po přivedení celkového objemu okysličovadla. Do vztahu pro výpočet součinitele přebytku kyslíku (5.27) byl použit objem kyslíku ve spalinách určený ze vztahu (6.6).

Tab. 19: Určené hodnoty objemu primárního kyslíku a součinitele přebytku kyslíku

Stav	$\dot{V}_{prim} [Nm^3/h]$	$V_{O2in}^{prim} [Nm^3/kg]$	$\alpha_{prim} [-]$, dle (6.3)	$\alpha [-]$, dle (5.27)
1	4,91	1,364	1,173	1,173
2	3,78	1,050	0,903	1,142
3	3,3	0,917	0,788	1,147
4	2,66	0,739	0,635	1,113
5	2,25	0,625	0,537	1,135

Výpočet skutečného objemu vlhkých spalin pro výpočet emisního faktoru se provede podle následujících vzorců.

$$V_{O2in}^{sek} = \frac{\dot{V}_{sek}}{\dot{m}_{pal}} [Nm^3/kg] \quad (6.4)$$

$$V_{O_{2in}}^{celk} = V_{O_{2in}}^{prim} + V_{O_{2in}}^{sek} [Nm^3/kg] \quad (6.5)$$

$$V_{O_2} = V_{O_{2in}}^{celk} - V_{O_{2min}} [Nm^3/kg] \quad (6.6)$$

$$V_{SV} = V_{SVmin} + V_{O_2} [Nm^3/kg] \quad (6.7)$$

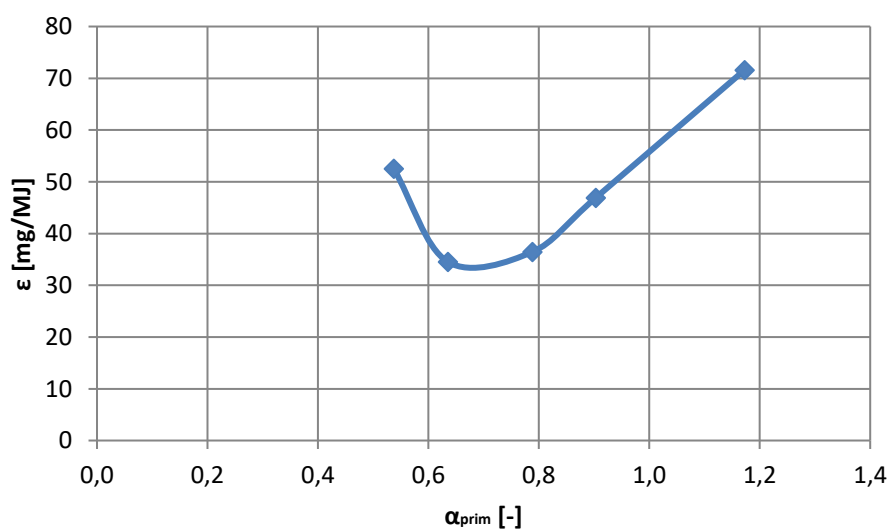
Tab. 20: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin

Stav	$V_{O_{2in}}^{prim} [Nm^3/kg]$	$V_{O_{2in}}^{sek} [Nm^3/kg]$	$V_{O_{2in}}^{celk} [Nm^3/kg]$	$V_{O_2} [Nm^3/kg]$	$V_{SV} [Nm^3/kg]$
1	1,364	0	1,364	0,201	1,906
2	1,050	0,278	1,328	0,165	1,870
3	0,917	0,417	1,333	0,170	1,876
4	0,739	0,556	1,294	0,132	1,837
5	0,625	0,694	1,319	0,157	1,862

Určené hodnoty hmotnostních koncentrací dle vztahu (5.31), emisních faktorů dle vztahu (5.30) a graficky znázorněná závislost koncentrace NO_x na stechiometrii primárního kyslíku jsou uvedeny dále.

Tab. 21: Určené hodnoty emisního faktoru

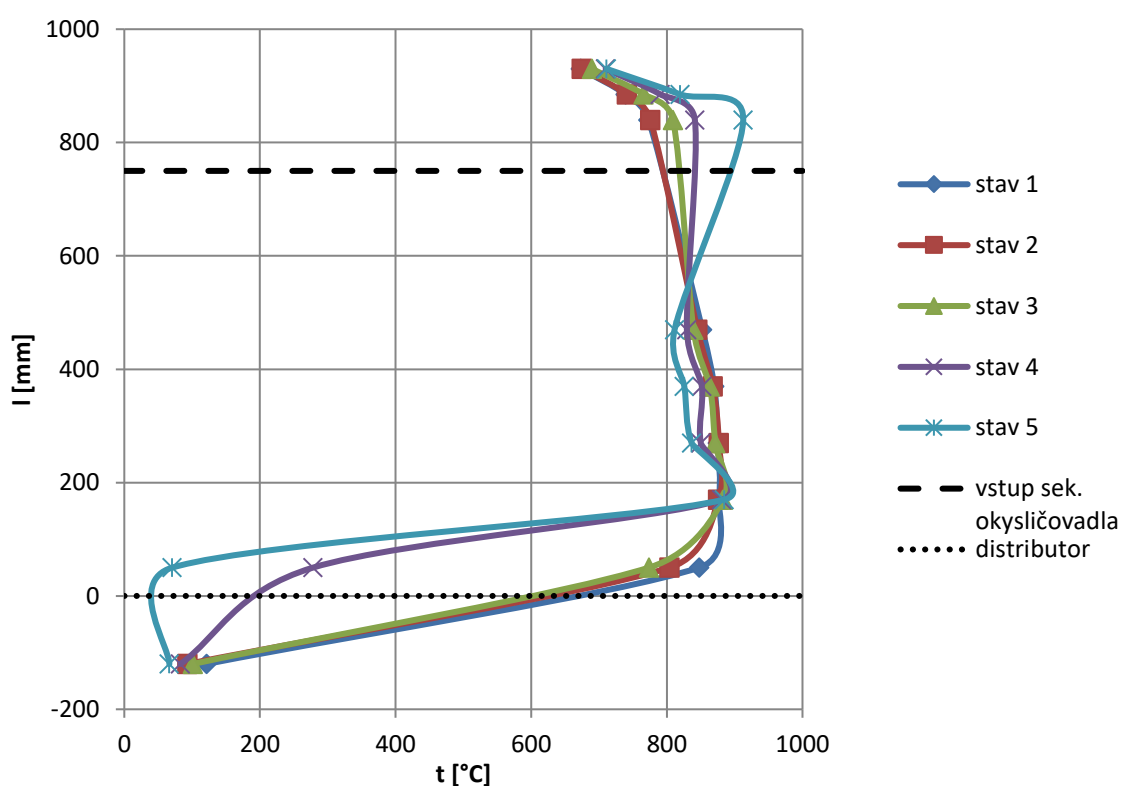
Stav	$NO_x [ppm]$	$\rho [mg/Nm^3]$	$\epsilon [mg/MJ]$
1	390	800	72
2	260	534	47
3	202	414	36
4	195	400	35
5	293	601	53



Obr. 21: Závislost emisního faktoru na stechiometrii primárního kyslíku

Koncentrace NO_x je vztažena na součinitel přebytku kyslíku po přivedení primárního kyslíku. Jedná se o poměr skutečně přivedeného objemu primárního kyslíku a minimálního objemu kyslíku pro spálení 1 kg paliva.

Na následujícím grafu je zobrazen průběh teploty po výšce spalovací komory. Po celé výšce spalovací komory je pomocí termočlánků měřena teplota. Měřících míst nad distributorem je celkem osm, pět z nich je umístěno ve spalovací komoře, poté je přivedeno sekundární okysličovadlo a následují další tři měřící místa v dohořivací části. Jedno měřící místo teploty je umístěno také pod distributorem. Vynesená vzdálenost na ose y je výška jednotlivých měřících pozic od distributoru.



Obr. 22: Teplotní profil v oxyfuel režimu

Teplota fluidní vrstvy byla udržována na hodnotě 880 °C. Čím nižší je množství přiváděného primárního okysličovadla, tím klesá i teplota ve spalovací komoře. Po přivedení sekundárního okysličovadla dochází k nárůstu teploty v dohořivací části.

6.5.2 Spalování se vzduchem

Měření probíhalo, stejně jako v předchozím případě, pro pět stavů s různým poměrem přiváděného primárního a sekundárního vzduchu. Při stavu jedna byl přiváděn pouze primární vzduch. Teplota fluidní vrstvy byla udržována na hodnotě 880 °C a objem

kyslíku ve spalínách na hodnotě 6 %. Zpracování hodnot je shodné jako v předchozích případech.

Tab. 22: Naměřené hodnoty v závislosti na stupňovém přívodu vzduchu

Stav	1	2	3	4	5
prim./sek. [Nm ³ /h]	36,19/0	29,31/10	26/16	17,99/24	13,57/33
$\bar{O}_{2m\check{e}ř}$ [%]	5,87±0,46	5,91±0,47	6,06±0,49	6,02±0,52	6,15±0,21
$\bar{t}_{m\check{e}ř}$ [°C]	880±9	889±6	886±4	889±6	887±5
max NO _x [ppm]	324	274	247	175	138
min NO _x [ppm]	277	209	183	45	115
\bar{NO}_x [ppm]	309±10	241±16	210±14	156±13	128±5

Pro přepočítání průtoku vzduchu na objem v Nm³/kg je třeba určit průtok paliva.

Kontinuální tok paliva: $\dot{m}_{kont} = 220$ g/min

Doba chodu: $t_{chod} = 2$ s

Doba prodlevy: $t_{prodl} = 4$ s

Z uvedených hodnot byl určen podle vztahu (6.1) průtok paliva. Jeho hodnota je $\dot{m}_{pal} = 1,2$ g/s = 4,4 kg/h.

Výpočet objemu přiváděného primárního vzduchu je určen podle vztahu:

$$V_{VV}^{prim} = \frac{\dot{V}_{prim}}{\dot{m}_{pal}} [Nm^3/kg]. \quad (6.8)$$

Pro znázornění míry stechiometrie spalování je určen součinitel přebytku vzduchu po přivedení primárního okysličovačla.

$$\alpha_{prim} = \frac{V_{VV}^{prim}}{V_{VVmin}} [-] \quad (6.9)$$

Tab. 23: Určené hodnoty objemu primárního vzduchu a součinitele přebytku vzduchu

Stav	\dot{V}_{prim} [Nm ³ /h]	V_{VV}^{prim} [Nm ³ /kg]	α_{prim} [-], dle (6.9)	α [-], dle (5.11)
1	36,19	8,225	1,462	1,462
2	29,31	6,661	1,184	1,588
3	26	5,909	1,050	1,697
4	17,99	4,089	0,727	1,696
5	13,57	3,084	0,548	1,881

Výpočet celkového množství přiváděného vzduchu se provede podle následujících vzorců.

$$V_{VV}^{sek} = \frac{\dot{V}_{sek}}{\dot{m}_{pal}} [Nm^3/kg] \quad (6.10)$$

$$V_{VV}^{celk} = V_{VV}^{prim} + V_{VV}^{sek} [Nm^3/kg] \quad (6.11)$$

Z celkového množství přivedeného vzduchu byl určen součinitel přebytku oksličovadla ze vztahu (5.11) a skutečný objem spalin podle vztahu (5.19).

Tab. 24: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin

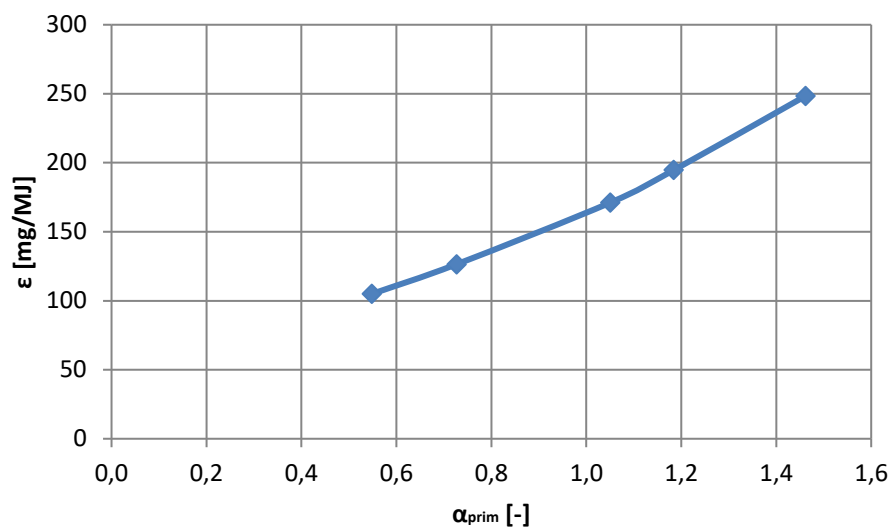
Stav	$V_{VV}^{prim} [Nm^3/kg]$	$V_{VV}^{sek} [Nm^3/kg]$	$V_{VV}^{celk} [Nm^3/kg]$	$\alpha [-]$	$V_{sv} [Nm^3/kg]$
1	8,225	0	8,225	1,462	8,352
2	6,661	2,273	8,934	1,588	8,372
3	5,909	3,636	9,545	1,697	8,451
4	4,089	5,455	9,543	1,696	8,430
5	3,084	7,500	10,584	1,881	8,499

Určené hodnoty hmotnostních koncentrací dle (5.31) a emisních faktorů dle (5.30) jsou uvedeny v tab. 25.

Tab. 25: Určené hodnoty emisního faktoru

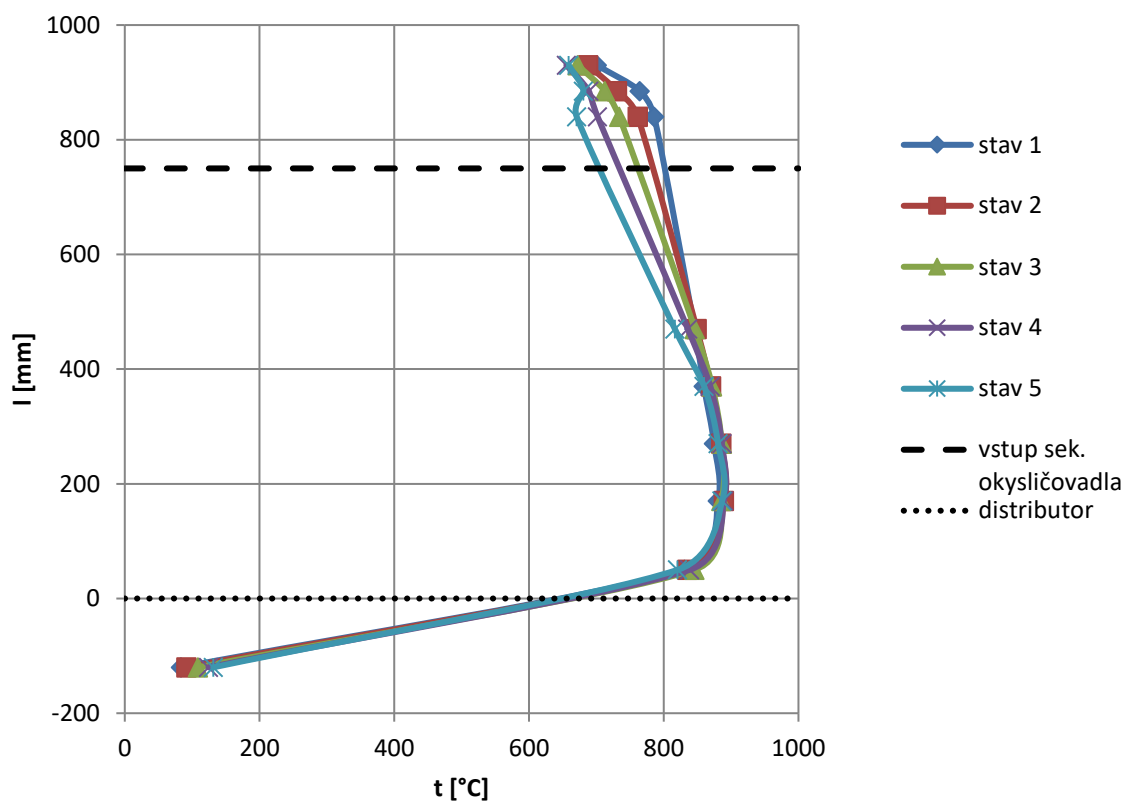
Stav	$NO_x [ppm]$	$\rho [mg/Nm^3]$	$\epsilon [mg/MJ]$
1	309	634	248
2	241	495	195
3	210	431	171
4	156	319	126
5	128	263	105

Závislost koncentrace NO_x na stechiometrii primárního vzduchu je uvedena na obr. 23.



Obr. 23: Závislost emisního faktoru na stechiometrii primárního vzduchu

Dále je zobrazen průběh teplot po výšce spalovací komory při spalování se vzduchem.



Obr. 24: Teplotní profil při spalování se vzduchem

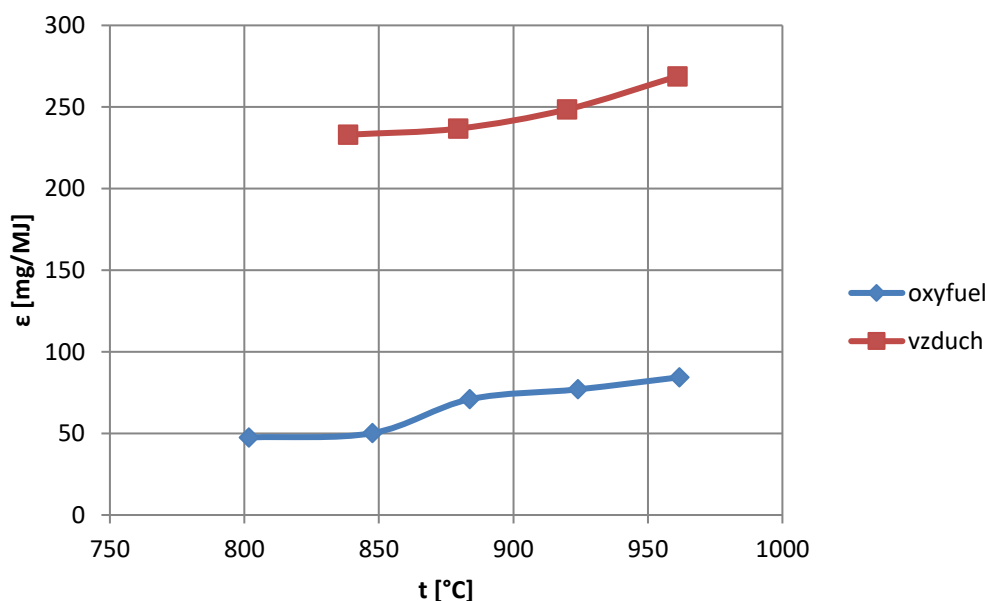
Na rozdíl od oxyfuel spalování je zde pokles teploty ve spalovací komoře výraznější, při klesajícím objemu přiváděného primárního vzduchu. Po přivedení sekundárního vzduchu už teplota prakticky neroste.

7 Diskuze výsledků

Cílem experimentální části bylo měření koncentrace oxidů dusíku ve spalinách při spalování se vzduchem a s čistým kyslíkem na laboratorní fluidní jednotce s bublinkovou vrstvou. Byl zkoumán vliv primárních opatření na výši vznikajících NO_x . Byl zjišťován vliv teploty fluidní vrstvy, vliv přebytku kyslíku, resp. vliv koncentrace kyslíku ve spalinách, protože stejná koncentrace kyslíku ve spalinách neznamena stejný součinitel přebytku okysličovadla v obou režimech z důvodu rozdílných velikostí objemů vstupujících a vystupujících látek. Dále byl posuzován také vliv stupňového přívodu okysličovadla.

Pro porovnání byly určeny pro jednotlivé stavy emisní faktory. Jedná se o koncentraci NO_x vztaženou na 1 MJ výhřevnosti paliva, ne na objem spalin, jelikož se objemy spalin při spalování se vzduchem a s čistým kyslíkem liší.

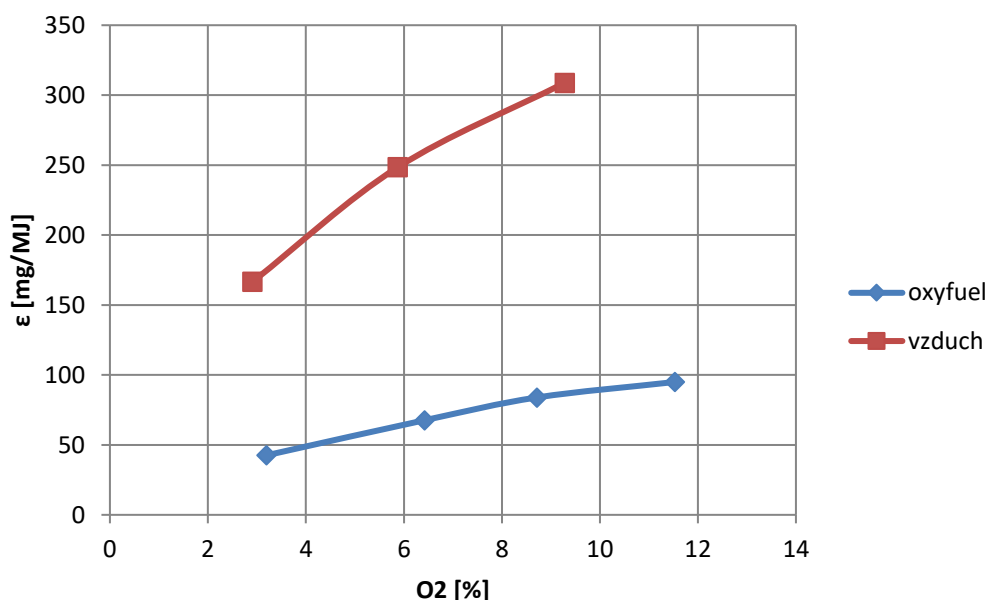
Na obr. 25 je vynesena závislost koncentrace NO_x pro oba typy spalování na teplotě.



Obr. 25: Porovnání obou typů spalování v závislosti na teplotě

Je patrné, že do teploty 850 °C je koncentrace NO_x v oxyfuel režimu téměř konstantní. Po překročení této teploty dochází k nárůstu. Ve vzduchovém režimu je průběh konstantní až do teploty 880 °C, poté dochází k málo významnému nárůstu. Při zvýšení teploty o 40 °C je nárůst koncentrace NO_x u vzduchového režimu zhruba o 15 mg/MJ. V oxyfuel režimu je patrný významný nárůst o 20 mg/MJ při zvýšení teploty z 850 °C na 880 °C. Při dalším zvýšení teploty o 40 °C, dojde k nárůstu koncentrace o zhruba 6 mg/MJ. Koncentrace NO_x je v oxyfuel režimu oproti vzduchovému režimu

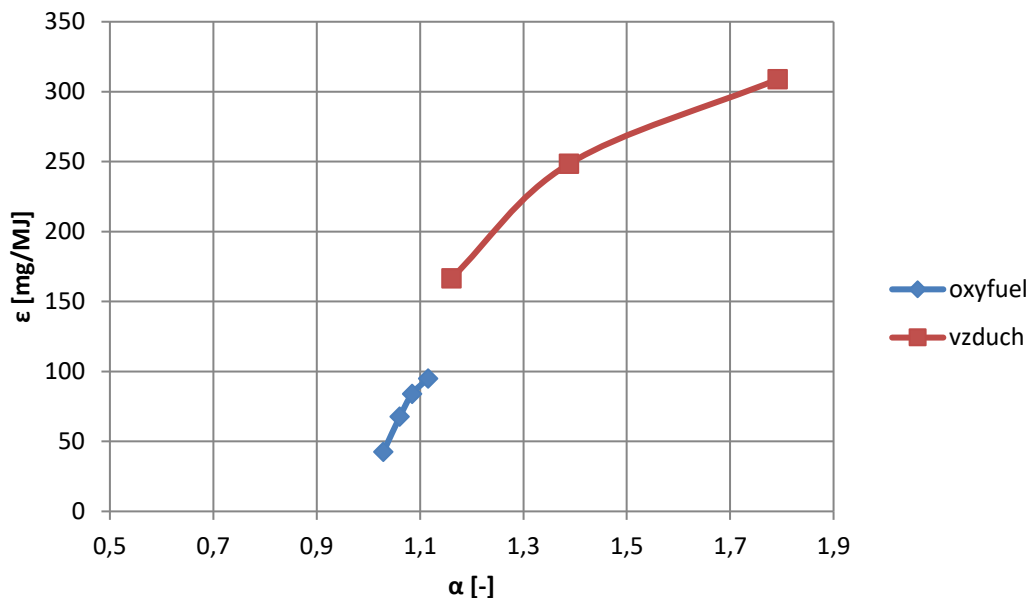
přibližně o 170 mg/MJ nižší. Je ale nutné zdůraznit, že se jedná o odlišné stechiometrické poměry z hlediska přebytku kyslíku – viz. následující obr. 26 a 27, na kterých je uvedena závislost emisních faktorů pro oba typy spalování na koncentraci kyslíku ve spalinách a jeho stechiometrii.



Obr. 26: Porovnání obou typů spalování v závislosti na koncentraci kyslíku ve spalinách

Je patrné, že zvýšení koncentrace kyslíku vede k nárůstu koncentrace NO_x v obou případech. Nárůst koncentrace NO_x je strmější při spalování se vzduchem, kde je zvýšení přibližně 90 mg/MJ při nárůstu koncentrace kyslíku ve spalinách z 3 % na 6 %. Při zvýšení koncentrace o další 3 % je nárůst jen o 50 mg/MJ. V oxyfuel režimu je to pouze 25 mg/MJ při zvýšení koncentrace kyslíku z 3 % na 6 %. Dalším zvyšováním koncentrace kyslíku ve spalinách klesá růst koncentrace NO_x.

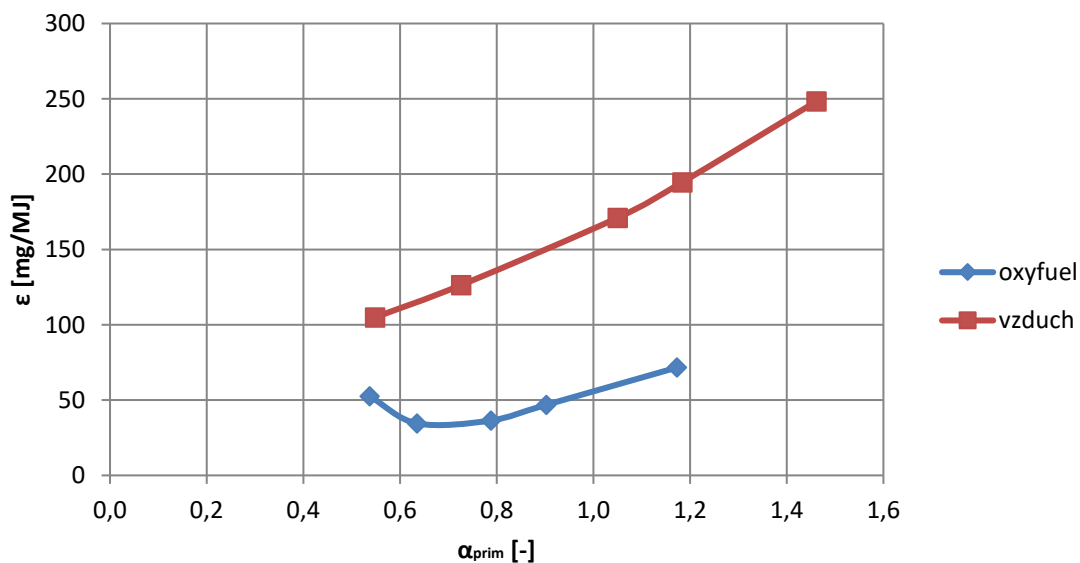
Rozdíl mezi oběma režimy při obsahu kyslíku ve spalinách 3 % je přes 100 mg/MJ. Při obsahu kyslíku 9 % je rozdíl už 200 mg/MJ.



Obr. 27: Zavislost emisního faktoru na stechiometrii

Na předcházejícím obr. 27 je znázorněna závislost emisního faktoru na stechiometrii. Je patrné, že koncentrace kyslíku 11 % v oxyfuel režimu dává téměř totožný součinitel přebytku okysličovadla jako koncentrace kyslíku 3 % ve vzduchovém režimu. Emisní faktor pro daný shodný součinitel přebytku okysličovadla se liší o 60 mg/MJ. Je také patrné, že spalování se vzduchem probíhá při vyšších přebytcích okysličovadla než spalování v oxyfuel režimu.

Na obr. 28 je vynesena závislost emisních faktorů na stupňovém přívodu okysličovadla pro oba typy spalování.



Obr. 28: Porovnání obou typů spalování v závislosti na stupňovém přívodu okysličovadla

S klesajícím součinitelem přebytku okysličovadla klesá také koncentrace NO_x u obou spalovacích režimů. Průběh obou křivek je téměř rovnoběžný až do stavu 5 při spalování s kyslíkem, kde došlo k odchýlení od předpokládaného průběhu. Rozdíl mezi stavy při spalování s kyslíkem a se vzduchem je asi 100 mg/MJ.

Celkově lze říci, že při všech třech zkoumaných primárních opatření byla koncentrace NO_x při oxyfuel spalování výrazně nižší než při spalování se vzduchem. Při nižší teplotě a při nižší koncentraci kyslíku ve spalinách jsou závislosti obou typů spalování téměř rovnoběžné. Nejvyšší rozdíl koncentrace NO_x mezi vzduchovým a oxyfuel režimem byl zjištěn u závislosti na teplotě, kde je rozdíl v jednotlivých stavech až 170 mg/MJ. Při zvýšení teploty a koncentrace kyslíku dochází ke strmějšímu nárůstu koncentrace NO_x u spalování se vzduchem. Např. při nízké koncentraci kyslíku ve spalinách je rozdíl zhruba 100 mg/MJ, avšak při koncentraci kolem 9 % je rozdíl už 200 mg/MJ. K výraznějšímu nárůstu koncentrace NO_x ve vzduchovém režimu oproti oxyfuel režimu dochází i při zvýšení stechiometrie primárního okysličovadla. U stupňového přívodu okysličovadla je pokles při použití oxyfuel technologie asi 100 mg/MJ. Měřeními byly také ověřeny předpokládané vlivy primárních opatření. A to, že při snižování teploty v ohništi, klesá také koncentrace NO_x , stejně tak snižování koncentrace kyslíku ve spalinách a podstechiometrické spalování vedou také ke snížení koncentrace NO_x . Při zvýšení teploty o 120 °C se koncentrace NO_x v obou případech zvedla o zhruba 40 mg/MJ. Při změně koncentrace kyslíku z 3 % na 9 % byl nárůst koncentrace u spalování se vzduchem o 150 mg/MJ, kdežto u oxyfuel spalování pouze 50 mg/MJ. A při poklesu ze stavu spalování o součiniteli přebytku okysličovadla 1,2 do stavu o přebytku okysličovadla 0,8 bylo dosaženo snížení koncentrace o 40 mg/MJ v oxyfuel režimu a o 70 mg/MJ ve vzduchovém režimu.

Změna poměru přiváděného primárního a sekundárního okysličovadla ovlivňuje teplotu ve spalovacím zařízení. V předchozí kapitole je uvedena závislost změny teploty po výšce spalovací a dohořivací komory. Je viditelná závislost klesající teploty ve spalovací komoře na snižujícím se objemu přiváděného primárního okysličovadla. Po přivedení sekundárního okysličovadla je nárůst teploty patrný zejména v oxyfuel režimu. Ve vzduchovém režimu teplota klesá.

Závěr

Cílem této práce bylo, pomocí experimentálního měření na jednotce s bublinkovou fluidní vrstvou, určit vliv primárních opatření a vliv spalování s čistým kyslíkem na velikost produkovaných oxidů dusíku. Prověřovanými primárními opatřeními byly snížení teploty v ohništi, dále pokles koncentrace kyslíku ve spalinách a stupňový přívod oksyličovadla.

Pro porovnání obou druhů spalování bylo třeba, z důvodu rozdílných objemů spalin při spalování se vzduchem a s čistým kyslíkem, určit emisní faktory pro jednotlivé měřené stavy. Emisní faktor zde představuje koncentraci NO_x vztaženou na 1 MJ výhřevnosti paliva. Pro jeho určení bylo třeba určit stechiometrii spalování a skutečné objemy spalin.

Měření bylo ověřeno, že spalování s čistým kyslíkem spolu s aplikovanými primárními opatřeními vede ke snížení koncentrace NO_x ve spalinách. Např. rozdíl mezi vzduchovým a oxyfuel režimem při teplotě 880 °C a koncentraci kyslíku ve spalinách 6 % je zhruba 72 %. Rozdíl mezi spalováním se vzduchem a s čistým kyslíkem je v dusíku obsaženém ve vzduchu. Ve vzduchu je 78 % dusíku, který nijak nepodporuje hoření, ale je možná jeho transformace, podle podmínek spalování, na toxické plyny oxid dusnatý a dusičitý. Může vznikat také oxid dusný, který není zdraví škodlivý, ale podílí se na tvorbě skleníkového efektu.

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že nejmenší vliv na redukci NO_x ve spalinách má změna teploty fluidní vrstvy, kdy je při snížení teploty o 120 °C pokles koncentrace NO_x asi o 13 % ve vzduchovém režimu a o 40 % v oxyfuel režimu. Oproti tomu nejnápadnější vliv na redukci NO_x má snižování přebytku kyslíku ve spalinách. Ve vzduchovém režimu je při snížení koncentrace kyslíku o 6 % koncentrace NO_x o 46 % nižší, u oxyfuel spalování o téměř 50 % nižší.

Byla také provedena analýza teplot ve spalovacím zařízení při stupňovém přívodu oksyličovadla. S klesajícím objemem primárního oksyličovadla se snižuje teplota ve spalovací komoře, poté se přivádí sekundární oksyličovadlo. V dohořivací oblasti došlo k nárůstu teploty výrazněji u spalování s kyslíkem.

Seznam použité literatury

- [1] Seinfeld, J. H., Pandis S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* [online]. John Wiley & Sons, 2016. ISBN 978-111-922-116-6 [cit. 2017-03-12] Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=MfHbCwAAQBAJ&hl=cs>
- [2] Integrovaný registr znečišťování [online]. [cit. 2017-03-12].
Dostupné z: <http://www.irz.cz/node/79>
- [3] ČEZ [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z:
https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/oxid_dusik.html
- [4] Pick, P. *Technologie ochrany ovzduší*. Praha: CA Publishing Sdružení Koneko, 1991.
- [5] Vejvoda, J. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: VŠCHT, 2003. ISBN 978-80-7080-517-6
- [6] tzb.info [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>
- [7] Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z:
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/IV3_NOx_CZ.html
- [8] Česká republika. Vyhláška 452/2017 Sb., kterou se mění vyhláška 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: Sběrka zákonů. 1. 1. 2018. Dostupné z:
<https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=452&r=2017>
- [9] Česká republika. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. In: Sběrka zákonů. 1. 9. 2012. Dostupné z:
<http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/9f4906381b38f7f6c1257a94002ec4a0?OpenDocument>
- [10] Ibler, Z. *Technický průvodce energetika*. Praha: BEN, 2002. ISBN 80-7300-026-1

- [11] *Emise oxidů dusíku u spalovacích procesů a možnosti jejich snižování*: Sborník. 1. vyd. Brno: Dům techniky ČSVTS, 1990. ISBN 80-020-0117-6
- [12] El-Mahallavy, F. *Fundamentals and technology of combustion*. [online] Amsterdam: Elsevier, 2002. ISBN 00-804-4106-8 [cit. 2017-04-04] Dostupné z: <https://books.google.cz/books?isbn=0080532187>
- [13] Integrovaná prevence a omezování znečištění [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/ippc/bref/--143226/>
- [14] Environmental protection agency [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir1/fnoxdoc.pdf>
- [15] Hesselmann G., Hepburn P., Fish S. *NOx reduction by air staging and reburning*. [online] Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999. ISBN 92-828-5800-6 [cit. 2017-04-29] Dostupné z: bookshop.europa.eu
- [16] BAUKAL, Ch. E. *Industrial Combustion Pollution and Control*. [online] New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 08-247-4694-5 [cit. 2017-04-29] Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=BAkijnwEACAAJ&redir_esc=y
- [17] Tomita, A. *Emissions reducing: NOx/SOx suppression*. [online] Amsterdam: Elsevier Science, 2001. ISBN 00-804-4089-4 [cit. 2017-04-29] Dostupné z: <https://books.google.cz/books?isbn=0080440894>
- [18] Baron J., Kowarska B., Żukowski W. *Low-Emission Combustion of Alternative Solid Fuel in Fluidized Bed Reactor*. [online] Faculty of Chemical Engineering and Technology, Cracow. [cit. 2017-04-29] Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-internal-combustion-engines-and-fuel-technologies/low-emission-combustion-of-alternative-solid-fuel-in-fluidized-bed-reactor>
- [19] ČEZ [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html
- [20] McGill AirClean LLC [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: http://www.mcgillairclean.com/textDocs/news/deNOx_news.htm

- [21] Výzkumný ústav maltovin Praha s.r.o. [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2016/05/12-redukce-nox-a-uniky-nh3.pdf>
- [22] ERC Emise Redukce Concepty s.r.o. [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.erc-online.cz/cs/denox/erc-plus/>
- [23] Ministerstvo životního prostředí - Spalování paliv [online]. [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/\\$FILE/OOO-spalovani_paliv-20160222.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/$FILE/OOO-spalovani_paliv-20160222.pdf)
- [24] Kunii D., Levenspiel O. *Fluidization Engineering* [online] Butterworth-Heinemann, 1991. ISBN 04-099-0233-0 [cit. 2017-06-29] Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=ZVnb17qRz8QC&dq=fluidization&hl=cs&source=gbs_navlinks_s
- [25] Operační program lidské zdroje a zaměstnanost: Spalování paliv - kotle [online]. [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/obrazky/seminare/ovzdusi/seminar2/15_dil_10_tisk_andreovsky.pdf
- [26] Hasal P., Schreiber I., Šnita D. *Chemické inženýrství*. Praha: VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7
- [27] tzb.info [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [28] tzb.info [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4986-ccs-separace-co2-a-jeho-ukladani-v-geologickych-formacich>
- [29] Power plant CCS [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://www.powerplantccs.com/ccs/cap/con/of/of.html>
- [30] Stanger, R. et al. *Oxyfuel combustion for CO2 capture in power plants*. [online] International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015. [cit. 2018-02-07] Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S1750583615002637>

[31] oenergetice.cz [online]. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z:

<http://oenergetice.cz/elektrina/carbon-capture-and-storage-technologie-uskladnovani-co2/>

[32] Buhre, B. J. P. et al. *Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation*.

[online] Progress in Energy and Combustion Science, 2005. [cit. 2018-02-08] Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0360128505000225>

[33] Skopec P., Hrdlička J. *Specific features of the oxy-fuel combustion conditions in a*

bubbling fluidized bed. [online] Acta Polytechnica, 2016. ISBN 1805-2363 [cit. 2018-02-08]

Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/viewFile/3258/3652>

[34] Dlouhý, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-03757-7

Seznam obrázků

Obr. 1: Vliv teploty a součinitele spalovacího vzduchu na tvorbu NO _x [6]	14
Obr. 2: Vývoj celkových emisí NO _x v letech 2007-2014 v ČR [7]	16
Obr. 3: Schéma stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu [15].....	18
Obr. 4: Porovnání paliv pro dospalování [13].....	19
Obr. 5: Schéma postupného přívodu paliva [15].....	19
Obr. 6: Schéma vnější recirkulace spalin [16].....	20
Obr. 7: Schéma vnitřní recirkulace spalin [16]	20
Obr. 8: Princip selektivní katalytické redukce [19]	22
Obr. 9: Schéma SCR [20]	23
Obr. 10: Vliv teploty na redukci NO _x [21]	24
Obr. 11: Schéma kombinace SCR a SNCR [22].....	25
Obr. 12: Kotel se stacionární fluidní vrstvou 1 – zásobník paliva, 2 – fluidní vrstva, 3 – obratová komora, 4 a 5 – přehřívák, 6 – ekonomizér, 7 – LUVO [27].....	26
Obr. 13: Kotel s cirkulující fluidní vrstvou 1 – přívod paliva, 2 – fluidní vrstva, 3 – primární vzduch, 4 – sekundární vzduch, 5 – cyklon, 6 – fluidní uzávěr (sifon), 7 – externí chladič popelé, 8 a 9 – přehřívák, 10 – ekonomizér, 11 – LUVO [27].....	27
Obr. 14: Schéma oxyfuel technologie [28]	29
Obr. 15: Porovnání průtoků plynů při spalování se vzduchem (A) a při oxyfuel spalování (B) [33].....	30
Obr. 16: Schéma laboratorního zařízení.....	36
Obr. 17: Závislost emisního faktoru na teplotě v oxyfuel režimu	39
Obr. 18: Závislost emisního faktoru na teplotě ve vzduchovém režimu.....	40
Obr. 19: Závislost emisního faktoru na koncentraci kyslíku ve spalinách v oxyfuel režimu	42
Obr. 20: Závislost emisního faktoru na koncentraci kyslíku ve spalinách ve vzduchovém režimu	43
Obr. 21: Závislost emisního faktoru na stechiometrii primárního kyslíku	45
Obr. 22: Teplotní profil v oxyfuel režimu	46
Obr. 23: Závislost emisního faktoru na stechiometrii primárního vzduchu.....	49
Obr. 24: Teplotní profil při spalování se vzduchem.....	49
Obr. 25: Porovnání obou typů spalování v závislosti na teplotě.....	50
Obr. 26: Porovnání obou typů spalování v závislosti na koncentraci kyslíku ve spalinách.	51
Obr. 27: Závislost emisního faktoru na stechiometrii	52
Obr. 28: Porovnání obou typů spalování v závislosti na stupňovém přívodu okysličovadla	52

Seznam tabulek

Tab. 1: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje platné do 19. 12. 2018 [8]	17
Tab. 2: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje platné od 20. 12. 2018 do 31. 12. 2024 [8].....	17
Tab. 3: Charakteristické emise NO _x podle technologie spalování paliva bez aplikovaných opatření [25].....	27
Tab. 4: Složení hnědého uhlí hp1 135	30
Tab. 5: Prvkové složení paliva.....	31
Tab. 6: Naměřené hodnoty v závislosti na teplotě při oxyfuel spalování	38
Tab. 7: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin.....	38
Tab. 8: Určené hodnoty emisního faktoru	39
Tab. 9: Naměřené hodnoty v závislosti na teplotě při spalování se vzduchem	39
Tab. 10: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin.....	40
Tab. 11: Určené hodnoty emisního faktoru	40
Tab. 12: Naměřené hodnoty v závislosti na přebytku kyslíku při oxyfuel spalování.....	41
Tab. 13: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin.....	41
Tab. 14: Určené hodnoty emisního faktoru	41
Tab. 15: Naměřené hodnoty v závislosti na přebytku kyslíku při spalování se vzduchem .	42
Tab. 16: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin.....	42
Tab. 17: Určené hodnoty emisního faktoru	43
Tab. 18: Naměřené hodnoty v závislosti na stupňovém přívodu kyslíku	43
Tab. 19: Určené hodnoty objemu primárního kyslíku a součinitele přebytku kyslíku	44
Tab. 20: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin.....	45
Tab. 21: Určené hodnoty emisního faktoru	45
Tab. 22: Naměřené hodnoty v závislosti na stupňovém přívodu vzduchu	47
Tab. 23: Určené hodnoty objemu primárního vzduchu a součinitele přebytku vzduchu ...	47
Tab. 24: Vypočítané hodnoty objemů vlhkých spalin.....	48
Tab. 25: Určené hodnoty emisního faktoru	48

Seznam příloh

Uvedené přílohy jsou v elektronické formě na CD.

Příloha 1: Naměřené hodnoty koncentrace NO_x v závislosti na teplotě v oxyfuel režimu

Příloha 2: Naměřené hodnoty koncentrace NO_x v závislosti na teplotě ve vzduchovém režimu

Příloha 3: Naměřené hodnoty koncentrace NO_x v závislosti na koncentraci kyslíku ve spalinách v oxyfuel režimu

Příloha 4: Naměřené hodnoty koncentrace NO_x v závislosti na koncentraci kyslíku ve spalinách ve vzduchovém režimu

Příloha 5: Naměřené hodnoty koncentrace NO_x v závislosti na stupňovém přívodu oksličovadla v oxyfuel režimu

Příloha 6: Naměřené hodnoty koncentrace NO_x v závislosti na stupňovém přívodu oksličovadla ve vzduchovém režimu