

Návrh technického řešení pro snížení obsahu NOx ve spalinách

The Proposal of Technical Solving for Decrease NOx Content in
Burnt Gas

Petr Večeřa

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Večeřa**
Osobní číslo: **A11251**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh technického řešení pro snížení obsahu NO_x ve spalinách**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte literární studii týkající se možností snížení obsahu NO_x ve spalinách.
2. Využijte poznatků pro analýzu všech možností snížení obsahu NO_x ve spalinách aplikovatelných na tepelný zdroj FK31.
3. Navrhňte řešení snížení obsahu NO_x ve spalinách s ohledem na vhodnost použití sekundárního dávkování čpavku nebo močoviny.
4. Provedte návrh možného řízení sekundárního dávkování technologických komponentů.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky v diskuzi a závěru práce.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **KADRNOŽKA, Jaroslav, OCHRANA, Ladislav. Teplárenství. Brno: CERM, 2001, 178 s. ISBN 80-720-4222-X.**
2. **IBLER, Zbyněk. Technický průvodce energetika. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.**
3. **RYBÍN, Miroslav. Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978, 414 s. ISBN 04-227-85.**
4. **SKÁLA, Zdeněk. Ekologie v energetice. 1. vyd. Brno: PC DIR, 1994, 141 s. ISBN 80-214-0477-9.**
5. **ČERNÝ, Václav, JANEBA, Břetislav, TEISLER, Jiří. Parní kotle. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 858 s. TK-0216.951**
6. **BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2003, 663 s. ISBN 80-730-0020-2**

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

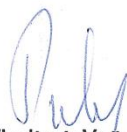
Datum zadání bakalářské práce: **28. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2014**

Ve Zlíně dne 28. února 2014


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na hledání možného řešení redukce emisí oxidů dusíku (NO_x) ve spalovacím procesu a způsobu jeho řízení na energetickém zařízení tepelného zdroje FK31 spalující fosilní paliva.

Součástí práce je teoretická studie kombinovaná s praktickými poznatky v oblasti řízeného snižování produkce emisí oxidů dusíku.

V první části je provedeno stručné seznámení se s vlivy oxidů dusíku na člověka, životní prostředí, emisní situací a nově platnými emisními limity v České republice. Jsou zde popsány palivové vlastnosti mající vliv na emise oxidu dusíku a mechanismy vzniku oxidů dusíku při spalování. Tato část je také zaměřena na metody ve snižování emisí oxidu dusíku a popisuje nejnovější způsoby jeho monitorování a řízení.

V druhé části jsou specifikovány návrhy možných způsobů řešení vedoucí k dosažení nízké produkce oxidů dusíku na stávajícím technologickém zařízení tepelného zdroje FK31. K zamezení vzniku oxidů dusíku (NO_x) během procesu hoření posuzují možnosti vlivu primárních opatření (např. o přípravu paliva a podmínky spalovacího procesu) a sekundární opatření, které spočívá v chemickém odstranění již vzniklých NO_x ze spalin. Důraz je zde kladen zejména na metody redukce emisí oxidů dusíku prostřednictvím technologie selektivní nekatalytické redukce (SNCR) při spalování.

Praktická část využívá poznatky aktuálního stavu na možné způsoby řízení dávkovacích komponentů s vazbou na monitorování vstupních i výstupních veličin.

Klíčová slova:

oxidy dusíku, snižování emisí, vlastnosti oxidů dusíku, snižování oxidů dusíku, spalování, SCR (selektivní katalytická redukce), SNCR (selektivní nekatalytická redukce), teplotní okno, DeNO_x (denitrogenizace), stechiometrie, tepelný zdroj, bilance, optimalizace, přenos.

ABSTRACT

The work is focused on searching a possible solution of reduction the emissions of Nitrogen oxides (NO_x), in the combustion and its method of control on the energy device of the heat source FK31, burning the fossil fuels.

Part of this work is a theoretical study, combined with practical knowledge in the field of controlled reduction of production of emission of Nitrogen oxides .

In the first part, there is a brief introduction of the effects of Nitrogen oxides on humans, the environment, the situation of emission and the newly applicable emission limits in the Czech Republic. There are described the fuel characteristics having an effect on the emissions of Nitrogen oxides and the mechanisms of formation of Nitrogen oxides during combustion. This part is also directed to methods of reducing Nitrogen oxides emissions and describes the latest methods of monitoring and control.

In the second part, there is specified the suggestions for possible ways of solution for achieving low production of Nitrogen oxides in the existing process equipment, heat source FK31. To avoid the formation Nitrogen oxides (NO_x) during the combustion, I assess the possibility to influence the primary measures (eg fuel preparation and conditions of the combustion) and secondary measures, which lies in the chemical removal of already existing NO_x from the flue gas. Placing the emphasis mainly on methods of reducing Nitrogen oxides emissions through technology non-catalytic selective reduction (SNCR), during combustion.

Practical part uses the knowledge of the current state on possible ways to control the dosing components, linked to the monitoring of input and output variables.

Keywords:

Nitrogen oxides, reduction of emissions, properties of oxides of nitrogen, reducing nitrogen oxides, combustion, NO , NO_2 , NO_x , SCR (selective catalytic reduction), SNCR (selective non-catalytic reduction), thermal window, DeNO_x (denitrogenation), stoichiometric, heat source, balance, optimization, transmission.

Poděkování, motto

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Dagmar Janáčové CSc. za odborné vedení, užitečné rady a praktické připomínky při řešení jednotlivých kroků. Děkuji společnosti Alpiq Generation (CZ) s.r.o. Teplárna Zlín za materiály, které mi byly ke zpracování této práce poskytnuty. V neposlední řadě děkuji také mojí rodině za všestrannou podporu během mého studia.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 HLAVNÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY	12
1.1 MECHANISMUS VZNIKU EMISÍ A JEJICH VLASTNOSTI	12
2 LEGISLATIVA ČR A EMISNÍ LIMITY	14
2.1 LEGISLATIVA.....	14
2.2 EMISNÍ LIMITY.....	14
3 OXID DUSÍKU	16
3.1 DRUHY OXIDŮ DUSÍKU	16
3.2 NEBEZPEČNOST OXIDŮ DUSÍKU NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	16
4 FAKTORY VZNIKU NO_x	18
4.1 TVORBA NO _x VE SPALOVACÍCH PROCESECH.....	18
4.2 MECHANISMY VZNIKU NO _x	18
4.2.1 Vznik palivových NO	19
4.2.2 Vznik termických NO	20
4.2.3 Vznik promptních NO.....	21
4.2.4 Vznik NO ₂	22
4.3 TECHNOLOGICKÉ PŘÍČINY TVORBY NO _x	23
4.4 OXIDACE NO NA NO ₂ V ATMOSFÉRE	23
5 METODY SNIŽOVÁNÍ TVORBY NO_x	24
5.1 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ	24
5.2 SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ	26
5.3 MOŽNÁ RIZIKA OPATŘENÍ DENOX	29
6 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ PROCESU	30
6.1 SYSTÉM MONITOROVÁNÍ	30
6.2 METODY MODELOVÁNÍ PROCESU	31
6.3 MATEMATICKÝ MODEL TEPELNÉHO ZDROJE.....	32
6.4 ŘÍZENÍ PROCESU	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
7 PROVOZ TECHNOLOGICKÉ JEDNOTKY	42
7.1 POPIS TECHNOLOGICKÝCH ČÁSTÍ TEPELNÉHO ZDROJE FK31	42
7.2 POPIS FUNKCE TEPELNÉHO ZDROJE FK31	44
7.3 EMISNÍ PODMÍNKY PROVOZU TEPELNÉHO ZDROJE FK31	46
7.4 POPIS ZPŮSOBU MĚŘENÍ KONCENTRACE NO _x	47
8 ANALÝZA MOŽNOSTÍ SNIŽENÍ NO_x NA TEPELNÉM ZDROJI FK31	48
8.1 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ	51
8.1.1 Rozdělení využitých primárních opatření	52
8.2 SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ	53
8.2.1 Redukce NO _x využitím selektivní nekatalytické redukce (SNCR)	53
8.2.2 Redukce NO _x využitím selektivní katalytické redukce (SCR).....	54

9	TECHNICKÉ ŘEŠENÍ.....	55
9.1	NÁVRH PRIMÁRNÍCH OPATŘENÍ.....	55
9.2	NÁVRH SEKUNDÁRNÍCH OPATŘENÍ.....	55
9.3	POSOUZENÍ VHODNOSTI POUŽITÍ DÁVKOVÁNÍ ČPAVKU A MOČOVINY	56
9.4	NÁVRH ŘÍZENÍ DÁVKOVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH KOMPONENTŮ	56
9.5	DISKUZE.....	58
	ZÁVĚR	59
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK.....	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Světová poptávka po elektrické energii stále roste a podle výroční zprávy Mezinárodní agentury pro energii (IEA) vzroste za 25 let o 70% [1]. Hlavním důvodem tohoto nárůstu je rychlý vědeckotechnický vývoj naší společnosti a tím nutnosti zabezpečení neustálého přísunu energie.

Energie tudíž patří mezi nejdůležitější faktory ovlivňující tento budoucí rozvoj. Na její dostupnosti a stabilitě je závislý nejen hospodářský, ale také ekonomický růst civilizace. V přímé úměře se stále větším rozvojem roste také spotřeba. I když zájem o alternativní zdroje je rostoucí, přesto tyto zdroje nedokážou pokrýt celou spotřebu. Dominantní roli proto stále mají tepelné elektrárny, pro které se hledají nová ložiska fosilních paliv.

Ve výrobě energie tvoří největší část proces spalování, který pokrývá bezmála osmdesát procent světové potřeby energie. Zbylou část zahrnují alternativní výrobní procesy, jako jsou sluneční, větrné, vodní, ale i atomové energie apod. Tyto procesy zanechávají na životním prostředí jen minimální následky a jsou považovány za čisté a optimální řešení. Z těchto zdrojů však nelze pokrýt celkovou spotřebu, To je důvodem, proč stále převládá sofistikovaná výroba energií spalovacím procesem, která má oproti alternativním zdrojům daleko větší a v některých případech i nevratné následky na životním prostředí.

Důvodem je, že spalování je spojeno s volným vypouštěním škodlivých látek do ovzduší. Jedná se především o emise látek oxidů síry (SO_x), oxidů dusíku (NO_x), uhelnatých oxidů (CO_x) a tuhých znečišťujících látek (TZL). Neregulované vypouštění těchto škodlivých látek do ovzduší má velký vliv na kvalitu životního prostředí.

V rámci Národního programu snižování emisí České republiky je potřeba se zaměřit především na emise oxidů dusíku, kdy je potřeba do roku 2016 dosáhnout u všech spalovacích zařízení emisního stropu 200 mg/m^3 .

To předpokládá u stávajících zdrojů řadu úprav spalovacího procesu a rekonstrukcí, kdy se budou uplatňovat nejen primární opatření na snížení emisí oxidu dusíku, ale i sekundární opatření pro odstranění již vzniklého oxidu dusíku ze spalin.

Veškeré sekundární metody jsou založeny na reakci iontů roztoku močoviny (NH_2)₂CO s oxidem dusnatým (NO) za vzniku molekulárního dusíku (N_2) a vody (H_2O). U této metody existuje několik modifikací a ty zde budou posouzeny [2].

Pozorněji se zabývám rozborem technologie využívající vlastnosti selektivní nekatalytické redukce SNCR (Select Non-Catalytic Reduction), pomocí níž lze snadno docílit snížení emisí NO_x . Tato technologie spočívá ve vstřikování roztoku močoviny (NH_2)₂CO do teplotního okna $850\text{-}1050^\circ\text{C}$ ve spalovací komoře.

Cílem práce je získání vyšší výtěžnosti tepelného zdroje při dokonalejším spalování a současně snižovat emise NO_x . Dále také provedení návrhu a doporučení na optimální způsob eliminace NO_x pro cirkofluidní spalovací proces. U zvoleného technologického řešení definovat požadované monitorování veličin a navrhnou způsob řízení dávkování technologických komponentů.

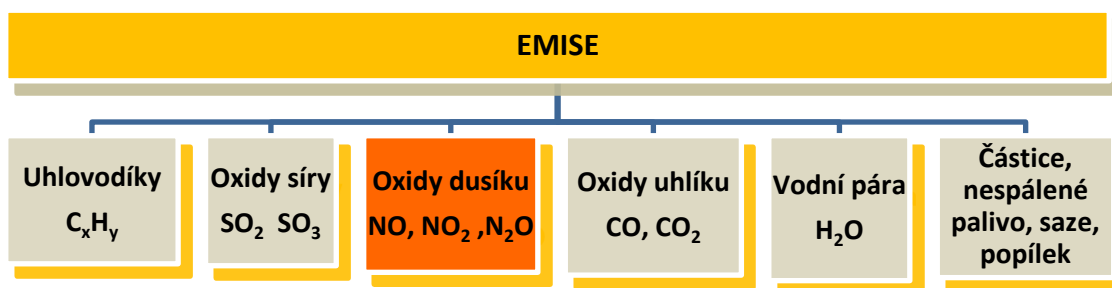
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HLAVNÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY

Bohužel máme v současné době co dočinění se stále rostoucími exhalacemi, produkcí tuhých i kapalných odpadů z technologických výrob bez rozdílu. Snahou je vzniklé znečišťující látky eliminovat. Ne jinak je tomu i u emisí, protože to má dopad nejen na zdraví obyvatel, ale i veškerých živočichů.

Zdroje emisí jsou velmi různorodé a jsou klasifikovány dle různých hledisek, při čemž jsou zohledněny faktory, jako je množství, vliv na okolí, technologie a způsob jejich vzniku apod. Při spalování fosilních paliv, ale i dřeva či biomasy vznikají znečišťující látky. V posledních letech se proces spalování, včetně jeho řízení, velmi zkvalitnil, kde důraz je kladen nejen na ekonomický, ale i na ekologický provoz [2].

Hlavní znečišťující látky vznikající ze spalovacích zařízení lze rozdělit dle obr. 1, bez ohledu na to, zda jsou nevýznamné (voda H_2O), nevyhnutelné (oxid uhličitý CO_2) nebo jsou škodlivé pro člověka nebo pro přírodu (oxid dusný NO , uhlovodíky C_xH_y).



Obrázek 1 – Rozdělení emisí ze spalovacích zařízení [3]

Emise mohou vznikat z různých příčin, především z prvků obsažených v palivu nebo okysličovadlu, z nedokonalého spalování a ze sekundárních reakcí. Ve výše uvedené formě se do ovzduší dostávají v důsledku uvolnění tepla obsaženého v palivu spalovacím procesem. Palivo (tuhé nebo kapalně) se skládá ze tří základních složek, které tvoří tzv. **hrubý rozběr** paliva. Jsou to hořlavina (část palivové hmoty obsahující uvolnitelné teplo), voda obsažená v palivu a inertní popeloviny v palivu [4].

1.1 Mechanismus vzniku emisí a jejich vlastnosti

Mechanismus vzniku základních znečišťujících látek při spalování a jejich působení v ovzduší lze zjednodušeně popsat následujícím způsobem.

K tvorbě oxidu uhelnatého (dále jen CO) vede podstechiometrické spalování, což je spalování se sníženým přístupem kyslíku O_2 k palivu, dále pak kratší doba setrvání a nedokonalé promísení paliva a kyslíku. Uhlík shoří jen částečně na oxid uhličitý (dále jen CO_2). Výraznou a nebezpečnou vlastností CO jsou široké meze zápalnosti (a tím také výbušnosti), které se pohybují v mezích 12,5 až 75 % objemové koncentrace ve vzduchu.

Síra existuje jako nežádoucí doprovodný prvek většiny fosilních paliv, vyskytuje se i v alternativním palivu. V případě českých uhlí je oxidovatelné síry v palivu v průměru

95%. Vyskytuje se v různých formách. Účastní se spalování a ve vzduchu probíhá postupně její oxidace [2].

Oxidy dusíku vznikají při spalovacích procesech z dusíku obsaženého ve vzduchu. Tvoří se všude tam, kde jsou v průmyslových procesech potřebné vysoké teploty. Pod pojmem oxidy dusíku se nejčastěji rozumí oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO₂. Oba oxidy se označují sumárním symbolem NO_x. Vedle nich se mohou v malém množství vyskytovat i další oxidy dusíku, jimiž jsou oxid dusný N₂O, oxid dusitý N₂O₃ a oxid dusičný N₂O₅ [5].

Tvorba dioxinů a furanů může proběhnout jako homogenní reakce plynných fází. Je známo 75 polychlóvaných dibenzodioxinů (PCDD) a 135 polychlóvaných dibenzofuranů (PCDF). Tvoří se třemi známými způsoby:

- Přímou tepelnou přeměnou látek obsažených v palivu, které způsobují tvorbu PCDD a PCDF
- K jejich postupné tvorbě dochází při nedokonalém spalování z prvků uhlíku C, vodíku H, kyslíku O, chlóru Cl a bromu Br.
- Při nízkoteplotních spalovacích procesech [3].

Tabulka 1: Vlastnosti vybraných emisí [3]

Název	Ozn.	Vznik	Vlastnosti
Oxid uhelnatý	CO	Při nedokonalém spalování uhlíku	Bezbarvý, bez zápach a nedráždivý plyn
Oxid uhličitý	CO ₂	Při spalování fosilních i organických paliv	Bezbarvý, nehořlavý, lehce kyselý plyn
Oxid siřičitý	SO ₂	Převážně při spalování paliv obsahujících síru	Bezbarvý, štiplavý plyn
Oxid sírový	SO ₃	V přítomnosti vzduchu na oxidované SO ₂	< 17 °C ledová pevná látka (kyselina sírová), bod varu při 45°C
Oxid dusnatý	NO	Z organicky vázaného dusíku a vzdušného dusíku	Hnědorudý produkt spalování
Oxid dusičitý	NO ₂	Kyslík ve spojení s NO při nízkých teplotách	Hnědorudý, silně jedovatý produkt spalování
Oxid dusný	N ₂ O	Zatím jsou nejasné principy vzniku	Narkotické účinky
Uhlovodíky	C _x H _y	Při nedokonalém spalování	Chemické sloučeniny uhlovodíku
Chlorované aromatické uhlovodíky: Dioxiny a furany	PCDD PCDF	Vznik při de-novo-Synthese ¹⁾	Silně toxické látky, škodlivé životnímu prostředí
Částice, prach	TZL	U téměř všech pevných paliv	Jsou charakterizovány svým chemickým složením a velikostí

¹⁾Katalytická reakce chloridů kovu a chlóru v chemicky vázané formě za přítomnosti elementárního uhlíku a kyslíku při nedokonalém spalování (teploty 255 a 400 °C)

2 LEGISLATIVA ČR A EMISNÍ LIMITY

2.1 Legislativa

V České republice jsou emisní limity dány zákonem o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. [6]. Tento zákon nahradil zákon č. 86/2002 Sb., a také zrušil prakticky veškeré prováděcí předpisy podle zákona č. 86/2002 Sb. [7]. Hlavním cílem zákona o ochraně ovzduší je zásadní zlepšení kvality ovzduší.

Zákon rozděluje zdroje emisí do několika skupin a určuje jim limity emisí jak pro tuhé znečišťující látky, tak pro oxid siřičitý, oxid uhelnatý a oxidy dusíku. Dále upravuje povolené množství vypouštěných znečišťujících látek do ovzduší a stanovuje způsob a frekvenci měření emisí.

Česká republika se po vstupu do EU řídí emisními limity dle směrnice Evropského Parlamentu a rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezení znečištění) [8]. Směrnice stanovuje s platností od 1.1.2016 přísnější emisní limity pro spalovací zařízení s tepelným příkonem nad 50 MW.

V českém právním řádu byla tato směrnice zapracována Vyhláškou 415/2012 Sb. [9].

2.2 Emisní limity

Emisní limity udávají nejvyšší přípustné hodnoty množství emisí znečišťujících látek vypouštěných ze zdrojů znečišťování ovzduší (spalovací zařízení apod.). Jsou stanoveny na základě nejlepších dosažitelných prostředků, vedoucích k omezení emisí s důsledným používáním moderní techniky a jejího maximálního provozního využívání [3].

Hodnoty emisních limitů znamenají koncentraci NO_x v suchém plynu za normálních stavových podmínek (101,32 kPa, 0° C).

Hodnoty emisních limitů stávajících zdrojů pro NO_x (v přepočtu na NO₂) při spalování tuhých paliv (obsah kyslíku 6 %), kapalných a plyných paliv (obsah kyslíku 3 %). Hodnoty jsou vyjádřeny v mg/m³ [9].

Tabulka 2: Specifické emisní limity platné do 31.12.2015

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg/m ³]							
	50-100MW				> 100-300MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo	2000	600	100	250	1200	600	100	250
Plynné palivo obecně	35	200	5	100	35	200	5	100
Zemní plyn	35	200	5	100	35	200	5	100

Pozn. Tyto limity jsou pro spalovací stacionární zdroje, kterým bylo vydáno první povolení provozu, nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, před 27.11.2002 nebo pro něž byla podána kompletní žádost o první povolení provozu před tímto datem a byly uvedeny do provozu nejpozději 27. 11. 2003 [9].

Svým rozsahem a nastavením přísnějších emisních limitů od roku 2016 již tato vyhláška předpokládá u stávajících zdrojů řadu úprav spalovacího procesu a rekonstrukcí, kdy se budou uplatňovat nejen primární opatření na snížení emisí oxidu dusíku, ale i sekundární opatření odstraněním již vzniklého oxidu dusíku ze spalin. V mnoha případech je tato vyhláška vnímána jako ekonomická hrozba pro uhelnou energetiku.

Tabulka 3: Specifické emisní limity platné od 1.1.2016

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg/m ³]							
	50-100MW				100-300MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo	400	600	30	250	250	200	25	250
Biomasa	200	300	30	250	200	250	20	250
Plynné palivo obecně	35	200	5	100	35	200	5	100
Zemní plyn	35	100	5	100	35	100	5	100

Pozn. Limity platné pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu nad 50 MW, pro něž byla podána kompletní žádost o první povolení provozu, nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, před 7. 1. 2013 a byly uvedeny do provozu nejpozději 7. 1. 2014 [9].

Cílem režimu je snížit emise oxidů dusíku do ovzduší ze stacionárních spalovacích zařízení. Prakticky ve všech případech to vyvolává nutnost instalace účinných denitrifikačních zařízení. Pro mnoho uhelných zdrojů to bude dále znamenat nutnost investice do nového zařízení.

3 OXID DUSÍKU

Předmětem této práce je problematika hledání možností ve snižování emise NO_x na technologickém zařízení s fluidním spalovacím ložem, a proto budou popsány pouze faktory mající vliv na produkci těchto emisí.

3.1 Druhy oxidů dusíku

Oxid dusnatý - NO - je bezbarvý, ve vodě málo rozpustný plyn. Vzniká přímou syntézou z prvků nebo oxidací amoniaku. Uvolňuje se také při rozpouštění kovů v kyselině dusičné.

Oxid dusičitý - NO₂ - je konečným produktem oxidace NO kyslíkem. Ve vodě se rozpouští za vzniku směsi kyselin dusičné a dusité.

Oxid dusný - N₂O - (rajský plyn) je bezbarvý plyn příjemného zápachu. Pro své narkotické účinky se používá v lékařství. Ve vodě se nerozpouští.

Oxid dusitý - N₂O₃ - nemá praktický význam, je anhydridem kyseliny dusité.

Oxid dusičný - N₂O₅ - relativně stálá tuhá bezbarvá látka. Při zahřívání se explozivně rozkládá. Má silně kyselý charakter a je anhydridem kyseliny dusičné [5].

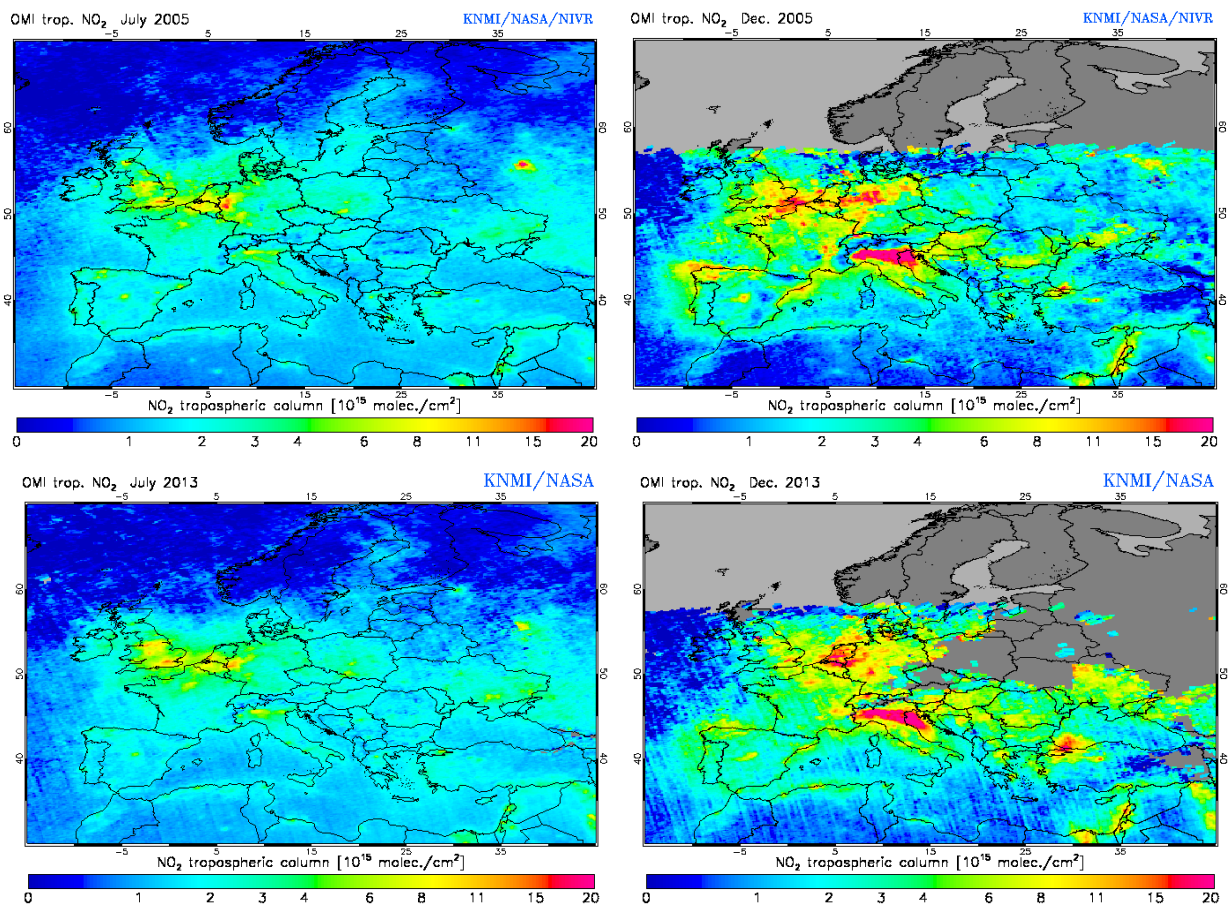
3.2 Nebezpečnost oxidů dusíku na životní prostředí

Oxid dusičitý (NO₂) je společně s oxidy síry součástí takzvaných **kyselých dešťů**, které mají negativní vliv například na vegetaci a stavby a dále okyselují vodní plochy a toky.

Oxid dusnatý (NO) je také **jedním ze skleníkových plynů**. Kumuluje se v atmosféře a společně s ostatními skleníkovými plyny absorbuje infračervené záření zemského povrchu, které by jinak uniklo do vesmírného prostoru, a přispívá tak ke vzniku tzv. skleníkového efektu a následně ke globálnímu oteplování planety [10],[11].

Pro porovnání škodlivosti je koncentrace 0,085 mg/m³ NO₂ je srovnatelná s 0,5 mg/m³ SO₂ a tuhých částic a s 5 mg/m³ CO, přitom se škodlivé účinky **SO₂ a NO_x se sčítají**.

Vysoké koncentrace oxidů dusíku působí negativně na rostliny. Oxidy dusíku společně s oxidy síry tvoří kyselé deště, které poškozují živé rostliny a půdu. Vdechování vysokých koncentrací oxidů dusíku může vážně ohrozit zdraví člověka. Celkově lze tedy na základě shrnutí jejich negativních působení konstatovat, že jsou to látky se širokým spektrem negativních dopadů jak zdravotních, tak především dopadů na globální ekosystém [2].



Obrázek 2 – Koncentrace NO₂ v ovzduší nad Evropou v roce 2005 a 2013 [10]

Uvedené snímky jsou získané z veřejné satelitní databáze TEMIS, monitorující koncentraci NO₂ v troposféře. Z vybraných snímků evropského kontinentu je patrné, že koncentrace je nejvyšší v průmyslových oblastech a je závislá na ročním období. Vysoké koncentrace jsou znázorněny červenou barvou.

4 FAKTORY VZNIKU NO_x

Oxidy dusíku vznikají oxidací dusíku v palivech vzdušným kyslíkem při teplotě přes 600°C. Při vyšších teplotách nad 1300°C se tvoří oxidy dusíku přímo ze vzduchu. Nejdříve vzniká oxid dusnatý NO, který následně oxiduje vzdušným kyslíkem na oxid dusičitý NO₂ [12].

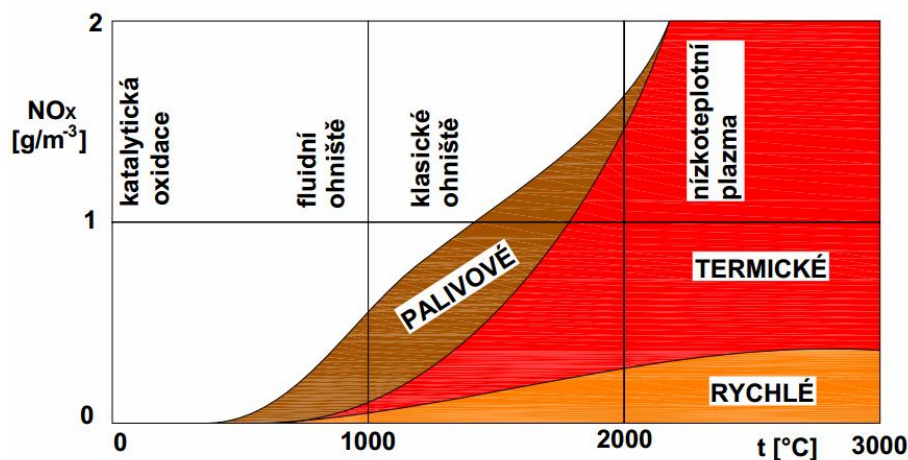
4.1 Tvorba NO_x ve spalovacích procesech

Hlavními faktory, které ovlivňují tvorbu NO_x jsou [11],[13]:

- **druh paliva** - různé typy paliv mají rozdílný vliv na tvorbu NO_x
- **konstrukční uspořádání topeniště resp. hořáků** - obsah NO_x ve spalinách je řízen jednak výběrem hořáků, ale také konstrukcí kotle
- **rozložení teplot v plameni** - se stoupající teplotou vzrůstá množství NO_x.
reakční doba - obsah NO vzrůstá s delší dobou pobytu hořlavé směsi v závislosti na přebytku vzduchu
- **poměr vzduch/palivo (přebytek spalovacího vzduchu)** - přebytek vzduchu v ohništi má za následek větší koncentraci NO_x ve spalinách

4.2 Mechanismy vzniku NO_x

Vytváření oxidu dusíku probíhá třemi různými způsoby. Jedná se jednak o tzv. **promptní** (okamžité, viz obr. 2) oxidy dusíku vznikající v nejvyšších teplotách v počáteční fázi hoření (jejich podíl z celkové emise NO_x je minimální), dále pak o oxidy dusíku **termické**, které vznikají v oblasti teplot nad 1200 °C z dusíku přítomného v okysličovadle (ve vzduchu) a následně pak v oblasti nejnižších teplot oxidy dusíku **palivové**, které vznikají z dusíku obsaženého v hořlavině paliva [2].



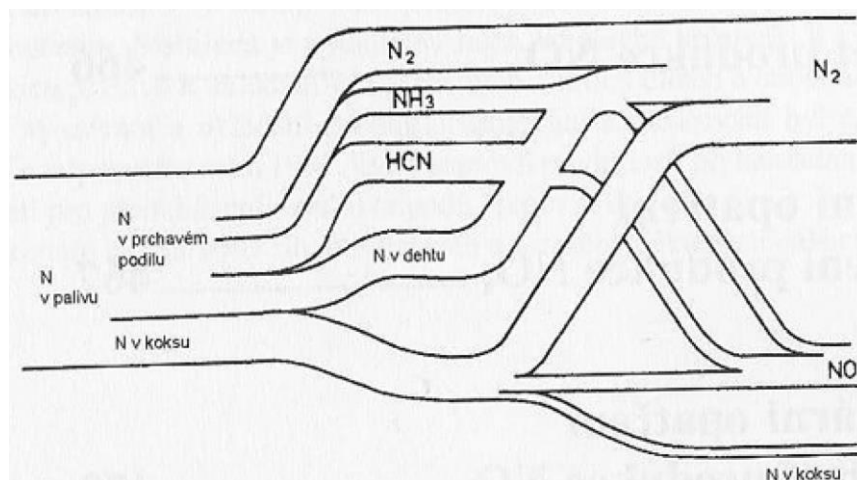
Obrázek 3 – Tvorba jednotlivých typů oxidů dusíku v závislosti na teplotě. [14]

4.2.1 Vznik palivových NO

Má-li se o tuhém palivu rozhodnout, zda je vhodné pro spálení v určitém typu spalovacího zařízení (ohniště), je zapotřebí znát jeho charakteristické vlastnosti. Všechny druhy tuhých paliv, které se vyskytují v přirozeném (surovém) stavu, se skládají ze tří základních složek dle *hrubého rozboru* (kapitola 2.) Hořlaviny a nehořlavé části paliva, kterou tvoří voda a popel (popeloviny), ty se označuje také jako balast nebo přítěž. Obě tyto složky snižují výhřevnost paliva [4].

Hořlavá část paliva se skládá z uhlíku, vodíku, síry, dusíku a kyslíku. Z těchto prvků se účastní vlastního spalování, tj. exotermických reakcí se vzdušným kyslíkem, pouze uhlík, vodík a síra. Kyslík z hořlaviny působí jako okysličovadlo. Jedinou složkou, která se neúčastní spalování, je dusík [4].

V první fázi hoření tuhých paliv se dusík uvolňuje s prchavým podílem a dále zůstává v tuhém zbytku – koksu. Při běžném spalování vzniká největší podíl NO_x: 60 až 80 %, z dusíku uvolněného z paliva prchavým podílem. Nad teplotou 900°C je produkce palivových NO_x prakticky nezávislá na teplotě, produkce je však výrazně závislá na koncentraci molekulárního kyslíku v zóně hoření. Proto v blízkosti plamene je důležité co nejvíce omezit obsah O₂ vzhledem ke stechiometrii paliva [15].



Obrázek 4 – Přeměna palivového dusíku [15]

Palivové NO_x vznikají následnou oxidací dusíkatých složek paliva a hrají významnou roli při spalování hnědého uhlí – v této fázi je produkce termických NO_x malá. Při teoretické oxidaci veškerého obsahu dusíku v palivu na NO, bude při spalování uhlí výsledná koncentrace palivových NO_x ve spalinách 2-4 g.m⁻³ [15].

Poměr ukazující, jak velká část palivového dusíku ve skutečnosti oxiduje na NO je udáván *stupněm konverze* ν a je vyjádřen vztahem:

$$\nu = N_A/N_B \quad (1-01)$$

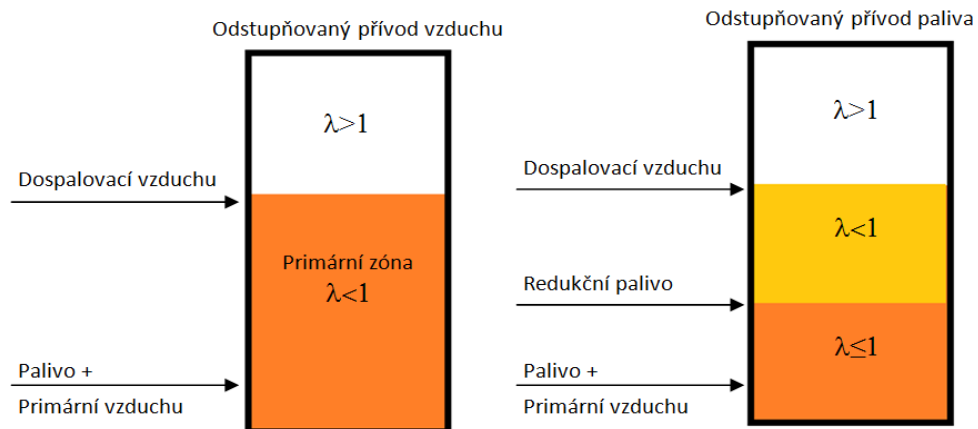
Kde: N_A dusík v palivu přeměněný na NO
 N_B dusík organicky vázaný v palivu

a platí: $\nu < 1$

Stupeň konverze roste s přebytkem vzduchu a klesá s rostoucím obsahem dusíku v palivu.

Doporučení k omezení tvorby palivových NO_x [16]:

- snížení koncentrace molekulárního kyslíku v zóně hoření.
- snížení maximálních teplot (přináší méně výrazný efekt)
- odstupňovaný přívod vzduchu – vytvoření redukční atmosféry v zóně hoření
- odstupňovaný přívod paliva



Obrázek 5 – Potlačení vzniku palivového NO_x

Součinitel přebytku vzduchu λ udává informaci o příslušném směšovací poměru vzduchu a paliva.

Pokud je například ve směsi obsaženo více paliva, což odpovídá bohaté směsi – tak spalovací proces pracuje s nedostatkem vzduchu. Koeficient přebytku vzduchu $\lambda < 1$.

Dochází-li však k přivádění menšího množství paliva a relativně většího množství vzduchu, jedná se pak o chudou směs. Ve spalovacím prostoru je následně přebytek vzduchu a příslušný koeficient přebytku vzduchu je $\lambda > 1$.

4.2.2 Vznik termických NO

Termický (vysokoteplotní) NO vzniká za vysokých teplot oxidací dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu. Tyto procesy mají vysokou energetickou bariéru => jsou výrazně závislé na teplotě a na době zdržení ve spalovacím prostoru. Ve významném množství se začíná tvořit až kolem teplot 1200°C za oxidačních podmínek [15],[17].

Řetězový dvouokruhový mechanismus tvorby termických NO_x popsal **Zeldovič** pomocí radikálových reakcí v prostředí s přebytkem vzduchu [13],[17]:



z toho plyne



Zeldovič tento mechanismus rozšířil a zohlednil také prostředí s přebytkem paliva [13]:



Rychlost a tvorbu termických NO_x vyjádřil Zeldovič dle následujícího mechanismu [17]:

$$C_{\text{NO}} = k_1 \cdot e^{-k_2/T} \cdot C_{\text{N}_2} \cdot \sqrt{C_{\text{O}_2}} \cdot \tau \quad [\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3] \quad (4.05)$$

Kde:

k_1 a k_2 ... jsou konstanty rychlosti reakce

Při spalování zemního plynu byly naměřeny tyto konstanty:

$$k_1 = 5,74 \cdot 10^{14} \quad [\text{m}^3/\text{gmol}^{-\text{s}}]$$

$$k_2 = 6447,65 \quad [\text{m}^3/\text{gmol}^{-\text{s}}]$$

$$T \dots \dots \dots \text{teplota} \quad [\text{K}]$$

$$\tau \dots \dots \dots \text{doba reakce} \quad [\text{s}]$$

$$C_{\text{N}_2} \dots \dots \dots \text{koncentrace dusíku} \quad [\%]$$

$$C_{\text{O}_2} \dots \dots \dots \text{koncentrace kyslíku} \quad [\%]$$

Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že koncentrace vysokoteplotních NO_x je závislá na absolutní teplotě $[T]$, koncentraci dusíku $[\text{N}_2]$, době reakce (prodlení) $[\tau]$ a na odmocnině koncentrace kyslíku $[\text{O}_2]^{0,5}$.

Na tvorbu termických NO_x má výrazný vliv

- maximální teplota
- doba trvání reakce, kterou lze charakterizovat rychlostí poklesu teploty v zóně maximálních teplot

Doporučení k omezení tvorby termických NO_x [17]:

- snížením celkové teplotní úrovně,
- snížením lokálních teplotních maxim
- snížením obsahu kyslíku v oblasti maximálních teplot v ohništi

Cílem postupného spalování je dostat reagující látky do zóny nižších teplot a to ještě dříve, než bylo dosaženo rovnováhy.

4.2.3 Vznik promptních NO

Promptní (okamžitý) NO vzniká oxidací molekulárního dusíku na okraji plamene za účasti uhlovodíkových radikálů. Tvorba NO je závislá na přebytku vzduchu a na teplotě.

V průmyslových spalovacích zařízeních je však podíl takto vzniklého NO zanedbatelný. Promptní NO vzniká ve větší míře při teplotách nad 2000°C.

Také bylo experimenty prokázáno, že NO_x vznikají i při hoření stechiometrické vzducho-metanové směsi, jejíž doba hoření je o řád menší, než doba potřebná k dosažení rovnovážné koncentrace NO.

Vznik je charakteristický

- krátkodobostí procesu
- malou závislostí na teplotě plamene
- výraznou závislostí na součiniteli přebytku vzduchu s maximem v oblasti, blízké stechiometrickým poměrům

Vznik je omezen na úzkou část fronty plamene - svázán s hořením uhlovodíků a paliv obsahujících dusík [14],[17].

Jednotlivé mechanismy vzniku NO_x se podílejí na jeho celkové produkci v závislosti na teplotě plamene, viz *obrázek 3*.

4.2.4 Vznik NO₂

Obsah NO₂ ve spalinách kotlů před jejich vypuštěním komínem do ovzduší je nízký v porovnání s obsahem NO. Obvykle to je jen několik málo procent z celkového obsahu N₂ ve spalinách. Pokud vznikne malé množství NO₂, je to důsledek prudkého ochlazení spalin [12],[17].

4.3 Technologické příčiny tvorby NO_x

Průběh spalování lze popsat jako nestálý proces, jenž neprobíhá kontinuálně a lze ho ovlivňovat a tím také současně ovlivňovat tvorbu NO_x, které s tím přímo souvisejí. Mezi významné faktory mající vliv na tvorbu oxidů dusíku patří tyto závislosti [11],[12].

Produkce NO_x v závislosti na spalovací teplotě

Při teplotách do 1200°C (spalování ve fluidní vrstvě) vznikají při spalování paliv obsahujících dusík především rychlé a palivové NO_x. Při teplotách obvyklých pro práškové ohniště 1200 - 1700°C se tvoří NO_x všemi třemi mechanismy.

Ve spalovacím procesu lze teplotou ovlivnit tvorbu oxidu dusíku tak, že se stoupající teplotou vzrůstá množství NO_x vzniklého oxidací atmosférického dusíku i oxidací palivového dusíku.

Produkce NO_x v závislosti na reakční době

Doba pobytu hořlavé směsi v prostoru ohniště je úměrná tvorbě NO. Obsah NO vzrůstá s delší dobou pobytu hořlavé směsi v topeništi a je závislý na přebytku vzduchu.

Produkce NO_x v závislosti na poměru vzduchu a paliva

Při pokusech prováděných na práškovém ohništi a v průmyslových kotlích bylo zjištěno, že větší koncentraci NO_x ve spalinách má za následek přebytek vzduchu v ohništi.

Produkce NO_x v závislosti na složení paliva

Důsledky vzniku palivového NO_x jsou podrobně popsány v kapitole 4.2.1 *Vznik palivových NO*. Pro doplnění jen uvádím, že největší koncentraci při spalování vykazuje uhlí, nejnižší koncentraci plyn a v dnešní době stále častěji používaná biomasa.

Molekulární dusík má větší vazebnou energii ve srovnání s molekulami paliva, díky tomu organické dusíkaté látky tvoří oxidy dusíku snadněji než molekulární dusík [12].

Produkce NO_x v závislosti na konstrukci zařízení

Obsah NO_x ve spalinách je závislý také na konstrukci kotle, uspořádáním teplosměnných ploch a řídí se i výběrem hořáků.

4.4 Oxidace NO na NO₂ v atmosféře

Hlavní roli hraje atmosférický ozon – je rozhodující pro dokysličení NO na několikanásobně toxičtější NO₂.

Reakce ozonu s NO probíhá zhruba 105 x rychleji, než oxidace molekulárním kyslíkem, tak dochází k rychlé spotřebě ozonu, který např. zcela chybí v kouřové vlečce.

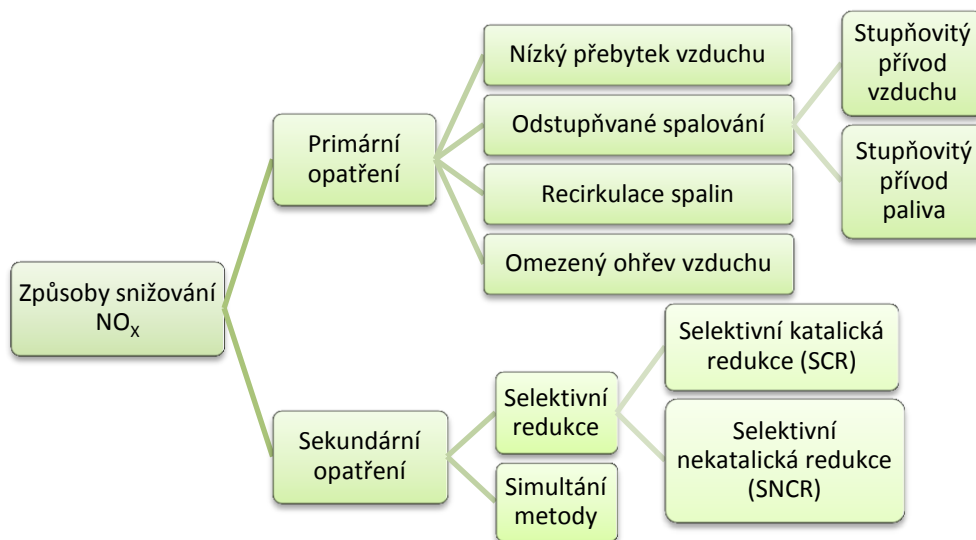
Oxidace NO na NO₂ nikdy není úplná a maximální koncentrace NO₂ v ovzduší je dána množstvím ozonu [11],[12].

5 METODY SNIŽOVÁNÍ TVORBY NO_x

Možností v odstranění oxidů dusíku existuje několik. Obecně se dělí na dvě velké kategorie, podle způsobu jak ke snížení emisí dochází.

Primární opatření, které funguje na principu potlačení vzniku NO_x již při spalovacím procesu.

Sekundární opatření, které spočívá v eliminování již vzniklých NO_x ze spalin. Obě kategorie mají rozdílné účinnosti.



Obrázek 6 – Metody snižování NO_x

5.1 Primární opatření

Primární opatření omezují tvorbu NO_x již v ohništi a v průběhu spalovacího procesu. Lze jich dosáhnout za pomoci různých technických opatření. Tyto jednotlivá opatření lze při posouzení charakteru spalování a jeho následných úprav, označit za jednoduchá a lze je navzájem kombinovat. Dle principů lze rozlišovat následující metody primárního opatření.

Metoda s nízkým přebytkem vzduchu

Při spalování paliva se sníženým přebytkem spalovacího vzduchu můžeme dosáhnout nejen nižšího obsahu NO_x ve spalinách, ale i zvýšení účinnosti. Tato metoda je navíc konstrukčně velmi jednoduchá [16],[17].

Metoda postupného přívodu vzduchu

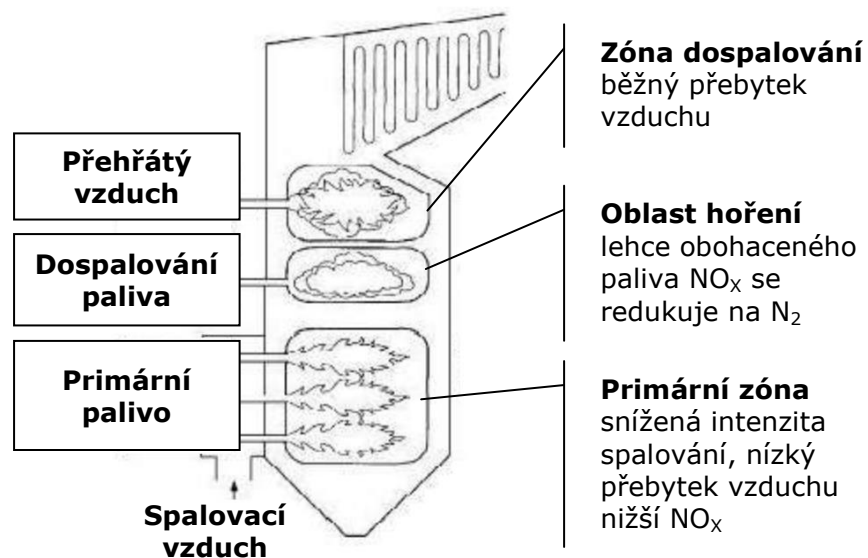
Odstupňování vzduchu je založeno na rozdělení ohniště minimálně do dvou spalovacích zón. V *primární* zóně spalování je nedostatek kyslíku a v *sekundární* zóně spalování je jeho přebytek, který se využívá k dohořívání paliva. Při takto zvětšeném objemu plamene je spalování úplné.

Podstechiometrické spalování v primární zóně nejen, že potlačuje tvorbu palivových NO_x, ale také částečně snižuje tvorbu termických NO_x. Důvodem je snížení teplotního maxima

v ohništi. Postupné zavádění vzduchu do topeniště je poměrně levný způsob snížení emisí NO_x . Výhodou je, že nezvyšuje spotřebu energie spalovacího zařízení a nemá při náležitém provedení žádné nepříznivé účinky [17].

Metoda postupného přívodu paliva

Postupné dávkování paliva, označované také jako opětovné spalování (dospalování) je založeno na tvorbě různých zón hoření v topeništi při postupném přivádění paliva a vzduchu, jak lze vidět na obr. 7. Účelem této metody je redukovat oxidy dusíku, které se již vytvořily zpět na dusík [12].



Obrázek 7 – Postupné spalování paliva ve třech zónách hoření (dospalování) [17]

Metoda s využitím recirkulace spalin

Jedná se o opatření zavádějící spaliny zpět do spalovacího vzduchu a tím snižuje obsah kyslíku. Ve spalovací zóně má toto omezení za následek přímé ochlazení plamene. Tímto se omezí přeměna dusíku vázaného v palivu a také tvorba tepelných NO_x [13].

Metoda sníženého předehřátí spalovacího vzduchu

Tato metoda má největší význam na tvorbu NO_x hlavně u systémů spalujících plyn a olej. U těchto paliv je hlavním mechanismem podílejícím se na produkci NO_x tvorba tepelných NO , která je přímo závislá na teplotě spalování. U stávajících kotlů se nevyužívá, protože má za následek snížení účinnosti kotle [13],[17].

Aplikování primárních opatření

Aplikovaná primární opatření zaměřená na odstranění NO vždy ovlivňují místní provozní podmínky a druh spalovaného paliva. Před použitím těchto opatření je proto nutné posoudit jejich vhodnost a efektivnost.

Tabulka 4: Aplikace primárního opatření [15]

Metoda	Výhody	Nevýhody	Snížení tvorby NO _x o [%]	
			Průměrné	Minimální
Provoz se sníženým přebytkem vzduchu	Jednoduché, možné zvýšení účinnosti, použitelné u všech typů spalovacích zařízení	vzrůst emisí CO možné zanášení struskování, koroze, zvětšení mechanického nedopalu, snížení stability hoření	16 až 20	25 až 30
Provoz s nižší teplotou ohřátého vzduchu	jednoduché	možné snížení účinnosti snížení stability hoření použitelné pouze u některých kotlů a paliv	5 až 20	10 až 30
Vytvoření redukčních zón a) spodní hořáky pracují s bohatou směsí, horní s chudou směsí b) vyřazení horních hořáků z provozu a jejich použití jako vzduchových trysek	Jednoduché jednoduché	pouze u větších kotlů s hořáky v horizontálních rovinách nebezpečí nedopalu možné pouze u některých kotlů nebezpečí nedopalu	15 až 25 20 až 20	25 až 35 30 až 40
Stupňování přívodu paliva	účinné, žádný negativní vliv na spalovací zařízení efektivní v širokém rozsahu výkonů	nutnost přesné regulace nákladné, možné jen u kotlů větších výkonů	20 až 35	35 až 50
Recirkulace spalin	Účinné zejména u zemního plynu	nákladné, snížení stability hoření, změna sdílení tepla v kotli	15 až 30	Uhlí 20 Olej 45 Zemní plyn 70

5.2 Sekundární opatření

Metoda sekundárního opatření spočívá v odstraňování již vzniklého NO_x ze spalin. Hlavním technologickým principem je vstřikování chemických reagentů (čpavku, močoviny nebo dalších reagentů), které redukují NO_x ve spalinách na molekulární dusík, tzv. denitrogenizace (DeNO_x).

Sekundární opatření lze rozdělit na:

- selektivní katalytickou redukci (SCR)
- selektivní nekatalytickou redukci (SNCR)
- simultánní metody

Mohou být aplikovány samostatně nebo v kombinaci s primárním opatřením [18].

Selektivní katalytická redukce (SCR)

U selektivní katalytické redukce probíhá chemická reakce na katalyzátorech při optimálních teplotách 170 až 510°C. Jako reakční činidlo se používá čpavek NH₃ nebo močovina [17].

Hlavní faktory správné účinnosti SCR:

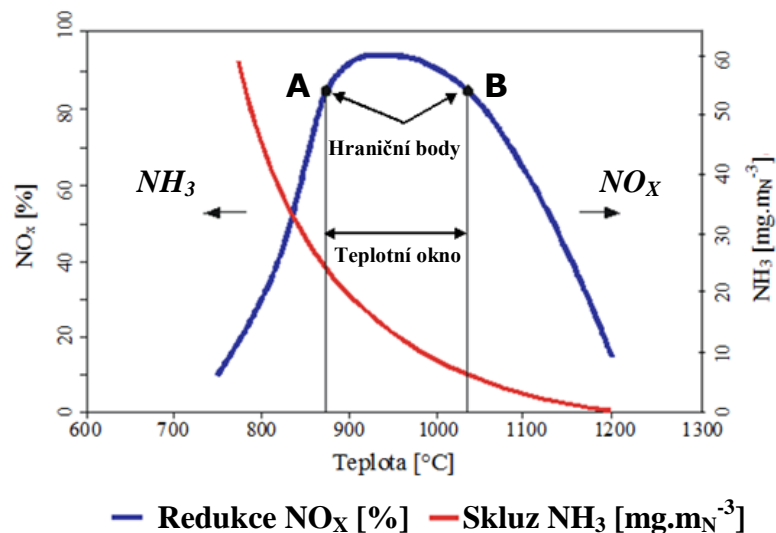
- vlastnosti katalyzátoru, zejména aktivní ploše
- objemová rychlost spalin
- teplota spalin
- stechiometrie
- koncentrace O₂
- rozdíl koncentrací NO_x před a za katalyzátorem

Při selektivní katalytické redukci jsou nežádoucí látky ze spalin odvedeny s velmi vysokou účinností, která činí 80 až 90 %. Pro tuto technologii jsou však nevýhodou vysoké pořizovací náklady a vyšší koncentrace NH₃ v popílku [18].

Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

Reakce SNCR probíhá ve formě nástřiku roztoku močoviny, nebo čpavkové vody do spalovacího procesu při teplotách mezi 850 až 1 100 °C. Toto teplotní rozmezí se nazývá **teplotní okno** (TO) a je značně závislé na použitém reakčním činidle (čpavek, močovina, hydroxid amonný). Nejvhodnějším místem pro nástřik činidla se nachází mezi spalovací komorou kotle a ekonomizérem [18],[19].

Výhodou nekatalytické redukce je, že probíhá *bez účasti katalyzátorů* a tím je prostorově nenáročná a má nízké investiční náklady. Účinnost takovéto konverze NO_x na N₂ je cca 90% [17].



Obrázek 8 – Závislost účinnosti SNCR na teplotě spalin [17],[18],[19]

Při nižší teplotě než je optimální ($t < \text{bod A}$), je účinnost DeNO_x nízká, ve spalinách uniká NH₃. Při vyšších teplotách než teplotní okénko ($t > \text{bod B}$), se činidla (NH₃, močovina) oxidují na NO. Na vrcholu křivky mezi body A a B jsou optimální podmínky pro redukci NO_x [18],[19].

Simultánní metody

Simultánní metody mohou ze spalin odstraňovat NO_x a SO_x současně a dělí se dle způsobu aplikace na metody s vypírkou mokrou a suchou.

Suché vypírky: Používají se pro odstranění NO_x a SO_x pomocí koksu s NH₃ redukcí NO.

Mokrě vypírky:

- **oxidační** používají vhodnou sloučeninu pro snadnou absorpci zoxidovaného NO na NO₂
- **absorpční** používají vhodnou vypírací tekutinu na odstranění NO ze spalin, které se následně redukuje na dusík [15].

Simultánní metody se stále vyvíjí a existuje jich celá řada. Důvodem je, že používají k odstranění NO_x a SO_x ze spalin různé kombinace.

Tabulka 5: Aplikace sekundárního opatření [15],[18]

Metoda	Snížení tvorby NO _x o [%]	Parametry provedení		Výhody / nevýhody		
		parametr	hodnota			
selektivní katalytická redukce (SCR)	85 až 90	Provozní teplota	170-300°C 350-450°C	Výhody: Vhodné pro širokou škálu paliv Konverze NO _x nevytváří vedlejší složky znečištění		
		Redukční činidlo	Čpavek, močovina			
		Poměr NH ₃ /NO _x	0,8-1,0			
				Únik NH ₃	< 5 mg/Nm ³	Nevýhody: Strhávání čpavku Zvýšená koncentrace NH ₃ v popílku Vysoké investiční náklady Tvorba síranu amonného na zařazeném vybavení
				Dosažitelnost	> 98 %	
				Spotřeba energie (% elektrické)	0,5%	
				Tlaková ztráta v katalyzátoru	400-1000 Pa	
selektivní nekatalytická redukce (SNCR)	30 až 50	Provozní teplota	850-1050°C	Výhody: Snadná montáž Nenáročnost na prostor Nízké investiční náklady		
		Redukční činidlo	Čpavek, močovina			
		Poměr NH ₃ /NO _x	1,5-2,5			
				Únik čpavku	< 10 mg/Nm ³	Nevýhody: Vysoká citlivost na rovnoměrné rozložení reakčního činidla Vysoká citlivost na teplotu Chybná volba činidla a místa vstřikování = větší problémy s korozi
				Dosažitelnost	> 97 %	
				Spotřeba energie (% elektrické)	0,1—0,3%	
				Tlaková ztráta v katalyzátoru	400-1000 Pa	

Aplikování sekundárních opatření

Cílem všech technik redukce NO_x je dosažení co nejvyšší účinnosti při co nejnižší spotřebě reagentu a současně při dosažení co nejnižší zbytkové hladiny čpavku. Toho lze dosáhnout dávkováním správného množství reagentu při správné teplotě spalin [16],[18]. V tabulce 5 jsou uvedeny základní vlastnosti a parametry sekundárních opatření.

5.3 Možná rizika opatření DeNO_x

Technická rizika řešení z uvedených metod nejsou v současné době známa, jedná se o použití ověřené technologie a současně technologie v rámci BAT (Best Available Techniques – nejlepší dostupné techniky) [18],[19].

6 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ PROCESU

Z ekonomického hlediska je pro provozovatele výhodnější maximalizovat možnosti primárních opatření a sekundární opatření využívat jen v nezbytně nutném rozsahu. Prostředkem k dosažení tohoto cíle je optimalizace procesu spalování, která nevyžaduje doplňkové konstrukční úpravy na technologii a je neefektivnější.

Spalování fosilních paliv na tepelných zdrojích je v současné době řízeno především podle pevně nastavených závislostí v rámci regulace parního výkonu kotle. Závislosti žádaných hodnot akčních členů jsou většinou odladěny empiricky podle odhadnutých funkcí s jejich předpokládanými závislostmi nebo ze zkušeností s manuálním řízením [20].

Uvedený způsob řízení neumožňuje adaptivní přizpůsobení parametrů regulátoru k proměnným fyzikálním a chemickým podmínkám souvisejícími s primárními opatřeními. Snížená kvalita řízení se projevuje zejména nesouměrným spalováním uhlí ve spalovací komoře, jejímž důsledkem jsou nesouměrná teplotní pole a koncentrační pole O_2 i CO po výšce spalovacího prostoru [18]. Tato pole mají vliv mimo jiné na zvýšené koncentrace NO_x [20].

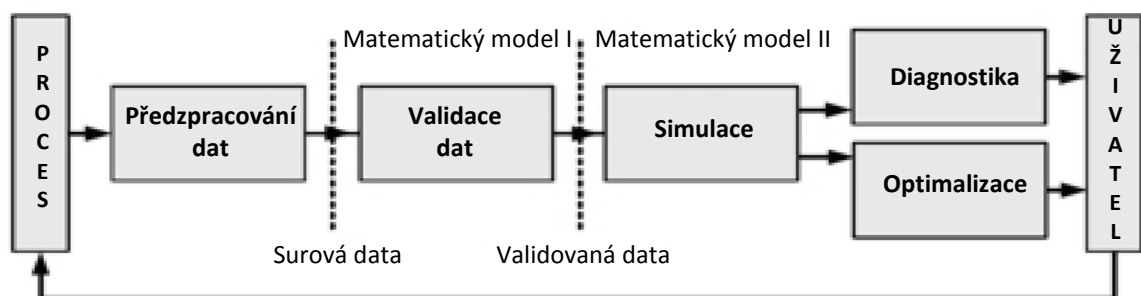
Proces eliminace NO_x prostřednictvím sekundárních opatření lze řídit jednak adaptivními metodami regulace s predikcí budoucího chování systému nebo pomocí pevně nastavených závislostí regulace. V druhém případě může být nevýhodou nižší kvalita řízení, ale i negativní vliv na účinnost tepelného zdroje a dodatečné finanční náklady.

6.1 Systém monitorování

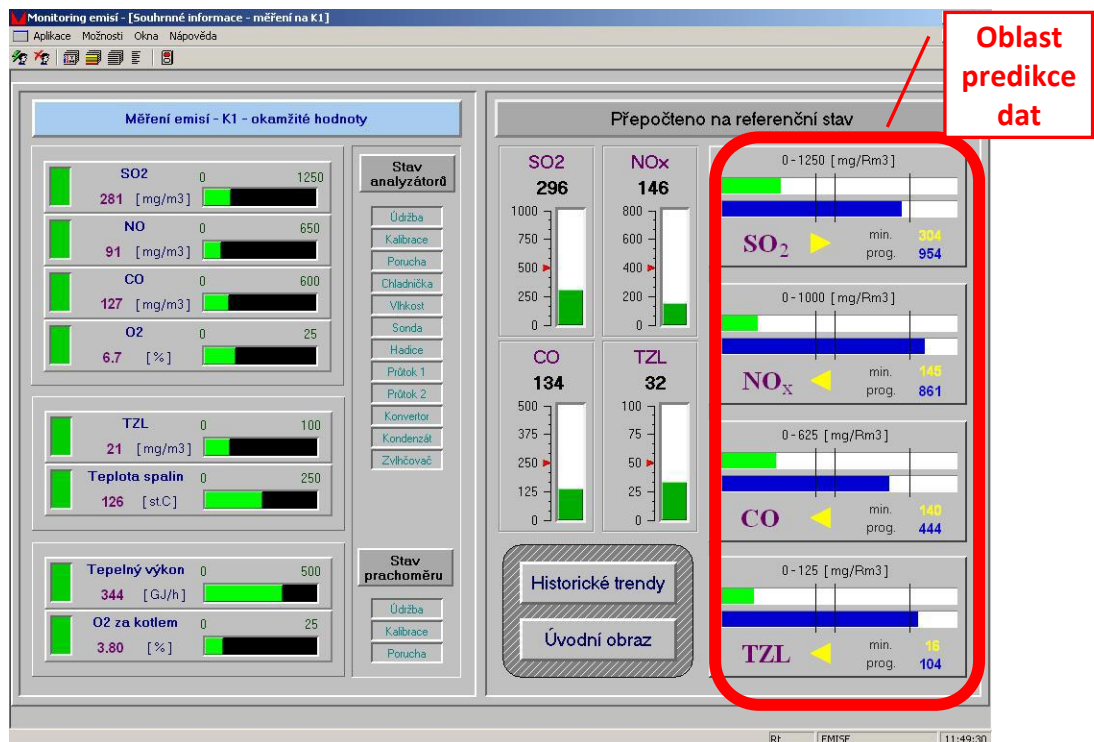
Systém k monitorování stavu je důležitý především z hlediska proměnných podmínek provozu, například kvality uhlí, kvality mletí mlýnů, teploty nasávaného vzduchu, charakteristik klapek přiváděného vzduchu, parametry napájecí vody, apod., díky kterým dochází často ke zhoršené kvalitě řízení.

Běžně využívaný je systém pro monitorování a vyhodnocování emisí, jehož cílem je poskytnout operátorovi tepelného zdroje informace a doporučení, jak ovlivňovat spalovací proces, aby byly emise škodlivin co nejnižší [20].

Ke sledování emisí je využíván systém kontinuálního monitorování emisí tzv. Continuous Emissions Monitoring System (CEMS), který pomocí vlastních hardwarových zařízení monitoruje průběhy mnoha technologických proměnných [21].



Obrázek 9 – Implementace monitorovacího a optimalizačního řešení



Obrázek 10 – CEMS systém aplikovaný na tepelném zdroji FK31

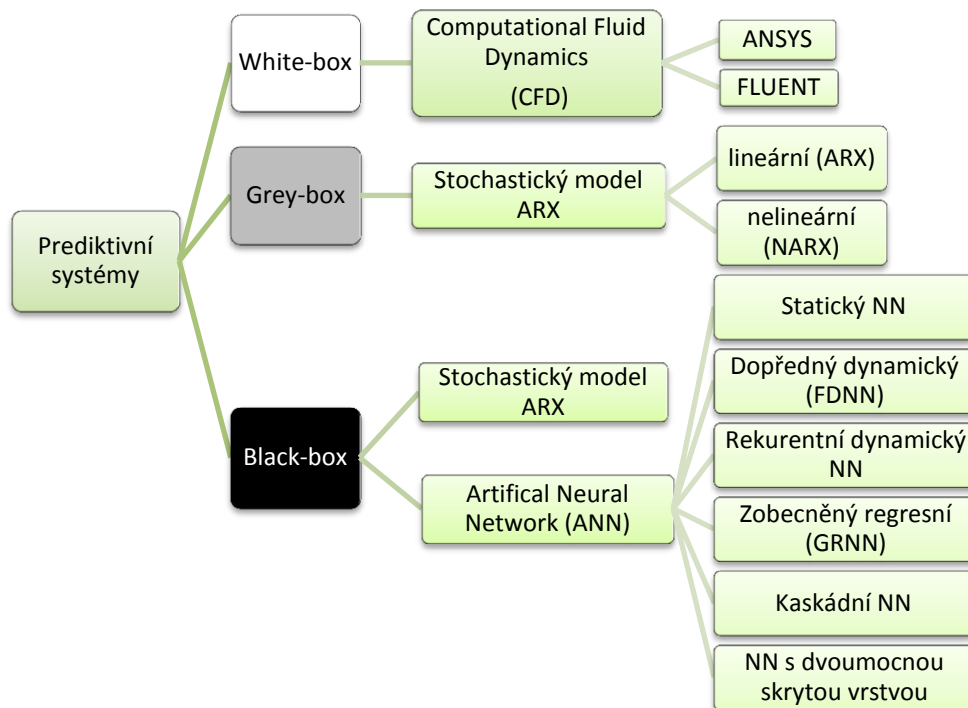
Mimo modelovací proces CEMS je v dnešní době vyvíjeno mnoho nových metod založených například na neuronových sítích, stochastické identifikaci systému nebo nejnovější typ metody monitorování emisí, tzv. Predictive Emissions Monitoring Systems (PEMS). Systém PEMS využívá modelovací nástroje, jako jsou neuronové sítě, stochastické modely, apod. a lze jím predikovat emise v reálném čase (on-line) na základě znalosti (měření) definovaných parametrů kotle, které jsou srovnávány s koncentracemi emisí.

Nejčastěji systémem PEMS implementuje metody umělých neuronových sítí s třívrstvou strukturou. Tyto sítě mají jednoduchou architekturu, poskytují přesné výsledky a lze je predikci výstupu relativně rychle naučit [20].

6.2 Metody modelování procesu

Pro velké tepelné zdroje spalující fosilní paliva je modelování procesu pomocí matematicko-fyzikální analýzy velmi složitý problém. Možnými metodami řešení se zabývá mnoho odborných týmů a specialistů. Výsledkem jsou nové způsoby přístupu k pravděpodobnostnímu modelování.

Jedním z přístupů jsou modely **white-box**, které přímo zpracovávají matematický popis a odkrývají fyzikální a chemické děje. Pro svoji náročnost jsou však značně pomalé a vhodné spíše ke konstrukčním výpočtům. Modely typu **grey-box** jsou obdobné s modely white-box, ale využívají dvě součinné cesty pro fyzikální modelování a identifikaci. Nejpoužívanější metodou je **black-box** identifikace. U těchto modelů není výstupní informace založena na přesně popsáných dějích, ale dokáží z velkého objemu historických dat se „naučit“ a optimalizovat provozní data. Přehled modelů je na obrázku 11 [20].



Obrázek 11 – Přehled prediktivních modelovacích systémů [20]

Pzn.: **NN** [Neural Network] – model neuronové sítě

6.3 Matematický model tepelného zdroje

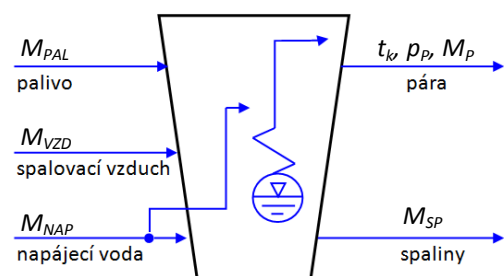
Tepelný zdroj je typickým příkladem vícerozměrové regulované soustavy se složitou strukturou vnitřních vazeb.

Bilanční rovnici při výrobě páry tvoří především množství tepla uvolněné spalováním paliva ve spalovací komoře a odebrání tepla v páře. Celkový matematicko-fyzikální popis je realizován zejména pomocí hmotových a tepelných bilancí, ale některé vztahy mezi parametry vstupů a výstupů kotle jsou popisovány také pomocí empirických relací. Tepelné ztráty jsou v bilancích technologických celků kotle zanedbány [20].

Každá tepelná bilance musí být při součtu všech tepelných toků (do i ze systému) rovna nule. Změna přírůstku nebo úbytku tepelné energie v průběhu dynamické změny vyžaduje vyrovnávání vzájemných součtu tepelných toků také s dynamikou změny v soustavě akumulované tepelné energie [22], [23].

Popis přenosové matice

Na zjednodušeném technologickém schématu bubnového kotle uvedeném na obrázku 12 jsou znázorněny pouze významně působící prvky. Na tyto prvky působí nevlastní akční veličiny dle matice $G_s^+(s)$ prostřednictvím regulace více jednorozměrných regulačních obvodů.

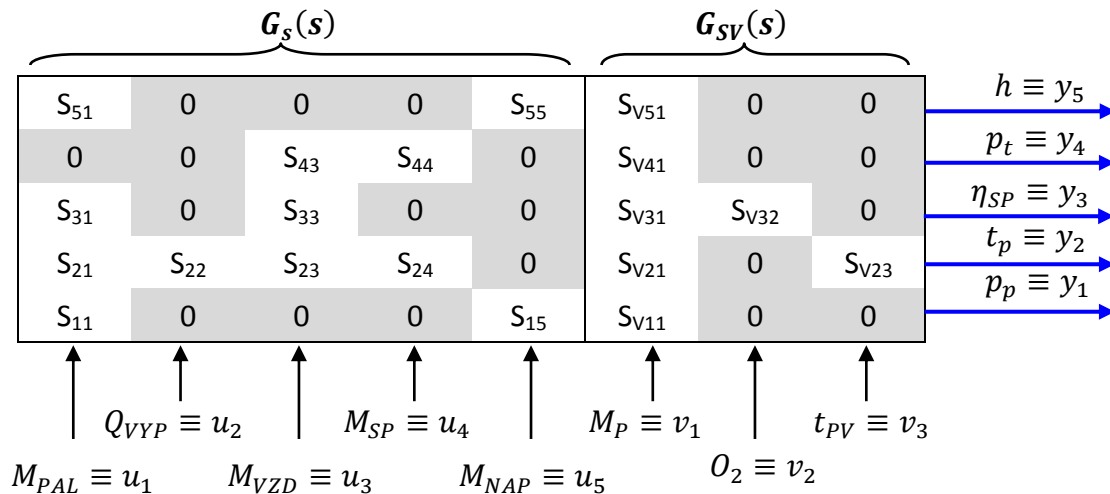


Obrázek 12 – Technologické schéma bubnového kotle [22].

Celková přenosová matice regulační soustavy $G_S^+(s)$ (bubnového parního kotle) lze vyjádřit vztahem (6.01):

$$G_S^+(s) = [G_s(s) ; G_{SV}(s)], \quad (6.01)$$

kde $G_s(s)$ je přenosová matice akčních veličin a $G_{SV}(s)$ představuje přenosovou matici poruchových veličin.



Obrázek 13 – Celková přenosová bilance kotle [22]

Vektor **regulovaných veličin** $y(t)$ je tvořen prvky

$$y(t) = (p_p, t_p, \eta_{SP}, p_t, h), \quad (6.02)$$

kde jednotlivé prvky značí:

- p_p - tlak páry na výstupu kotle,
- t_p - teplota přehřáté páry,
- η_{SP} - hospodárnost spalovacího procesu,
- p_t - podtlak ve spalovací komoře,
- h - výška hladiny v bubnu.

Vektor **akčních veličin** $u(t)$ je tvořen prvky

$$u(t) = (M_{PAL}, Q_{SP}, M_{VZD}, M_{SP}, M_{NAP}), \quad (6.03)$$

kde jednotlivé prvky značí:

- M_{PAL} - hmotnostní tok paliva,
- Q_{VYP} - teplo přivedené z výparníku do přehříváku,
- M_{VZD} - hmotnostní tok palin,
- M_{SP} - hmotnostní tok spalovacího vzduchu,
- M_{NAP} - hmotnostní tok napájecí vody.

Vektor **poruchových veličin** $v(t)$ je tvořen prvky

$$v(t) = (M_P, O_2, t_{PV}), \quad (6.04)$$

kde jednotlivé prvky značí:

- M_P - hmotnostní tok přehřáté páry,
- O_2 - obsah kyslíku ve spalínách,
- t_{PV} - teplota páry před vstřikem.

Pro řízení zjednodušeného příkladu uvedeného na *obrázku 12* je vhodné použít vícerozměrný regulační obvod s paralelně pracujícími jednorozměrovými rozvětvenými regulačními obvody (JRRO). Jednotlivé prvky z vektoru regulovaných veličin rov. (6.02) pak tvoří **regulované veličiny** každého samostatného JRRO, z čehož vyplývá, že každý řádek celkové přenosové matice $G_S^+(s)$ představuje jednorozměrovou regulovanou soustavu s alternativními signály pro rozvětvení.

Na *obrázku 13* je použito pro nevýznamné prvky nevlastních akčních veličin matice $G_S(s)$ jejich nahrazení 0 v jednotlivých řádcích.

Významné prvky působení nevlastních akčních veličin matice $G_S^+(s)$ jsou zahrnuty do regulace prostřednictvím rozvětvení JRRO [22].

Bilanční popis obecného modelu tepelného zdroje

Popis bilančního modelu teplot a koncentrací ve spalínách mezi jednotlivými technologickými celky je základním hodnotícím parametrem a znázorněním matematicko-fyzikálních vazeb na tepelném zdroji.

Celkové bilanční schéma modelu obecného fluidního kotle je sestaveno na *obrázku 14* se všemi základními technologickými celky (bilančními uzly). Jako podklad pro zpracování tepelné bilance kotle a pro zavedení některých vztahů sloužila především publikace [20].

Nejdůležitější částí bubnového kotle fluidního typu je spalovací komora, na kterou jsou funkčně navázány jednotlivé technologické celky. Ve spalovací komoře probíhá hlavní část přeměny energií.

• Příprava paliva

Zdrojem energie je přiváděné palivo, které do spalovací komory vstupuje z technologického celku na přípravu paliva. Hmotová bilance tohoto uzlu je

$$\dot{m}_{PAL} + \dot{m}_{PS}^{CYK} + \dot{m}_{FVZ}^{PAL} = \dot{m}_{PS}, \quad (6.05)$$

kde jednotlivé prvky značí:

- \dot{m}_{PAL} - hmotnostní tok paliva,
- \dot{m}_{PS}^{CYK} - hmotnostní tok spalín,
- \dot{m}_{FVZ}^{PAL} - hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu v palivové cestě,
- \dot{m}_{PS} - hmotnostní tok palivové směsi.

Skladba paliva, jak je uvedena v kapitole 4.2.1. je především voda a sušina. Sušinu lze dále dělit na popelovinu a hořlavinu. Proto pro hmotnostní tok paliva do kotle můžeme psát

$$\dot{m}_{PAL} = \dot{m}_{PAL}^{daf} + \dot{m}_{Ak} + \dot{m}_{Wk}, \quad (6.06)$$

kde jednotlivé prvky značí:

- $\dot{m}_{PAL^{daf}}$ - hmotnostní tok hořlaviny do kotle,
- \dot{m}_{Ak} - hmotnostní tok popela do kotle,
- \dot{m}_{Wk} - hmotnostní tok vody v palivu do kotle.

• Spalovací komora a výparník

Ve spalovací komoře dochází k uvolnění energie z přiváděného paliva a k jejímu předání do přes teplosměnné plochy do parovodní části výparníku. Část energie (\dot{Q}^{VYP}) je parovodní straně předána ve spalovací komoře (většinou do výparníku), část tepla uniká ve formě tzv. odsálaného tepelného toku (\dot{Q}_{SAL}^{SK}) a je předána parovodní straně v následující teplosměnné ploše.

Protože v bubnu nedochází k výměně tepla mezi pracovními médii, není zde buben bilancován.

Hmotové bilance tohoto uzlu jsou popsány vztahy (6.07) a (6.08)

$$\dot{m}_{PS} + \dot{m}_{TVZ} + \dot{m}_{SVZ} + \dot{m}_{PVZ}^{REC} + \dot{m}_{FVZ}^{SK} = \dot{m}_{SP}^{SK} + \dot{m}_{LOZ}, \quad (6.07)$$

$$\dot{m}_{NV}^{EKO} = \dot{m}_P^{SK} + \dot{m}_{ODL}, \quad (6.08)$$

kde jednotlivé prvky značí:

- \dot{m}_{TVZ} - hmotnostní tok terciálního vzduchu,
- \dot{m}_{SVZ} - hmotnostní tok sekundárního vzduchu,
- \dot{m}_{PVZ}^{REC} - hmotnostní tok primárního vzduchu s recirkulovanými spalinami,
- \dot{m}_{FVZ}^{SK} - hmotnostní tok přisávaného falešného vzduchu ve spalovací komoře,
- \dot{m}_{SP}^{SK} - hmotnostní tok spalin na výstupu z ohniště včetně popílku,
- \dot{m}_{LOZ} - hmotnostní tok ložového popela,
- \dot{m}_{NV}^{EKO} - hmotnostní tok napájecí vody do výparníku,
- \dot{m}_P^{SK} - hmotnostní tok páry na výstupu z výparníku.
- \dot{m}_{ODL} - hmotnostní tok odluhu a odkalu z bubnu.

Tepelný tok paliva lze vyjádřit

$$\dot{Q}_{PAL} = \dot{m}_{PAL} + \dot{Q}_i^k, \quad (6.09)$$

kde jednotlivé prvky značí:

- \dot{Q}_i^k - výhřevnost primárního vzorku paliva.

Odsálaný tepelný tok, který je předán parovodní straně až v následující teplosměnné ploše a který je mimo energie přivedené v palivu závislý na geometrických parametrech kotle, lze vyjádřit

$$\dot{Q}_{SAL}^{SK} = \frac{S^{PR}}{S_K} (\dot{m}_{SP}^{NSP} \cdot i_{SP}^{NSP} + \dot{m}_{FVZ}^{SK} \cdot i_{FVZ}^{SK} - \dot{m}_{SP}^{SK} \cdot i_{SP}^{SK}), \quad (6.10)$$

kde jednotlivé prvky značí:

$S^{PŘ}$ - plocha výstupního průřezu přehříváku,

S^K - plocha stěny kotle celková,

\dot{m}_{SP}^{NSP} - hmotnostní tok nechlazených spalin,

i_{SP}^{NSP} - měrná entalpie nechlazených spalin,

\dot{m}_{FVZ}^{SK} - hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do spalovací komory,

i_{FVZ}^{SK} - měrná entalpie přísávaného falešného vzduchu do spalovací komory,

i_{SP}^{SK} - měrná entalpie spalin ve výstupním průřezu ohniště včetně popílku.

• Přehřívák páry

Přehřívák je výměník tepla spaliny-pára, kde spaliny předávají páře teplo (\dot{Q}^{PP}). Součástí přehříváku je zaústěný vstřík vody z výstupu ekonomizéru pro regulaci teploty přehřáté páry. Vstupem do přehříváku je odsálaný tepelný tok z ohniště (\dot{Q}_{SAL}^{SK}).

Hmotové bilance přehříváku jsou popsány vztahy (6.11) a (6.12)

$$\dot{m}_{SP}^{SK} + \dot{m}_{FVZ}^{PP} = \dot{m}_{SP}^{PP}, \quad (6.11)$$

$$\dot{m}_P^{SK} + \dot{m}_{NVV}^{EKO} = \dot{m}_P^{PP}, \quad (6.12)$$

kde jednotlivé prvky značí:

\dot{m}_{FVZ}^{PP} - hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do přehříváku páry,

\dot{m}_{SP}^{PP} - hmotnostní tok spalin na výstupu z přehříváku páry,

\dot{m}_{NVV}^{EKO} - hmotnostní tok vstříkované vody,

\dot{m}_P^{PP} - hmotnostní tok přehřáté páry na výstupu z přehříváku páry.

• Ohřívák vody - ekonomizér (EKO)

Jedná se o výměník tepla spaliny-voda, kde spaliny předávají teplo do napájecí vody (\dot{Q}^{EKO}) na teplotu blízkou k syté páře. Z výstupu ekonomizéru je odebírána vstříková voda použitá k řízení teploty přehřáté páry.

Hmotové bilance ekonomizéru jsou popsány vztahy (6.13) a (6.14)

$$\dot{m}_{SP}^{PP} + \dot{m}_{FVZ}^{EKO} = \dot{m}_{SP}^{EKO}, \quad (6.13)$$

$$\dot{m}_{NAV}^{EKO} = \dot{m}_{NVV}^{EKO} + \dot{m}_{NV}^{EKO}, \quad (6.14)$$

kde jednotlivé prvky značí:

\dot{m}_{FVZ}^{EKO} - hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do ekonomizéru,

\dot{m}_{SP}^{EKO} - hmotnostní tok spalin na výstupu z ekonomizéru,

\dot{m}_{NAV}^{EKO} - hmotnostní tok vstupní napájecí vody,

\dot{m}_{NV}^{EKO} - hmotnostní tok výstupní napájecí vody z ekonomizéru.

- **Předeřívák vzduchu - LUVO** (z německého Luftvorwärmer)

Jedná se o výměník tepla spaliny-spalovací vzduch, který přenáší teplo (\dot{Q}^{LUVO}) ze spalin do do spalovacího vzduchu nasátého z prostoru kotelny či mimo prostor kotelny.

Hmotové bilance ohříváku vzduchu jsou popsány vztahy (6.15) a (6.16)

$$\dot{m}_{SP}^{EKO} + \dot{m}_{FVZ}^{LUVO} = \dot{m}_{SP}^{LUVO} + \dot{m}_{SP}^{REC}, \quad (6.15)$$

$$\dot{m}_{INVZ}^{LUVO} + \dot{m}_{OVZ}^{LUVO} = \dot{m}_{PVZ}^{LUVO} + \dot{m}_{VZ}^{LUVO}, \quad (6.16)$$

kde jednotlivé prvky značí:

\dot{m}_{FVZ}^{LUVO} - hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do ohříváku vzduchu,

\dot{m}_{SP}^{LUVO} - hmotnostní tok spalin na výstupu z ohříváku vzduchu,

\dot{m}_{SP}^{REC} - hmotnostní tok spalin na výstupu z ohříváku vzduchu pro recirkulaci,

\dot{m}_{INVZ}^{LUVO} - hmotnostní tok ohřívaného nasátého vzduchu z prostoru kotelny,

\dot{m}_{OVZ}^{LUVO} - hmotnostní tok ohřívaného nasátého vzduchu z venkovního prostoru,

\dot{m}_{PVZ}^{LUVO} - hmotnostní tok výstupního ohřívaného vzduchu pro primární vzduch,

\dot{m}_{VZ}^{LUVO} - hmotnostní tok výstupního ohřívaného vzduchu pro dělený vzduch.

- **Recirkulace vzduchu**

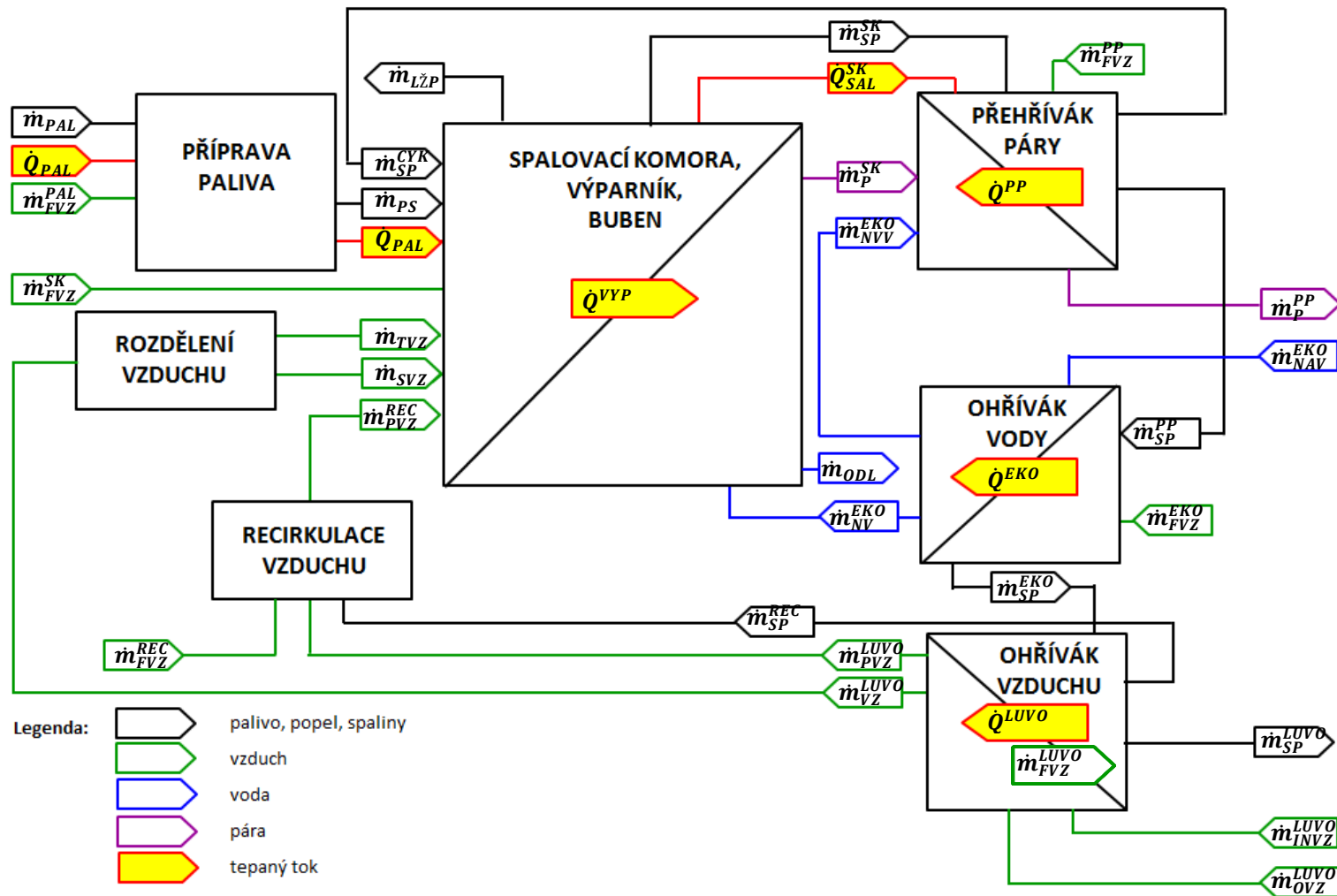
Hlavní primární vzduch je směšován s částí recirkulovaných spalin odvedených z prostoru zadního druhého tahu kotle a jsou zavedeny do prostoru vstupu primárního vzduchu. Recirkulované spaliny jsou využívány k chlazení fluidního lože a k následné redukci tvorby oxidů dusíku vlivem nízkého obsahu kyslíku.

Hmotová bilance recirkulace vzduchu je popsána vztahem (6.17)

$$\dot{m}_{SP}^{REC} + \dot{m}_{PVZ}^{LUVO} + \dot{m}_{FVZ}^{REC} = \dot{m}_{SP}^{REC}, \quad (6.17)$$

kde jednotlivé prvky značí:

\dot{m}_{FVZ}^{REC} - hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do recirkulátoru.



Obrázek 14 – Tepelné bilanční schéma fluidního kotle [20]

6.4 Řízení procesu

Základním cílem je pro tepelné zdroje zajištění stabilní a spolehlivé regulace výkonu. Požadavky potřebné k dosažení stability a spolehlivosti lze definovat následovně:

- Dodávka okamžitého výkonu v páře definovaných vlastností a kvality
- Provoz s maximální účinností spalovacího procesu
- Bezpečný provoz tepelného zdroje (hladina v bubnu a mírný podtlak v ohništi)
- Spolehlivý a hospodárny provoz tepelného zdroje [22]

Systém při řízení výkonu zasahuje do procesu spalování prostřednictvím samostatných technologických celků, které ovládá a tím zajišťuje dodržení všech uvedených požadavků.

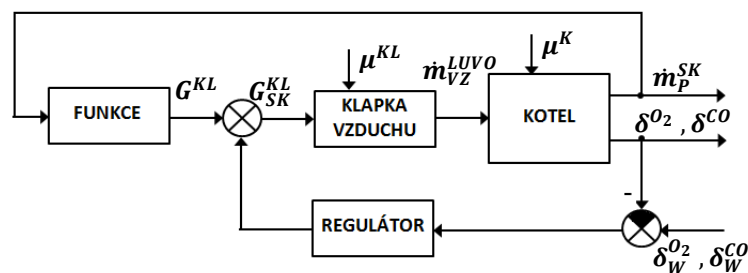
Příkladem může být řízení procesu spalování pomocí akčních členů jako jsou klapky spalovacího vzduchu a spalin. Výhodou při takovém řízení je možnost jejich korekce v závislosti na měřených koncentracích O_2 , CO , či NO_x ve spalinách. Ovlivnění těchto koncentrací lze dosáhnout také využitím recirkulace spalin, která je jedním z možných prvků primárních opatření ve snižování emisí NO_x .

Sofistikované řízení hmotnostního toku přídavných spalovacích vzduchů

Hmotnostní tok sekundárního i terciálního (dohořivacího) vzduchu bývá obvykle řízen podle výkonu kotle. Měřítkem výkonu kotle může být například hmotnostní tok páry kotle, hmotnostní tok paliva do kotle nebo například poměrové zatížení drtičů.

V řídicích algoritmech je častým úkolem sekundárního i terciálního (dohořivacího) vzduchu vybalancování přebytku vzduchu ve spalovací komoře. Proto mohou být oba vzduchy řízeny také přímo od koncentrací O_2 , CO nebo NO_x měřených ve spalovací komoře nebo za kouřovým ventilátorem.

Blokové schéma na *obrázku 15* znázorňuje princip řízení sekundárního, případně dohořivacího vzduchu. Aktuálnímu hmotnostnímu toku páry z kotle \dot{m}_P^{SK} je funkčním generátorem (označen jako FUNKCE) přiřazeno nastavení klapky G^{KL} . Generované nastavení klapky je korigováno akčním zásahem regulátoru na hodnotu G_{SK}^{KL} tak, aby měřené koncentrace látek ve spalinách δ^{O_2} , δ^{CO} odpovídaly svým žádaným hodnotám $\delta_W^{O_2}$, δ_W^{CO} . Průtok vzduchu klapkou je určen její polohou a dalšími parametry (tvar vzduchového potrubí, otevření ostatních klapek, poloha věnců ventilátoru), které jsou ve schématu zahrnuty do poruchy μ^{KL} [20].

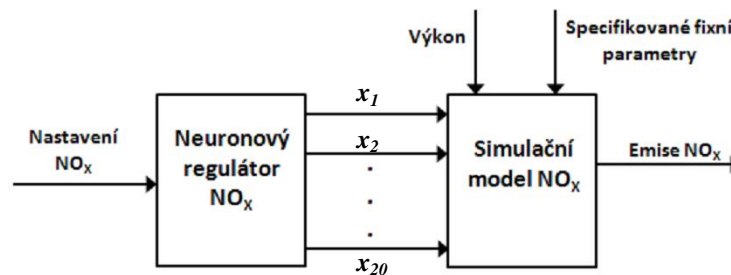


Obrázek 15 – Blokové schéma

Řízení pomocí neuronového regulátoru

Moderním způsobem řízení je využití vlastností neuronového regulátoru zapojeného ve smyčce s neuronovým modelem. Zařízení umožňuje (kromě výkonu) nastavení všech požadovaných parametrů pro řízení, které ovlivňují tvorbu emisí NO_x . Simulační model má výkon přiveden extra.

Blokové schéma řízení neuronového modelu s neuronovým regulátorem je na *obrázku 16*.



Obrázek 16 – Blokové schéma neuronového regulátoru se simulačním modelem NO_x

Vnitřní struktura neuronového modelu publikovaná ve zdroji [20] využívá složení: vstupní vrstva, dvou skrytých vrstev a výstupní vrstva. Celkový počet neuronů nastavených simulačním modelem je 20.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 PROVOZ TECHNOLOGICKÉ JEDNOTKY

Hlavními výrobními jednotkami tepla teplárny Zlín jsou dva fluidní kotle. Fluidní kotel FK31 (dále jen tepelný zdroj FK31) o výkonu 120 MW, který byl uveden do provozu v roce 1996. Druhý fluidní kotel FK32 o výkonu 100 MW byl uveden do provozu v roce 2002. Jedná se o moderní spalovací zařízení s účinností výroby 92 %.

K výrobě elektrické energie jsou používány převážně turbogenerátory TG31, o výkonu 25 MW, a TG32, o výkonu 30 MW. Oba turbogenerátory jsou součástí tzv. Výrobních bloků FK31/TG31 a FK32/TG32. V případě potřeby je možno pro výrobu elektřiny využít také menší TG6, o výkonu 6 MW [24].

Schéma jednotlivých technologických částí popisuje blokově *Obrázek 18*.

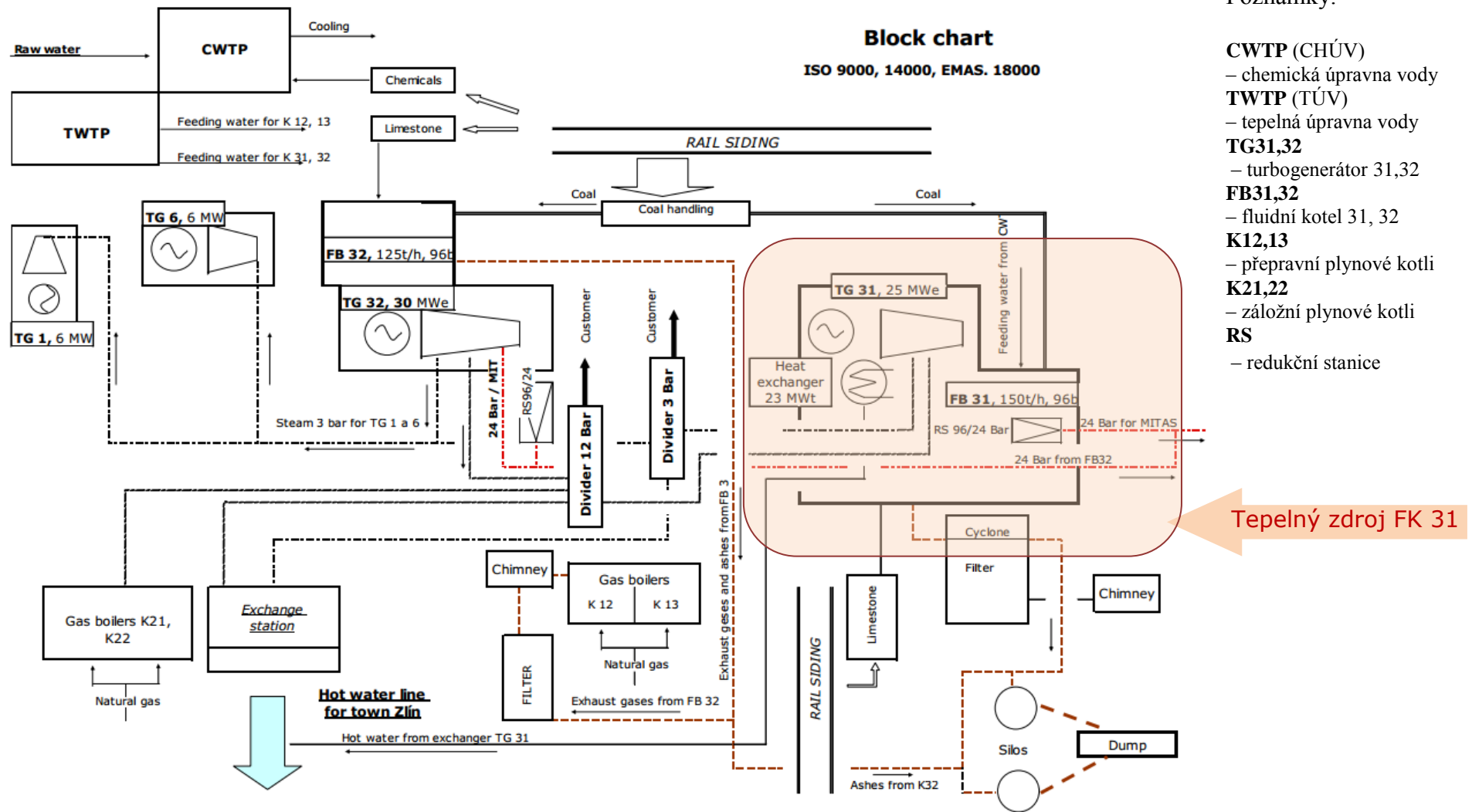
7.1 Popis technologických částí tepelného zdroje FK31

Zařízení výrobního bloku tepelného zdroje FK31 tvoří následující technologické jednotky (stacionární zdroje):

- Uhelny kotel, věžového typu s přirozenou cirkulací a fluidním ložem.
- Kotel je dvoutahový, v prvním tahu jsou umístěny konvenční výhřevné plochy (výparník, přehříváky, ekonomizér).
- Druhý tah je za dvěma studenými cyklony a jsou v něm umístěny konvenční výhřevné plochy ekonomizéru a ohříváku vzduchu.
- K omezování emisí tuhých látek (TZL) používá tkaninový filtr s osmi sekcemi, ke snížení emisí SO₂ využívá suchou metodu
- Výkon kotle je 150t/h páry o tlaku 96 bar a teplotě 540°C.
- Kotel je spojen s protitlakou turbínou TG31 se dvěma odběry 4 a 13 bar. Na konci turbíny je umístěn ohřívák vody s tepelným výkonem 23MW.
- Generátor tohoto bloku má výkon 25 MW.
- Blok byl uveden do provozu v roce 1996 a byl postaven společností ABB.
- Počátkem roku 2008 bylo na výrobním bloku FK31 zahájeno spalování biomasy ve formě dřevní štěpky spolu s hnědým uhlím.
- Zařízení ke snížení emisí NO_x bude součástí ekologizace FK31 do roku 2016.



Obrázek 17 – Venkovní pohled na FK31



Obrázek 18 – Blokové schéma teplárny Zlín [24]

7.2 Popis funkce tepelného zdroje FK31

Palivo (uhlí) a aditivum (vápenec) jsou dopravovány pomocí mechanických podavačů a dopravníků přes sifonový systém do fluidní vrstvy.

Větší frakce zrna se spalují ve fluidní vrstvě při teplotě cca 800°C. Na základě vysoké rychlosti cca 3,5m/s je větší část jemnozrnného paliva a fluidního popílku vynesena z fluidní vrstvy. Ve volném prostoru nad fluidní vrstvou až ke vstupu do konvekčních výhřevných ploch probíhá při teplotě cca 860°C dodatečné spalování vnesených částic paliva. Relativně dlouhý čas (cca 5 sekund) pobytu částic, vnesených z fluidní vrstvy, je spolurozhodující pro dobrou účinnost spalování.

Spaliny obsahující popílek, proudí konvekčními výhřevnými plochami, kde odevzdávají část své energie okruhu voda-pára a vstupují s teplotou cca 400 °C do hrubého odprašování na cyklonech. Zde po odloučení hrubého popílku následují do druhého tahu kotle, kde proudí přes ohřívák vody a trubkový ohřívák vzduchu. Teplota spalin na výstupu z kotle je cca 130°C.

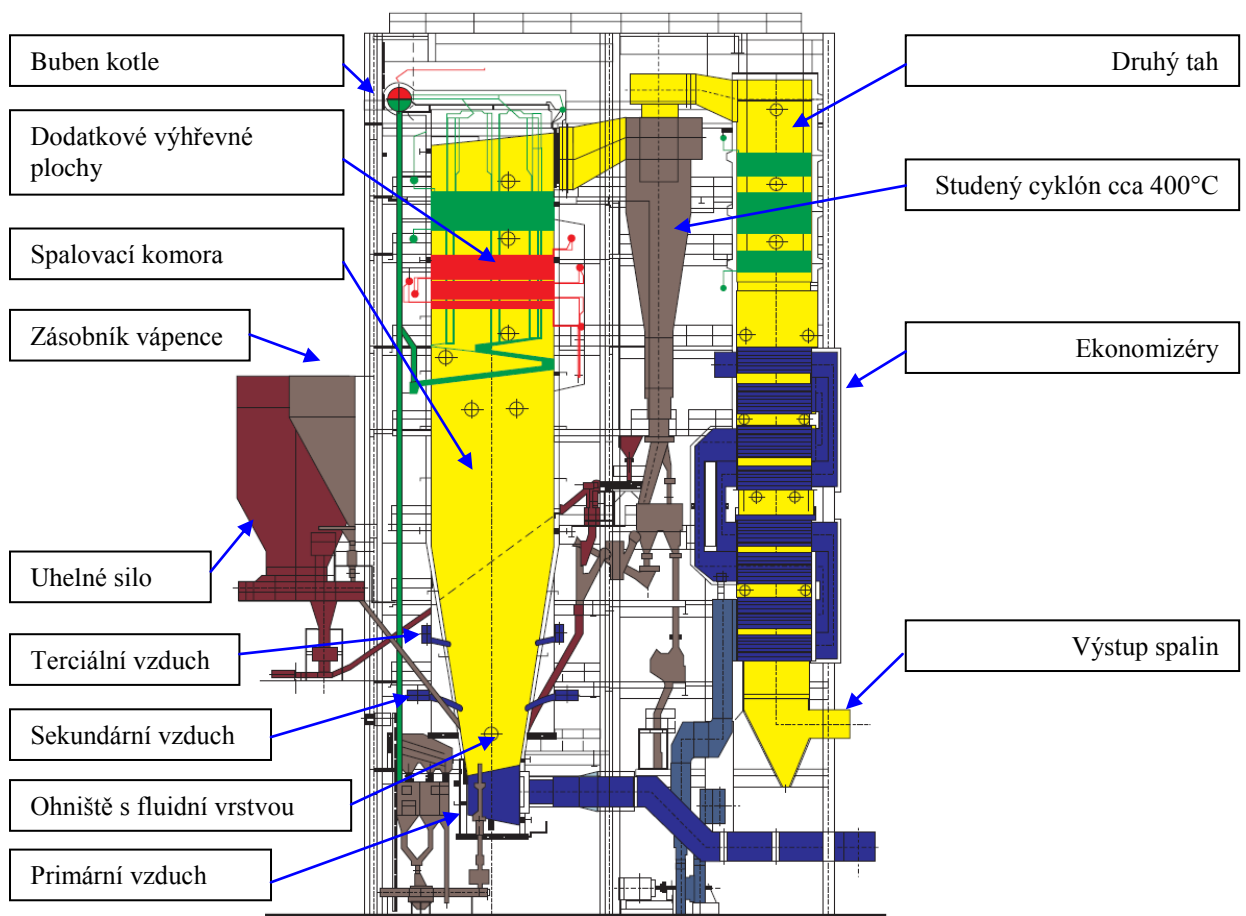
Popílek, odloučený na cyklonech před druhým tahem, se vrací zpět do fluidní vrstvy přes sifony, které zajišťují tlakový uzávěr mezi fluidní vrstvou a cyklony. Ve fluidní vrstvě odebírá recirkulující popílek podstatnou část rozdílu tepla mezi uvolněným teplem z paliva a teplem převzatými membránovými stěnami v oblasti fluidní vrstvy a znovu se vynáší proudem spalin. Spolu s vrácením podílu popílku od odlučovačů se jeho recirkulací docílí udržování konstantní teploty fluidní vrstvy asi 810°C. Recirkulace popela přispívá mimo chlazení fluidní vrstvy ke zlepšení vázání síry a ke zlepšení vyhoření uhlíku.

Nízké emise NO_x se dosahuje pro topení CIRCOFLUID charakteristickým **stupňovým spalováním a nízkou spalovací teplotou**, což dalekosáhle zabraňuje tvorbě termického NO_x. Při stupňovém spalování se zavádí cca 50-60 % celkového spalovacího vzduchu jako primární vzduch ohřátého na 216°C přes dýzové dno do fluidní vrstvy, zatím co zbývající spalovací vzduch jako sekundární a terciální vzduch (oba s teplotou 208°C) se vhná rovnoměrně do průřezu ohniště.

Dávkované přidávání vápence způsobuje vysoké odsíření v ohništi vázáním oxidu siřičitého, uvolněného při spalování, na sádro, jakož i vázání chlóru a fluoru do popela [25],[26].

Příprava paliva

Surové uhlí mající zrnění 0-30 mm se ze zásobníků odebírá podle výkonu kotle pomocí řetězových dopravníků a v dále zapojených drtičích se drtí na průměr zrna **max. 8-10 mm**. Dále se uhlí dopravuje řetězovými dopravníky k sifonům na vrácení popela, přes které se palivo společně s vráceným popelem zavádí do fluidní vrstvy. Na tyto dopravníky je také přes výsypky a pomocí šnekových dopravníků s měnitelnými otáčkami podáváno potřebné množství vápence pro odsíření [25].



Obrázek 19 – Tepelný zdroj FK31 systém „Circofluid“ se studeným cyklonem

Pro atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou je společným znakem, že veškeré spaliny z ohniště prostupují přes cyklony. V nich se odstředivou silou odloučí největší částice, které se potom znovu vrací do fluidního ohniště. Výhodou je delší pobyt částic ve spalovacím prostoru, který vede k lepšímu odsíření i vyhoření uhlíku (snížení ztráty mechanickým nedopalem). Průměrně velká částice paliva pak cirkuluje 10-15x [18],[27].

7.3 Emisní podmínky provozu tepelného zdroje FK31

Stávající emisní limity pro tepelný zdroj FK31

Pro tepelný zdroj FK31 platí emisní limity v souladu se Zákonem 201/2012 Sb. o integrované prevenci a související monitoring látek [6],[18].

Tabulka 6: Stávající emisní limity pro FK31

Technologická jednotka	Znečišťující látka	Platné stávající emisní limity	Jednotka
Kotel FK31	Tuhé znečišťující látky (TZL)	50	mg/m ³
	Oxid siřičitý (SO ₂)	500	mg/m ³
	Oxidy dusíku vyjádřené jako oxid dusičitý (NO _x jako NO ₂)	400	mg/m ³
	Oxid uhelnatý (CO)	250	mg/m ³

Pozn. Emisní limit platí pro normální stavové podmínky (tlak 101,325 kPa, teplota 273,15 K) znamenající koncentraci příslušné látky v suchém plynu a referenčním obsahu kyslíku 6 %.

Tabulka 7: Reálně dosahované emise FK31 [18]

Ukazatel	2010			2011			Jednotka
	průměr	Min.	Max.	průměr	Min.	Max.	
Emise TZL	16	5	93	22	2	83	mg/m ³
Emise SO ₂	207	1	884	169	1	962	mg/m ³
Emise NO _x	179	1	656	189	61	798	mg/m ³
Emise CO	128	13	497	144	1	472	mg/m ³

Emisní limity od 1.1.2016 pro tepelný zdroj FK31

Dne 6.1.2011 vstoupila v platnost Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečišťování) dále jen Směrnice IPPC. Na základě této směrnice byla přijata Vyhláška MŽP 415/2012 ze dne 21.11.2012, podle které se definují specifické emisní limity pro tepelný zdroj FK31 takto:

Tabulka 8: Specifické emisní limity pro FK31 (stacionární zdroj >100 až 300 MW) [18]

Technologická jednotka	Znečišťující látka	Platné stávající emisní limity	Jednotka
Kotel FK31	Tuhé znečišťující látky (TZL)	25	mg/m ³
	Oxid siřičitý (SO ₂)	250	mg/m ³
	Oxidy dusíku vyjádřené jako oxid dusičitý (NO _x jako NO ₂)	200	mg/m ³
	Oxid uhelnatý (CO)	250	mg/m ³

Pozn. Emisní limit platí pro normální stavové podmínky (tlak 101,325 kPa, teplota 273,15 K) znamenající koncentraci příslušné látky v suchém plynu a referenčním obsahu kyslíku 6 %.

7.4 Popis způsobu měření koncentrace NO_x

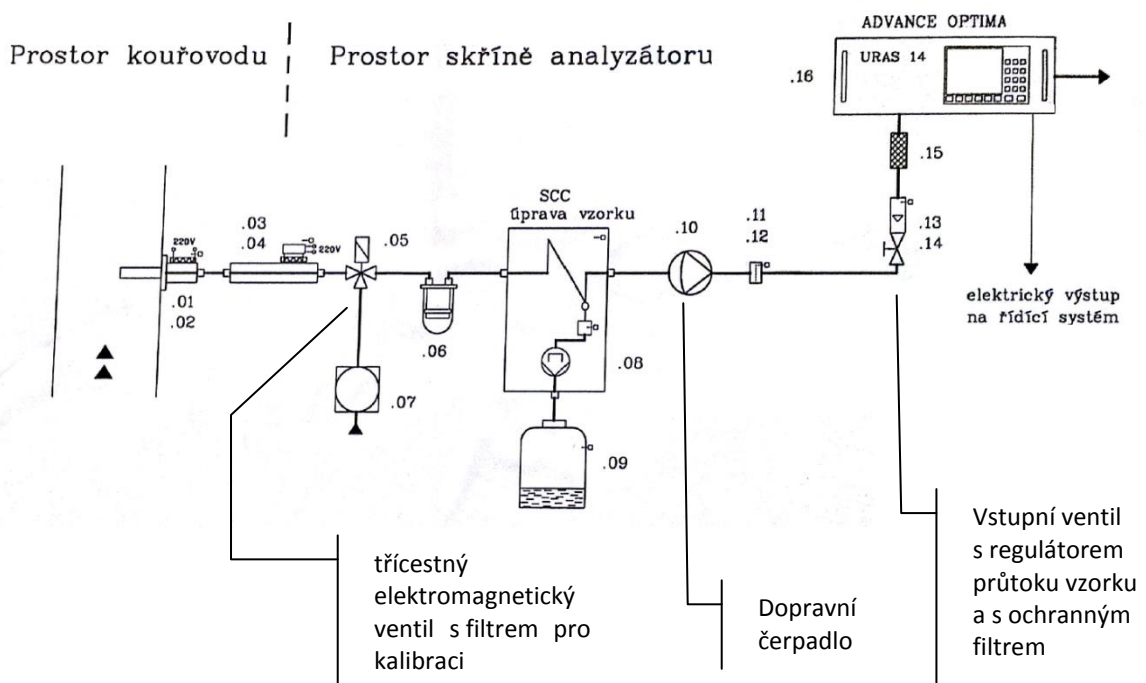
Koncentrace NO_x jsou společně s CO , SO_2 a O_2 měřeny kontinuálním analyzátozem URAS 14 pracujícím na principu absorpce infračerveného záření. Trasu odběru vzorku a měření znázorňuje *obrázek 20*.

Odběr vzorku spalin je uskutečňován pomocí vyhřívané sondy (.01) s vyhřívaným keramickým filtrem (.02) pro odloučení tuhých částic, za kterým je připojeno vytápěné vedení vzorku (.03, .04) k zabránění kondenzace (.06) odebíraného vzorku spalin při jeho dopravě. Vzorek je následně ve vychlazovací jednotce plynu (.08, .09) zbaven vlhkosti a přes bezpečnostní snímač uvolněné vlhkosti (.11, .12) zaveden do analyzátoru (.16). Analyzátor je před měřením v pravidelných periodách kalibrován pomocí instalovaných kalibračních kvyet, nebo směsi kalibračních plynů.

Výsledky jsou vyjádřeny v miligramech na 1 m^3 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) pro CO , SO_2 suchých spalin za normálních podmínek, vztažených na referenční obsah O_2 .

Koncentrace oxidů dusíku jsou vyjádřeny také v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ NO_x přepočtených na NO_2 suchých spalin za normálních podmínek, vztažených na referenční obsah O_2 .

Koncentrace O_2 ve spalinách je měřena kontinuálním analyzátozem pracujícím na principu paramagnetických vlastností kyslíku a je součástí analyzátoru URAS 14. Naměřené hodnoty jsou vyjádřeny v objemových procentech O_2 ve spalinách a slouží jako vztažné veličiny pro přepočty.



Obrázek 20 – Schéma kontinuálního měření koncentrace emisí ve spalinách

8 ANALÝZA MOŽNOSTÍ SNÍŽENÍ NO_x NA TEPELNÉM ZDROJI FK31

Výchozím bodem pro aplikaci jakýchkoliv opatření je detailní znalost stávajícího stavu zařízení. Každá spalovací komora, i kotlů stejné konstrukce, vykazuje jiné charakteristiky. Navíc je kvůli rozšíření palivové základny, spoluspalování biopaliv, rekonstrukcím, atd. většina kotlů provozována za podmínek odlišných od stavu projekčního návrhu a optimalizaci primárních i sekundárních opatření musí proto předcházet diagnostika [28]. Zevrubnou představu o stavu a parametrech kotle lze získat provedením následujících opatření:

- Změření teplotních polí na několika úrovních ve spalovací komoře, popř. v mezitahu, obratovém prostoru a v dalších tazích kotle.
- Změření koncentračních polí O₂, CO a NO_x na několika úrovních ve spalovací komoře, popř. v mezitahu, obratovém prostoru a v dalších tazích kotle.
- Změření rychlostních polí na několika úrovních ve spalovací komoře, popř. v mezitahu, obratovém prostoru a v dalších tazích kotle.
- Komplexní diagnostika mlýnských okruhů.
- Poměrové měření tepelných toků do stěn.
- Měření průtoku vzduchů.
- Odběr a analýza reprezentativního vzorku paliva.

Analýza hrubého rozboru vzorků paliva

Na tepelném zdroji FK31 je prováděno spoluspalování biomasy se směsí hnědého a černého uhlí. Biomasy zde tvoří především dřevní štěpka, která je pouze doplňkovým palivem. Množství spalované biomasy je podřízeno regulaci uhlí a teploty fluidní vrstvy, která následně řídí poměr dávkování cca 4 t.hod⁻¹(štěpka) a 20 t.hod⁻¹(uhlí). Hrubé rozboru užívaných paliv jsou uvedeny v tabulce 9 až 11.

Tabulka 9: Hrubý rozbor dřevní štěpky

Dřevní štěpka				
Datum odběru vzorku	Dodaná hmotnost [t]	Voda celková [%]	Popel v sušině [%]	Výhřevnost [kJ/kg]
5.5.2014 8:16	95,34	19,63	0,98	14 340
6.5.2014 8:17	98,82	20,27	1,04	14 310
7.5.2014 8:16	100,20	22,33	1,00	13 890
Aritmetický průměr	98,12	20,74	1,01	14 180

Tabulka 10: Hrubý rozbor černého uhlí

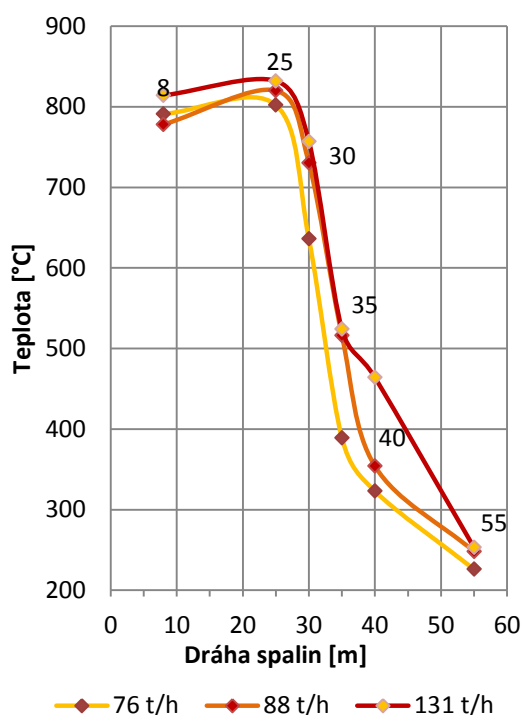
Černé uhlí				
Datum odběru vzorku	Číslo vzorku	Voda celková [%]	Popel v sušině [%]	Výhřevnost [kJ/kg]
2.5.2014 10:35	1	2,39	4,79	32 010
2.5.2014 10:49	2	2,48	4,95	31 650
2.5.2014 10:50	3	2,16	4,19	32 450
Aritmetický průměr	-	2,34	4,64	32 040

Tabulka 11: Hrubý rozbor hnědého uhlí

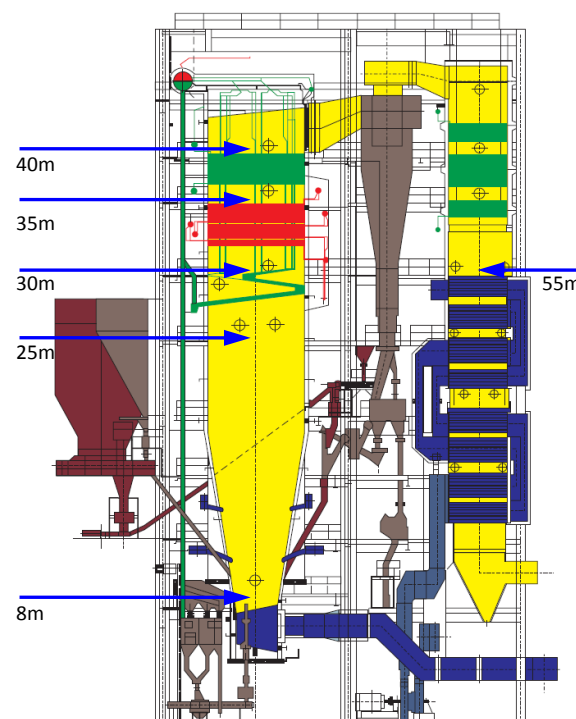
Hnědé uhlí					
Datum odběru vzorku	Číslo vzorku	Voda celková [%]	Popel v sušině [%]	Výhřevnost [kJ/kg]	
9.5.2014 8:16	1	25,52	7,60	19 420	
9.5.2014 8:17	2	24,68	5,50	20 500	
Aritmetický průměr		-	25,10	6,55	19 960

Analýza teplot ve spalovací komoře

Důležitým parametrem majícím vliv na redukční opatření emisí NO_x je teplota polí na několika úrovních ve spalovací komoře, popř. v mezitahu a v dalších tazích kotle. Naměřené hodnoty teplot byly zaznamenány z kontinuálního měření při různých provozních stavech výkonu.



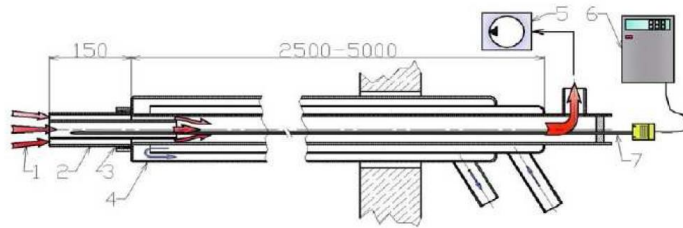
Obrázek 22 – Průběh teploty po dráze spalin



Obrázek 21 – Rozmístění snímačů měření teploty ve spalovací komoře

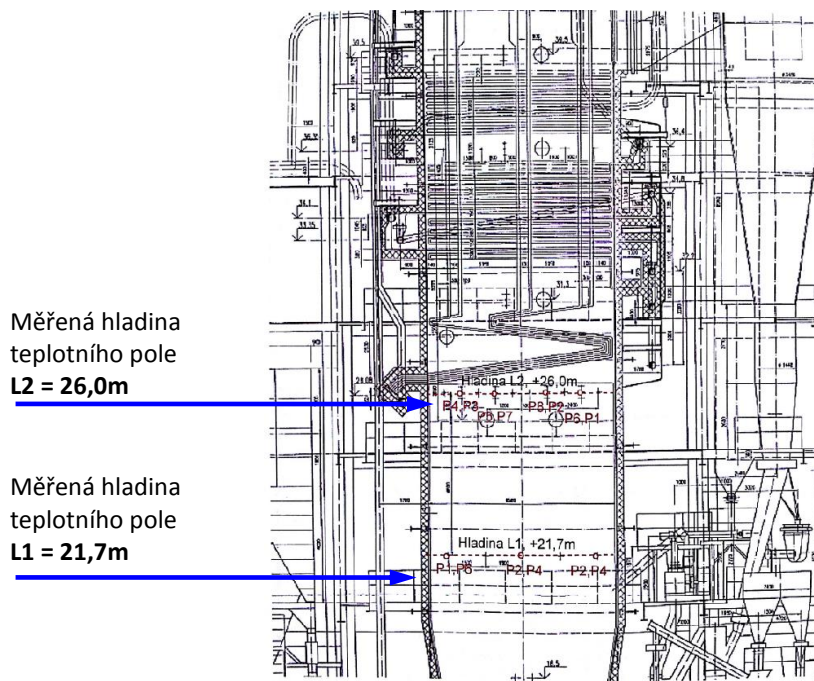
Na obrázku 22 je znázorněn průběh kontinuálního měření teploty pomocí stávajících snímačů (termočlánků typ-K). Měření teplot bylo provedeno při různých provozních stavech výkonu. Prvním bodem měření je teplota fluidního lože (ve výšce 8 m) a následné body měření pokračují ve směru dráhy proudění spalin. Nevýhodou tohoto měření je malá hloubka vnoření snímače do spalovací komory (200 mm).

Proto v souvislosti se zamýšlenou realizací DeNO_x technologie na tepelném zdroji FK31 bylo realizováno měření teplotních polí (TP). Měření bylo realizováno prostřednictvím chlazených sond a prosávacího pyrometru. Pro komplexní vyhodnocení bylo měřeno vždy 6 teplot kontinuálně podobu min 1 hodiny pro min. a max. výkon FK31. Cílem tohoto měření bylo ověření teplot v průřezu spalovací komory [18].



Popis obrázku: 1-vstup nasávaných horkých plynů, 2-keramická stínící hlavice, 3-ucpávka z žáruvzdorného materiálu, 4-chlazená sonda, 5-vývěva, 6-digitální dataloger s převodníkem, 7-termočlánek

Obrázek 23 – Prosávací pyrometr [18]

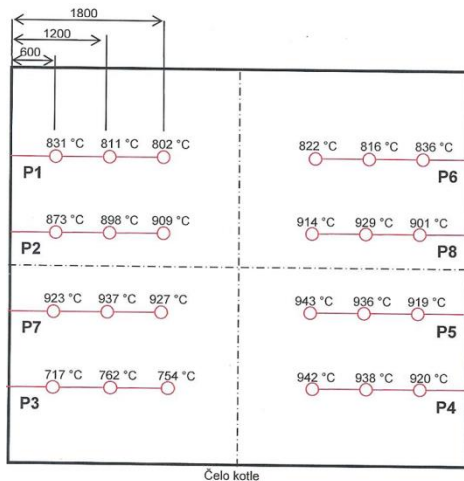


Měřená hladina
teplotního pole
L2 = 26,0m

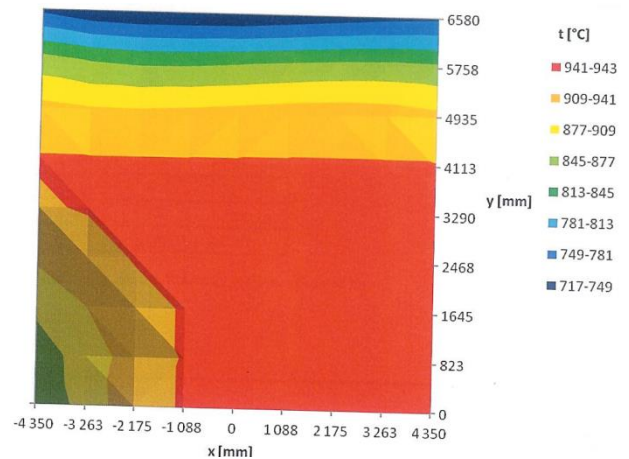
Měřená hladina
teplotního pole
L1 = 21,7m

Obrázek 24 – Body pro měření teplotních polí [18]

Teplotní pole měřené na hladině +26,0 m při výkonu 142 t/h

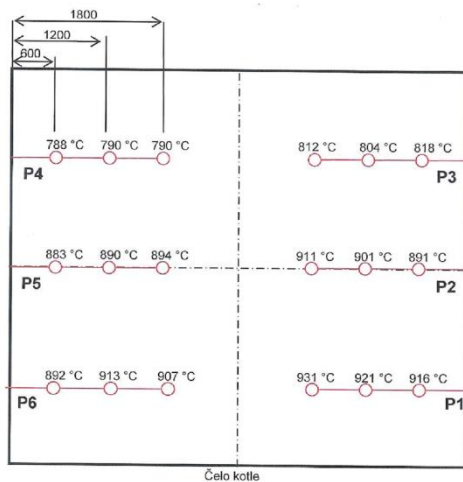


Obrázek 25 – Změřené teploty,
hladina +26,0m

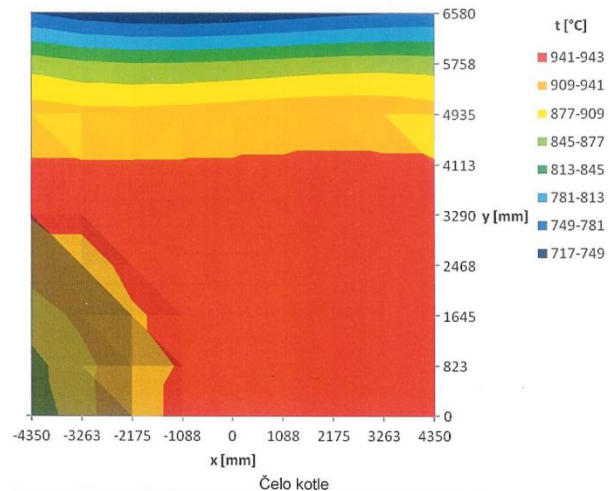


Obrázek 26 – Aproximované teplotní pole,
hladina +26,0m

Teplotní pole měřené na hladině +21,7 m při výkonu 142 t/h



Obrázek 27 – Změřené teploty, hladina +21,7m



Obrázek 28 – Aproximované teplotní pole, hladina +21,7m

Vzhledem k tomu, že diagnostika stavu stávajícího zařízení pouze pomocí přímých měření není vždy v požadovaném rozsahu technicky možná. Budou změřená teplotní pole součástí vstupních veličin, určených ke zpracování modelace průběhu spalování pomocí moderních výpočetních metod (CFD modelace) viz kapitola 6.2.

8.1 Primární opatření

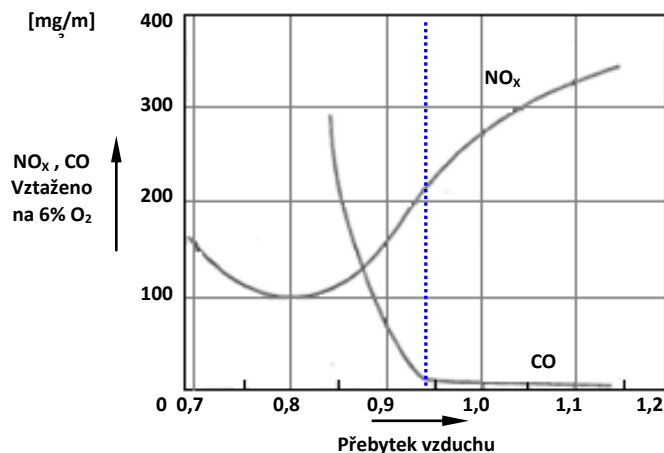
Primární opatření jsou v současné době na tepelném zdroji FK31 používána v rozsahu umožňujícím omezení emisí NO_x na úroveň platných limitů. Jsou z velké části založena na distribuovaném přívodu vzduchu (sekundárního, terciálního) na různých místech do spalovací komory a dále na snížení přebytku O_2 pomocí primárního vzduchu a na snížení teplot v ohništi využitím recirkulací spalin.

Dalším důležitým opatřením, jež je dáno konstrukcí tepelného zdroje, je doba setrvání vznesených částic paliva v redukční zóně dodatečného spalování. Tato doba je relativně dlouhá (cca 5 sekund) a zabezpečuje dobrou účinnost spalování.

Pro podporu tohoto opatření je výrobcem stanoven stupeň drcení uhelného paliva na velikost zrna max. 8-10mm.

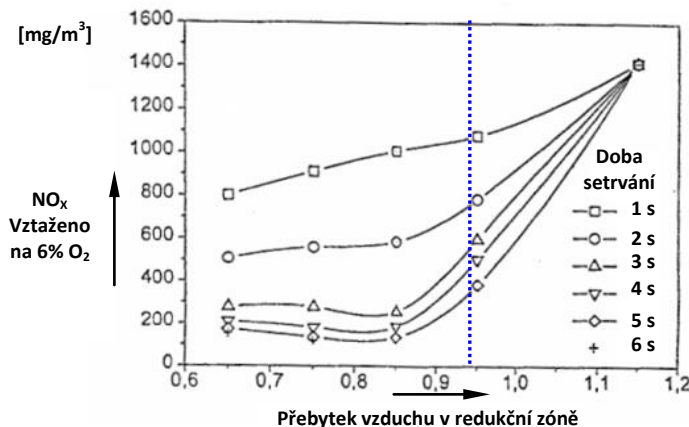
Vlivnost použitých primárních opatření na produkci emisí NO_x je znázorněna na obrázcích 29 a 30.

Na *obrázku 29* je vidět, že při přebytku vzduchu 0,8 je emisní minimum NO_x , ale emise CO jsou při tomto přebytku enormně vysoké. Spalování s tímto přebytkem nelze však provozovat. To znamená, že se musí při hledání cest pro redukci NO_x současně respektovat zvyšující se podíl spalitelných látek při odchodu ze spalovací komory [16].



Obrázek 29 – Optimalizace spalování dle tvorby NO_x a CO

Obrázek 30 znázorňuje pozitivní přínos delší doby setrvání částic paliva v redukční zóně na produkci emisí NO_x [16].



Obrázek 30 – Vliv doby setrvání v redukční zóně na tvorbu NO_x

8.1.1 Rozdělení využitých primárních opatření

Základní rozdělení využitých primárních opatření je následující:

- Opatření ve vztahu k palivu
- Modifikace procesu spalování

Opatření ve vztahu k palivu

Provoz tepelného zdroje neplánuje přechod na jiný typ používaného paliva (záměnou z pevného na kapalné nebo na plynné palivo). Obecně se dá uvažovat o využití paliv s nižším obsahem síry, uhlíku, dusíku, popelovin, atd.

Modifikace procesu spalování

V souvislosti se spalováním jsou využitelné tyto modifikace:

- Snížení výkonu (nižší průtoky a objemy spalin, apod.)
- Modifikace uvnitř topenišť
- Modifikace přívodu vzduchu a paliva (např. recirkulace spalin, předběžné směšování paliva se vzduchem, využívání aditiv, důkladné promísení paliva, jemné mletí paliva, zplyňování, apod.) [18]

8.2 Sekundární opatření

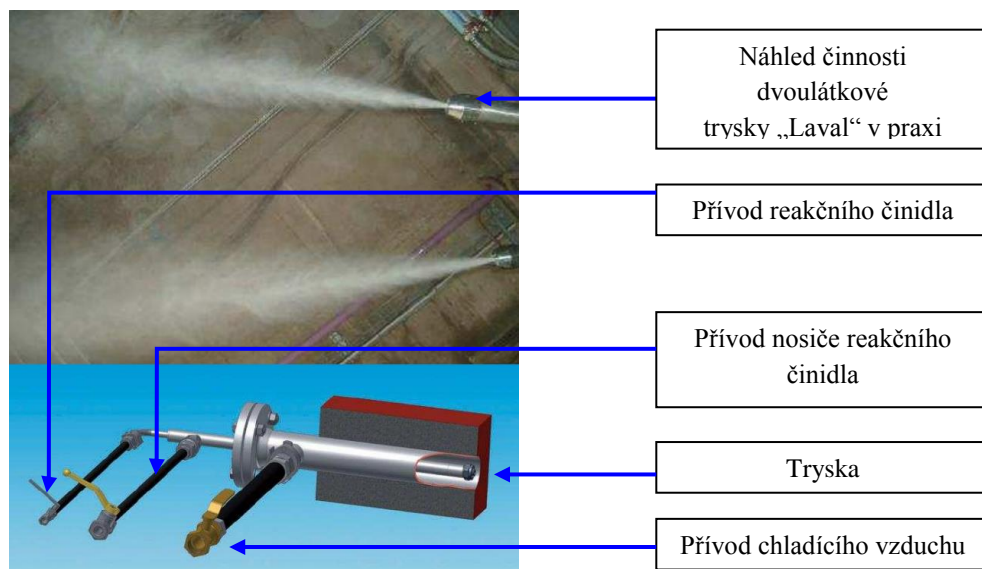
Většina technologií se zakládá na injektáži čpavku, močoviny nebo dalších sloučenin, které reagují s NO_x ve spalinách a redukuje je na molekulární dusík. Mezi nejlepší dostupné techniky patří SNCR a SCR.

8.2.1 Redukce NO_x využitím selektivní nekatalytické redukce (SNCR)

Snížení emisí NO_x pomocí sekundárních opatření – SNCR je popsána v kapitole 5.2, které se provozuje bez katalyzátoru při teplotách mezi 850 až 1100°C.

Zařízení pro SNCR se skládá ze dvou základních částí a to z jednotky pro sledování a z vlastní jednotky SNCR kde se provádí nástřik reakčního činidla a probíhá redukce oxidů dusíku na dusík a vodu.

Pro dosažení vysokého podílu redukce NO_x a nízkého úniku čpavku, musí se zajistit dostatečné promísení reakčního činidla se spalinami, které obsahují NO_x . Dalším důležitým parametrem je velikost kapek reakčního činidla. Možným nosičem reakčního činidla může být stlačený vzduch, voda nebo pára.



Obrázek 31 – Dvoulátkové trysky Laval firmy Hydro-tech [26]

Volba redukčního činidla také ovlivňuje tvorbu oxidu dusného (N_2O) [19].

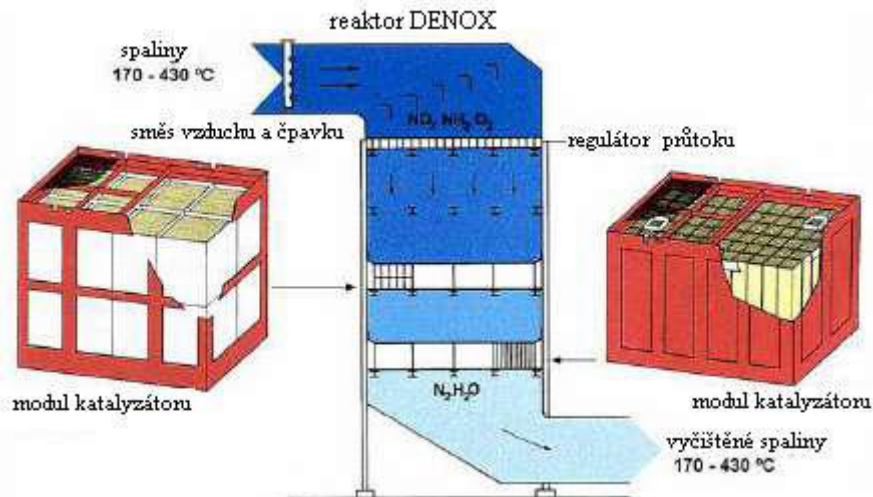
8.2.2 Redukce NO_x využitím selektivní katalytické redukce (SCR)

Snížení emisí NO_x pomocí sekundárních opatření – SCR je popsána v kapitole 5.2. Tato metoda je rozsáhle využívána k redukci NO_x v emisích z velkých spalovacích zařízení pro její velkou účinnost (80 až 90%).

Proces SCR je založen na selektivní katalytické redukce NO_x čpavkem nebo močovinou za přítomnosti katalyzátoru. Redukční činidlo (čpavek, močovina) se vsťikuje do spalin před katalyzátorem. Na povrchu katalyzátoru dochází při teplotě mezi 170 až 600°C k redukci NO_x.

Mezi základní využívané typy katalyzátorů patří:

- aktivní uhlí
- oxidy železa
- oxidy těžkých kovů
- zeolity (pro rozmezí teplot 300 až 600°C) [18]



Obrázek 32 – Uspořádání reaktoru s katalyzátorem [22]

Všechna popsaná sekundární opatření je možné také vzájemně kombinovat a tím zvýšit účinnost redukce emisí NO_x.

9 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ

Technická opatření vedoucí k omezení emisí oxidů dusíku jsou založena na zdokonalení stávajících primárních opatření a na optimalizaci souběžně probíhajících primárních a sekundárních opatření.

Zajištění optimální součinnosti primárních a sekundárních opatření je založeno na optimálním řízení spalování, umožňujícím minimalizaci tvorby emisí a optimalizaci účinnosti reakcí sekundárních opatření dle možností tepelného zdroje.

9.1 Návrh primárních opatření

Zdokonalení primárních opatření se opírá zejména o potlačení negativních vlivů na tvorbu NO_x teplotními výkyvy a nesymetrií spalování ve spalovací komoře.

Při využití primárního opatření zaměřeného na jemnost mletí paliva, by docházelo ke zrychlení pohybu částic paliva v topeništi a tím ke zkrácení doby setrvání ve spalovacím procesu. Toto opatření by mělo negativní vliv na produkci emisí NO_x a to směrem k jeho zvýšení.

Dalším doporučeným primárním opatřením je provoz tepelného zdroje se sníženým přebytkem vzduchu. Tímto opatřením dojde ke zvýšení účinnosti spalování a snížení produkce NO_x . Nevýhodou může být vyšší produkce emisí CO a snížení stability hoření jak je uvedeno v kapitole 5.1.

Mezi nejúčinnější primární opatření patří recirkulace spalin snižující obsah O_2 v topeništi. Kyslík přítomný ve spalovací zóně je při poklesu teploty plamene ochlazen a omezí se přeměna dusíku vázaného v palivu a vznik tepelných NO_x [18].

Vliv primárních opatření na snížení emisí oxidů dusíku lze podpořit matematickým popisem procesu spalování, jeho ověřením a následným využitím pro řízení spalování. Ostatní primární opatření používaná v současné době na tepelném zdroji FK31 se mohou považovat za účinné.

Tato primární opatření však nemohou zaručit bezpečné a trvalé udržení hodnot emisí pod 200 mg/m^3 . Současné dosažitelné úrovně emisí při využívání pouze primárních opatření jsou podle zadavatele cca 300 mg/m^3 .

9.2 Návrh sekundárních opatření

Spolehlivým dodatečným opatřením ke snížení emisí na potřebnou úroveň je sekundární opatření. Toto opatření představují zavedení skupiny chemických procesů v kotli, při které dochází k destrukci již vzniklých NO_x ve spalinách aplikací chemických procesů. Používaná sekundární opatření jsou založena selektivní katalytické reakci a selektivní nekatalytické reakci. Podle známých údajů

Zdokonalení pomocí sekundárního opatření předpokládá instalaci nové technologie, jež bude doporučena na základě posouzení vlastností popsanych metod a různých typů katalyzátorů pro podmínky použití na tepelném zdroji FK31.

Spalovací proces optimalizovaný pomocí sekundárního opatření s technologií SCR (tj. s přidavným katalyzátorem) by byl možný pouze při provozním režimu přesahujícím 80% jmenovitého výkonu tepelného zdroje. Důvodem je velká účinnost primárních opatření dosahující produkce NO_x pod $300 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a velká účinnost SCR (80 až 90%). Při nižším jmenovitém výkonu a při neustálených provozních stavech by vzniklo riziko možného úniku nezreagovaného reagentu (čpavek, močovina) mimo spalovací proces do ovzduší!

Vhodnějším sekundárním opatřením pro tepelný zdroj FK31 je technologie SNCR, při které je vstříkván reagent (čpavek nebo močovina) přímo do spalovacího procesu. Použitím SNCR technologie mající účinnost 30 až 50% na redukci emisí NO_x zajišťuje nižší riziko úniku nezreagovaného reagentu (čpavek, močovina) mimo spalovací proces do ovzduší a to i při 40% jmenovitého výkonu tepelného zdroje [18]. Tepelný zdroj tak může být provozován jak při ustálených tak i při regulačních provozních režimech a současně dosahovat koncentrace úniku NH_3 ve spalínách pod požadovaných 10 mg.

Volbě nejvhodnější varianty řešení proto předcházelo důkladné posouzení všech známých technologických vlastností tepelného zdroje FK31, vlastností sekundárních metod a neméně důležitý ekonomický přínos instalované technologie v průběhu provozu.

Vzhledem ke konstrukci tepelného zdroje FK31 jsou možnosti instalace nového zařízení velice omezené a preferují se prvky nízkonákladové technologie na eliminaci NO_x . S přihlédnutím k současné účinnosti v odstraňování emisí NO_x u tepelného zdroje FK31 lze doporučit selektivní nekatalytickou redukci (SNCR) s volbou vhodného reagentu.

9.3 Posouzení vhodnosti použití dávkování čpavku a močoviny

Navrhované technické řešení spočívá především v úpravách spalovacích režimů kotle a doplnění zařízení se systémem injektáže reagentu pro sekundární omezení emisí oxidů dusíku pomocí selektivní nekatalytické redukce (SNCR). Při aplikování jakékoliv selektivní redukce NO_x je důležité zabezpečit spolehlivé a bezpečné zreagování použitého reagentu již v průběhu spalování. Proto se při volbě vhodného reagentu zohledňuje možná eliminace rizika nechtěného úniku NH_3 do ovzduší použitím jako reagentu močoviny $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$.

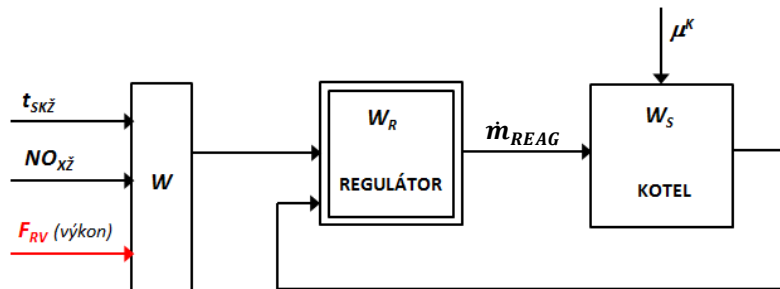
9.4 Návrh řízení dávkování technologických komponentů

Řízení spalování a snižování tvorby emisí pomocí jednorozměrného regulačního obvodu

Při řízení dávkování reagentu SNCR tímto způsobem je zde požadovanou hodnotou koncentrace emisí NO_x . Regulační soustava má vstupní parametry výkon kotle (F_{RV}),

koncentrace NO_x na výstupu ze spalovací komory ($\text{NO}_{xž}$) a teploty na výstupu ze spalovací komory ($t_{skž}$). Vnější poruchy kotle (μ^k) jsou řešeny v rámci regulace výkonu [18].

Na *obrázku 33* je pro ilustraci uvedeno příslušné blokové schéma jednorozměrného způsobu řízení regulačního obvodu.

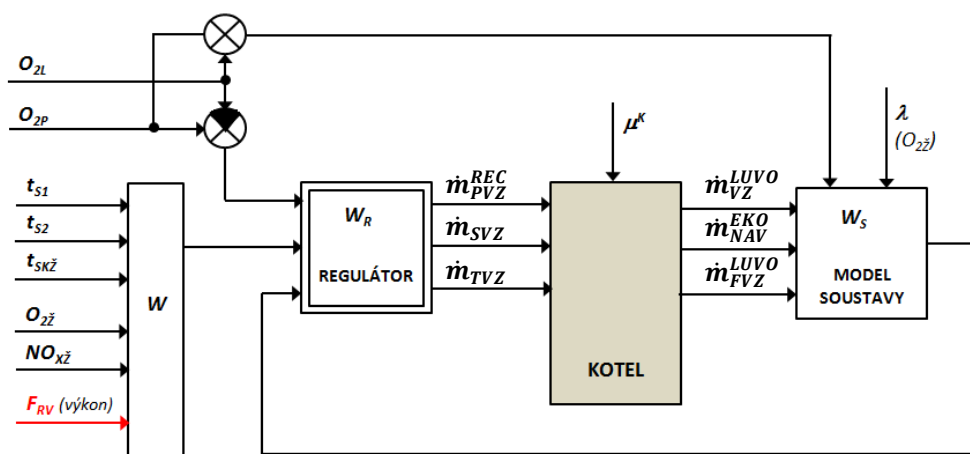


Obrázek 33 – Blokové schéma základního způsobu řízení

Řízení rovnoměrnosti spalování a snižování tvorby emisí pomocí naladěného modelu

Požadovanými novými vstupními hodnotami mimo výkon kotle (F_{RV}) a vnější poruchou kotle (μ^k) jsou zde koncentrace kyslíku na levé (O_{2L}) a pravé (O_{2P}) straně na výstupu ze spalovací komory a na výstupu z kotle ($O_{2ž}$) (odpovídá komínové ztrátě), rozložení teplot spalin na výstupu ze spalovací komory (t_{s1} , t_{s2}), koncentrace NO_x na výstupu ze spalovací komory ($\text{NO}_{xž}$) a teploty na výstupu ze spalovací komory ($t_{skž}$). Žádané hodnoty teplot v horní části spalovací komory jsou v závislosti na výstupním kyslíku (očekávané komínové ztrátě), emisích NO_x a na vlastnostech paliva.

Novým prvkem je blok modelu soustavy, rozšířený blok vstupních hodnot. Jeho funkcí je řídit rovnoměrné rozložení teplot spalin a kyslíku v horní části spalovací komory a kontrolovat bilanci vzduchu z hlediska jeho přebytku. Pomocí matematického modelu, umožňujícího prostorové modelování, budou stanoveny charakteristiky vlivu jednotlivých řídicích orgánů nebo skupin akčních orgánů na výstupní veličiny spalovací komory. Na *obrázku 34* je pro ilustraci uvedeno příslušné blokové schéma optimalizovaného řízení spalování [30].



Obrázek 34 – Blokové schéma optimalizovaného návrhu řízení [30]

9.5 Diskuze

Zvolené téma bakalářské práce mne inspirovalo k bližšímu seznámení se s technologií spalování ve fluidním kotli a způsobu řízení jeho výkonu. Získané informace byly základem k dalšímu posouzení možných technologických variant na snížení NO_x a navrhnutí optimálního řízení.

Z důvodu platnosti nové směrnice Evropského parlamentu upravující emisní limity průmyslových celků, byla schválena a nabývá platnost od 1.1.2016 nová vyhláška 415/2012 Sb., která je závazná také pro tepelný zdroj FK31. Provozovatel tak musí zajistit plnění limitů i za cenu nových investičních nákladů do technologie. Provozovatel si nechal zpracovat studii proveditelnosti, kterou jsem měl poskytnutou k nahlédnutí a v této práci byla také citována.

Způsoby a příčiny vzniku oxidů dusíku jsem teoreticky zpracoval se zaměřením na fluidní princip spalování, ve kterém nedochází ke vzniku rychlých NO_x . Výsledkem je proto doporučení na zkvalitnění přísunu recirkulovaných spalin, optimalizované řízení teplot v horní části spalovací komory a zajištění rovnoměrného způsobu spalování. Ten, jak je znázorněno v praktické části při měření teplotních polí, není optimální.

Z teoretického hlediska by tepelný zdroj FK31 při stabilním výkonu mohl splňovat emisní limity jen v rámci primárních opatření, nicméně provozní podmínky FK31 nejsou vždy ideální a stabilní, proto je nutné tato opatření doplnit i sekundárním opatřením, zajistí se tím plnění limitů s dostatečnou rezervou.

Jako ideální „nízkonákladové“ řešení lze navrhnout vstřikování močoviny do horní části spalovací komory v místě vysokých teplot blízkým hodnotám teplotního okna, nebo-li selektivní nekatalytickou redukcí (SNCR). Pro maximalizaci účinku tohoto opatření je doporučeno provést změnu algoritmu řízení na prediktivní řízení dle modelu soustavy.

Při zpracování této práce jsem narazil na nové informace ve způsobu modelování a zpracování informací pomocí neuronových regulátorů. Tato generace regulátorů je již při použití současné výpočetní techniky v on-line provozu velmi zajímavá a efektivní. Bude jistě zajímavé se tomuto směru vývoje blíže věnovat.

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo zhodnocení dostupných řešení redukce produkce NO_x na tepelném zdroji FK31 z důvodu nových a přísnější ekologických kritérií platných pro provoz tohoto zařízení od 1.1.2016.

Zařízení tepelného zdroje FK31 společnosti Alpiq Generation (CZ) s.r.o. Teplárna Zlín byla uvedena do provozu v roce 1996 a v té době splňovala platné emisní limity s dostatečnou rezervou. Důvodem je použití fluidního systému spalování s vlastní cirkulací popele. Tato forma spalování obecně produkuje malé množství emisí oxidů dusíku. Pro nová legislativní nařízení však uvedená technologie nedokáže zajistit jejich další snížení bez použití dodatečných opatření.

Na základě provedené analýzy vlastností emisí NO_x a jejich eliminačních metod z citovaných zdrojů, jsem provedl posouzení vhodnosti všech dostupných způsobů pro jejich aplikování na tepelný zdroj FK31. V této práci je následně proveden návrh možné metody řízení, který přispěje k maximalizaci účinku primárních opatření.

Princip fluidního spalování již sám o sobě zamezuje vznik rychlých (promptních) oxidů dusíku vlivem „nízké“ teploty spalování do cca 1000°C a proto je postačující se zaměřit na produkci palivových a termických oxidů dusíku.

V rámci teoretické části jsem popsal základní mechanismy vzniku NO_x . Mezi důležité faktory ovlivňující jejich tvorbu se řadí druh použitého paliva, rozložení teplot ve spalovací komoře, reakční doba pobytu hořlaviny ve spalovací komoře a v neposlední řadě použitý poměr vzduch/palivo při řízení přebytku spalovacího vzduchu.

Produkce emisí oxidu dusíku proto může být ovlivňována již volbou a způsobem přípravy samotného paliva. Palivové produkty jsou totiž nosičem akumulované energie a dle účinnosti spalování je tato energie získávána zpět formou tepla. Proto je kladen důraz na optimalizaci režimu spalování již v rámci primárních opatření.

Pro objektivní posouzení primárních opatření a jejich možností jsem nejprve rozdělil oblast použití na dvě části. V jedné části posuzuji technologické možnosti zařízení a ve druhé technické možnosti řízení.

Za největší rezervu v technologickém řešení primárního opatření považuji malé až nulové využívání recirkulačního ventilátoru. Po nezávislé konzultaci s několika operátory fluidního bloku, abych měl ověřené informace, jsem zjistil příčinu. Tou je náročné spouštění tohoto ventilátoru za běžných provozních podmínek, kdy se oběhové kolo ventilátoru samovolně otáčí v opačném směru proudění. Vzniká tím nutnost jeho brzdění před spuštěním, aby se eliminovalo riziko velkých nárazových proudů při zapnutí v opačném směru točení. Tento problém se dle mých informací nepodařilo úspěšně vyřešit ani při použití frekvenčního měniče se „soft-startem“. Nadále tedy hledám nová technická řešení. Ostatní primární opatření používaná v současné době na tepelném zdroji FK31 se mohou považovat za účinné.

V rámci primárních opatření je do budoucna nutné se více zaměřit na správné odladění (optimalizování) systému řízení výkonu a tím i spalování. Nově v regulaci výkonu zařadit prvky s funkcí na řízení rovnoměrného rozložení teplot a spalin v horní části spalovací komory. Tímto opatřením dojde nejen ke snížení produkce oxid dusíku, ale i ke zvýšení účinnosti procesu spalování. Další variantou mimo uvedený způsob doplněného řízení teploty je využití nových technologií neuronových regulátorů. Výhodou těchto regulátorů je jejich adaptivní řízení a „učení“ se z modelu soustavy sestaveného z historických dat. Výpočetní nároky takového systému jsou již v dnešní době běžně technicky dosažitelné.

Ze všech možných primárních opatření ke snižování NO_x , které jsem v této práci popsal, nenabízí žádné dostatečně účinné řešení. Eliminace znečištění proto bude muset být řešena sekundárním opatřením, které již vede ke spolehlivému snížení emisí. Představují zavedení skupiny chemických procesů v kotli, při které dochází k destrukci již vzniklých NO_x ve spalinách formou aplikací chemických procesů. Používaná sekundární opatření jsou založena na selektivní katalytické reakci a selektivní nekatalytické reakci.

Doporučení optimální varianty sekundárního opatření ovlivňují specifické požadavky provozovatele, jako jsou prostorová a konstrukční náročnost, nízká provozní nákladovost a také eliminace rizika nechtěného úniku NH_3 do ovzduší. K vyhodnocení těchto požadavků jsem použil poskytnutou studii a informace získané v této bakalářské práci. Zásadním hlediskem se ukázala být konstrukční náročnost selektivní katalytické metody, která probíhá na katalyzátoru zabudovaném v trase proudění spalin. To je z důvodu skladby spalinovodu nerealizovatelné a navíc zbytečné vzhledem k současné produkci emisí NO_x . Navrhuji tedy použití selektivní nekatalytické metody se vstříkáváním močoviny přímo do spalovací komory. Jako reagent doporučuji močovinu především z důvodu nižší agresivity na životní prostředí a bezpečnější manipulaci a skladování.

V praktické části jsem porovnal poskytnutá data z prováděných monitorovacích měření teplotních polí, která jsem měl k dispozici od společnosti Alpiq Generation (CZ) s.r.o. Teplárna Zlín s vypracovanými poznatky v teoretické části.

Výsledkem je skutečnost, že ve spalovací komoře nedochází k rovnoměrnému spalování což je zřetelné na aproximovaných grafech.

Při navrhování jakékoliv selektivní katalytické nebo i nekatalytické redukce NO_x je důležité zabezpečit spolehlivé a bezpečné zreagování použitého reagentu již v průběhu spalování. V praxi to znamená zabránění nechtěného úniku reagentu (močoviny nebo čpavku) do ovzduší. Tyto selektivní redukce však prošly v uplynulém období výrazným vývojem a v rámci použitých algoritmů řízení je již toto riziko eliminováno.

Dle mého názoru je selektivní nekatalytická redukce použita v kombinaci s primárními opatřeními optimálním řešením redukce NO_x . Do budoucna je cesta řešení ve využití moderních technologií řízení např. prostřednictvím neuronových sítí. Přínosem tohoto řešení bude snížení produkce emisí a také zvýšení účinnosti spalování.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Goal of my work was to valorize available solutions of production of Nox in heat source FK31 because of the latest and stricter ecological criteria valid for functioning of this device since 1.1.2016.

Devices of heat source FK31, company Alpiq Generation (CZ) s.r.o. Teplárna Zlín were put into functioning in 1996 and in that time accomplished valid emission limits with pretty big reserve. The reason is using fluid system combustion with its own ash circulation. This form of combustion products paucity of emission of nitrogen oxides. For the new legislative bidding this technology could not assure its further reduction without using additional action.

Based on performed analyses of attributes of emissions Nox and its elimination methods from quoted sources, I have made a review of suitability of all available ways for its application on heat source FK31. Then I have made a suggestion of possible method of conducting, which contributes to maximalization of effect of primary action.

Principle of fluid combustion prevent beginning of fast (prompt) nitrogen oxides influenced by low temperature of combustion to cca 1000°C and this is the reason why it is enough to concentrate on production of fuel and termic nitrogen oxides.

In theoretical part I have described basic mechanisms of beginning Nox. Important factors affecting its creation are kind of used fuel, layout of temperatures in the combustion chamber, reaction time of flammable gas in combustion chamber and ratio gas/fuel in overplus of combustion air.

This is the reason why the production of emission of nitrogen oxide could be influenced by the choice and preparation of fuel. Fuel products are carrier of accumulated energy and by efficiency of combustion is this energy taken back in form of heat. That is why we put emphasis on optimization in framework of primary measure.

For objective judgement of primary measures and its options, I have split up the area of use on two parts. In one of that parts I judge technological options of device and in the other part, technical options of controlling.

For the biggest reserve in technological solution of primary measure I consider small or zero use of circulating fan. After an independent consultation with few operators of fluid area, to have certified information, I have found out the cause. The cause is challenging start of this fan in common operating conditions, when the circulating wheel of fan spontaneously turns in opposite direction of convection. The need of its braking before start rises, to eliminate the risk of big spasmodic currents while turning on, in the opposite direction of turning. This problem, by my information, was not solved even they tried to use frequent converter with soft-start. I still search new technological solutions. Other primary measures used now on the heat source FK31 could be considered as effective.

In framework of primary measures, it is necessary for the future focus on the right debugging (optimization) of system of controlling output and than combustion. Newly in

regulation of output, classify elements with function of controlling the uniform decomposition of temperatures and flue gases in the upper part of combustion chamber. By this measure comes lowering of production of nitrogen oxide, increasing of effective combustion. Another variant, out of the listed way of supplemented controlling of temperature, is using of new technologies- neural regulators. Advantage of these regulators is its adaptive controlling and „learning“ from the model of systém made from historical datas. Computational demands of these systems are technically achievable today.

From all possible primary measures to reduce Nox, which I have described in this work, there is no achievable solution effective enough. Elimination of pollution should be solved by secondary measures, which takes us to reliable reduction of emissions. It represents introduction of group of chemical processes in boiler, when there is a destruction of already made Nox in flue gases, in form of application of chemical processes. Used secondary measures are based on selective catalytic reaction and selective non-catalytic reaction.

Recommendation of optimal variant of secondary measures influences specific needs of operator, as spatial and structural severity, low operating cost and so elimination of risk of unwanted escape of NH₃ into the air. For evaluation of these needs I have used provided studie and information got in this work. Essential aspect it has showed to be structural severity of selective catalytic methods, which takes place on the catalyst, built-in path of circulating flue gases. This is because of composition of exhaust pipe unrealized and what is more, useless due to the present production of emission of Nox. I recommend to use selective non-catalytic method with injection of urea to the combustion chamber. As reagent I recommend urea, mainly because of lower aggressiveness on the environment and safer manipulation and storage.

In practical part, I have compared datas from made monitoring measurements of thermal fields, which I had in disposition from company Alpiq Generation (CZ) s.r.o. Teplárna Zlín with elaborated knowledge in theoretical part.

Result is the fact, taht in the combustion chamber there is no equal combustion, what is clear on approximated graph.

In suggestion of selective catalytic or even non-catalytic reduction of Nox, is important to secure reliable and safe reaction of used reagent in process of combustion. In practice it means to prevent unwanted escape of reagent into the air. These selective reductions in past years wre developed in framework of used algorithms of controlling, is this risk eliminated.

In my opinion is selective non-catalytic reduction used in combination with primary measures, the optimal solution of reduction Nox. For the future, the way is using of modern technologies of controlling through neural webs. The benefit of this solution is reduction of emissions and increase of efficiency of combustion.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *World Energy Outlook 2013: (Světová výroční zpráva IEA)*. Paris: Organization for Economic, 2013, 708 s. ISBN 978-92-64-20130-9.
- [2] HEMERKA, J., HRDLIČKA, F. *Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I)* [online]. Praha, 2004 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>.
- [3] JUCHELKOVÁ, D., RACLAVSKÁ, H., *Emise, legislativa* [online]. 2010 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/Emise.pdf
- [4] RYBÍN, M. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978, 414 s. ISBN 04-227-85.
- [5] STEHLÍK, J. *Emisní faktory jako vstupní parametry bilancí emisí NO_x v České republice a v Evropské unii*, *Ochrana ovzduší.*, 2007, roč. 18, č. 3, 20 s. ISSN 1211-0337
- [6] Sbírka zákonů Česká republika: *Zákon č. 201 o ochraně ovzduší*. Břeclav: Moraviapress, 2012. sv. 69. ISBN 1211-1244. Dostupné z: <http://www.inisoft.cz/strana/zakon-201-2012-sb>
- [7] KRAYZEL, Z. Materiály ke stažení. *Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší: Základní povinnosti provozovatelů zdrojů znečišťování ovzduší* [online]. Praha, 2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: http://www.krayzel.cz/wp-content/uploads/PRED_Zakon-201_2012-plna-verze-k-27.01.2014.pdf
- [8] Úřední věstník Evropské unie: *Směrnice Evropského parlamentu a Rady o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění)*. In: *2010/75/EU*. Štrasburk, 2010, L334, sv. 53. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:FULL:CS:PDF>
- [9] Sbírka zákonů Česká republika: *Vyhláška č. 415 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. Břeclav: Moraviapress, 2012. sv. 151. ISBN 1211-1244. Dostupné z: <http://www.inisoft.cz/strana/vyhlaska-415-2012-sb>
- [10] TEMIS. *Tropospheric NO₂ from satellites* [online]. 2014 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://www.temis.nl/airpollution/no2col/no2regioomimonth_v2.php
- [11] SKÁLA, Z. *Ekologie v energetice*. 1. vyd. Brno: PC DIR, 1994, 141 s. ISBN 80-214-0477-9.
- [12] RYBÍN, M. *Vznik kysličníku dusíku NO_x při spalování paliv*. 1. vyd. Běchovice: ÚVVP, 1977, 87 s. ISBN 02-0777.524.
- [13] BOŠKA, M. *Vznik a snižování emisí NO_x*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Chlápek.

- [14] NOSKIEVIČ, P., *Tvorba škodlivin při spalování* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/tvorba.pdf>. Studijní materiály. VŠB -Technická univerzita Ostrava.
- [15] IBLER, Z. *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [16] KOLOVRATNÍK, M. Přednášky. *Stavba kotlů*. [online].2013 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/files/StK%20pr4%5B1%5D.pdf>
- [17] VEJVODA, J., MACHAČ, P., BURYAN, P. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů* [online]. Praha, 2002 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/skriptaOOaCOP/87-164.doc. Vysoká škola chemicko-technologická.
- [18] ČECHOVÁ, J., MOLNÁR, A. *Snížení emisí NO_x na fluidních kotlích FK31 a FK32*. ORGREZ, a.s., Ostrava, 2013, 43 s. 513 02 620/SGZ001/00
- [19] KOLEKTIV AUTORŮ. *Energetka a životní prostředí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 155 s. ISBN 978-80-248-2286-0.
- [20] JAKOUBEK, P. *Způsoby řízení spalovacího režimu v ohništích parních kotlů*. Praha, 2012. *Disertační práce. ČVUT v Praze, FS. Vedoucí práce prof. Ing. M. HOFREITER*
- [21] RUBEK, J., PLISKA, J. *Moderní trendy v optimalizaci provozu elektráren a tepláren*. Automa, 2007, roč. 13, č. 5, s. 28-30. ISSN 1210-9592.
- [22] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 663 s. ISBN 80-730-0020-2.
- [23] KINOVIČ, F., KÁŇA, R., KADLEC, K. *Tepelné hmotnostní průtokoměry a regulátory*. Automa, 2003, roč. 9, č. 12, s. 8-11. ISSN 1210-9592
- [24] WEBMASTER Alpiq Holding Ltd. In: *Naše zařízení – Teplárna Zlín* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://generation.alpiq.cz/our-installations/power-plant-zlin/power-plant.jsp>
- [25] ABB, *Provozní předpisy: Technická dokumentace pro K31*, Praha: ABB, 2001, 450 s. PE-PO-0174/MO-01
- [26] KADRNOŽKA, J., OCHRANA, L. *Teplárenství*. Brno: CERM, 2001, 178 s. ISBN 80-720-4222-X.
- [27] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEISSLER, J. *Parní kotle*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 858 s. TK-0216.951
- [28] HOLOUBEK, I. a kolektiv. *Úvodní národní inventura persistentních organických polutantů v České republice*. Brno: TOCOEN REPORT No. 249, 2003, Projekt GF/CEH/01/003. Dostupné z: <http://www.recetox.muni.cz/index.php?pg=narodni-pops-centrum--narodni-inventura--narodni-inventura-2003>.

- [29] WEBMASTER Hydro-Tech. *Redukce NO_x – rozstřík roztoku močoviny* [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://hydro-tech.hennlich.cz/uploads/media/Redukce_NOx_-_rozstrik_roztoku_močoviny.pdf
- [30] LEPOLD, M. *Možnosti snížení emisí oxidu dusíku energetických kotlů*. In: *All for Power* [online]. Ostrava: Konstrukce Media, 2009 [cit. 2014-05-31]. 2. ISSN 1802-8535. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/moznosti-snizeni-emisi-oxidu-dusiku-energeticky-kotlu/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
A	[-]	Hraniční bod teplotního okna
B	[-]	Hraniční bod teplotního okna
Br	[-]	Atom brómu
C	[-]	Atom uhlíku
Cl	[-]	Atom chlóru
C_{NO}	[mg/m ³]	Hmotnostní koncentrace oxidu dusíku
C_{N_2}	[obj.%]	Volumetrická koncentrace dusíku
C_{O_2}	[obj.%]	Volumetrická koncentrace kyslíku
CO	[-]	Oxid uhelnatý
CO_2	[-]	Oxid uhličitý
CO_X	[-]	Uhelnaté oxidy
C_XH_Y	[-]	Uhlovodíky
F_{RV}	[t/h]	Výkon kotle
G_{SK}^{KL}	[-]	Přenos funkce nastavení klapky
G^{KL}	[-]	Přenos regulátoru nastavení klapky
$G_S^+(s)$	[-]	Celková přenosová matice řízení
$G_S(s)$	[-]	Přenosová matice akčních veličin
$G_{SV}(s)$	[-]	Přenosová matice poruchových veličin
h	[cm]	Výška hladiny v bubnu
H	[-]	Atom vodíku
H_2O	[obj.%]	Voda
$HNCO_3$	[mg/m ³]	Kyselina isokyanatá
HCN	[-]	Kyanovodík
i_{SP}^{NSP}	[J/kg]	Měrná entalpie nechlazených spalin
i_{FVZ}^{SK}	[J/kg]	Měrná entalpie přisávaného falešného vzduchu do spalovací komory
i_{SP}^{SK}	[J/kg]	Měrná entalpie spalin ve výstupním průřezu ohniště včetně popílku
k_1	[m ³ /gmol ⁻⁵]	Konstanta rychlosti reakce
k_2	[m ³ /gmol ⁻⁵]	Konstanta rychlosti reakce
M_{NAP}	[t/h]	Hmotnostní tok napájecí vody
M_P	[t/h]	Hmotnostní tok přehřáté páry
M_{PAL}	[t/h]	Hmotnostní tok paliva

Symbol	Jednotka	Význam
M_{SP}	[t/h]	Hmotnostní tok spalin
M_{VZD}	[t/h]	Hmotnostní tok spalovacího vzduchu
\dot{m}_{PS}	[t/h]	Hmotnostní tok palivové směsi
\dot{m}_{PS}^{CYK}	[t/h]	Hmotnostní tok spalin za cyklónem
\dot{m}_{FVZ}^{PAL}	[t/h]	Hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu v palivové cestě
\dot{m}_{PAL}^{daf}	[t/h]	Hmotnostní tok hořlaviny do kotle
\dot{m}_{Ak}	[t/h]	Hmotnostní tok popela do kotle
\dot{m}_{Wk}	[t/h]	Hmotnostní tok vody v palivu do kotle
$\dot{m}_{LOŽ}$	[t/h]	Hmotnostní tok ložového popela
\dot{m}_{PVZ}^{REC}	[t/h]	Hmotnostní tok primárního vzduchu s recirkulovanými spalinami
\dot{m}_{SVZ}	[t/h]	Hmotnostní tok sekundárního vzduchu
\dot{m}_{TVZ}	[t/h]	Hmotnostní tok terciálního vzduchu
\dot{m}_{FVZ}^{SK}	[t/h]	Hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu ve spalovací komoře
\dot{m}_{SP}^{SK}	[t/h]	Hmotnostní tok spalin na výstupu z ohniště včetně popílku
\dot{m}_P^{SK}	[t/h]	Hmotnostní tok páry na výstupu z výparníku
\dot{m}_{NV}^{EKO}	[t/h]	Hmotnostní tok napájecí vody do výparníku
\dot{m}_{SP}^{NSP}	[t/h]	Hmotnostní tok nechlazených spalin
\dot{m}_{FVZ}^{SK}	[t/h]	Hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do spalovací komory
\dot{m}_{FVZ}^{PP}	[t/h]	Hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do přehříváku páry
\dot{m}_{SP}^{PP}	[t/h]	Hmotnostní tok spalin na výstupu z přehříváku páry
\dot{m}_{NVV}^{EKO}	[t/h]	Hmotnostní tok vstřikované vody
\dot{m}_P^{PP}	[t/h]	Hmotnostní tok přehřáté páry na výstupu z přehříváku páry
\dot{m}_{PAL}	[t/h]	Hmotnostní tok paliva
\dot{m}_{FVZ}^{EKO}	[t/h]	Hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do ekonomizéru
\dot{m}_{SP}^{EKO}	[t/h]	Hmotnostní tok spalin na výstupu z ekonomizéru
\dot{m}_{NAV}^{EKO}	[t/h]	Hmotnostní tok vstupní napájecí vody
\dot{m}_{NV}^{EKO}	[t/h]	Hmotnostní tok výstupní napájecí vody z ekonomizéru
\dot{m}_{FVZ}^{LUVO}	[t/h]	Hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do ohříváku vzduchu
\dot{m}_{SP}^{LUVO}	[t/h]	Hmotnostní tok spalin na výstupu z ohříváku vzduchu

Symbol	Jednotka	Význam
\dot{m}_{SP}^{REC}	[t/h]	Hmotnostní tok spalin na výstupu z ohříváku vzduchu pro recirkulaci
\dot{m}_{INVZ}^{LUVO}	[t/h]	Hmotnostní tok ohřivaného nasátého vzduchu z prostoru kotelny
\dot{m}_{OVZ}^{LUVO}	[t/h]	Hmotnostní tok ohřivaného nasátého vzduchu z venkovního prostoru
\dot{m}_{PVZ}^{LUVO}	[t/h]	Hmotnostní tok výstupního ohřivaného vzduchu pro primární vzduch
\dot{m}_{VZ}^{LUVO}	[t/h]	Hmotnostní tok výstupního ohřivaného vzduchu pro dělený vzduch
\dot{m}_{FVZ}^{REC}	[t/h]	Hmotnostní tok přísávaného falešného vzduchu do recirkulátoru
\dot{m}_{REAG}	[l/min]	Hmotnostní tok reagentu
N	[-]	Atom dusíku
N_A	[-]	Dusík v palivu přeměněný na NO
N_B	[-]	Dusík organicky vázaný v palivu
N_2	[-]	Molekula dusíku
N_2O	[-]	Oxid dusný
N_2O_3	[-]	Oxid dusitý
N_2O_5	[-]	Oxid dusičný
$(NH_2)_2CO$	[-]	Roztok močoviny
NH_3	[-]	Čpavek
NH_4OH	[-]	Hydroxid amonný
NO	[-]	Oxid dusnatý
NO_2	[-]	Oxid dusičitý
NO_x	[-]	Oxidy dusíku
$NO_{XŽ}$	[-]	Koncentrace NO_x na výstupu ze spalovací komory
O_{2L}	[obj.%]	Koncentrace O_2 ve spalovací komoře levá strana
O_{2P}	[obj.%]	Koncentrace O_2 ve spalovací komoře levá strana
$O_{2Ž}$	[obj.%]	Koncentrace O_2 před komínem
O	[-]	Atom kyslíku
O_2	[-]	Molekula kyslíku
OH	[-]	Hydroxydová skupina
p	[kPa]	Tlak
p_n	[kPa]	Tlak normálový
p_t	[kPa]	Podtlak ve spalovací komoře

Symbol	Jednotka	Význam
p_P	[kPa]	Tlak páry na výstupu kotle
$PCDD$	[-]	Polychlórovaných dibenzodioxinů
$PCDF$	[-]	Polychlórovaných dibenzofuranů
\dot{Q}^{VYP}	[J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]	Energie předaná výparníku
\dot{Q}_{SAL}^{SK}	[J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]	Energie odsálaného tepelného toku
\dot{Q}_{PAL}	[W]	Tepelný tok paliva
\dot{Q}_i^k	[J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]	Výhřevnost primárního vzorku paliva
\dot{Q}^{PP}	[J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]	Energie předaná přehříváku
\dot{Q}^{EKO}	[J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]	Energie předaná napájecí vodě
\dot{Q}^{LUVO}	[J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]	Energie předaná přehříváku vzduchu
S	[-]	Atom síry
SO_2	[-]	Oxid siřičitý
SO_3	[-]	Oxid sírový
SO_X	[-]	Oxidy síry
$S^{PŘ}$	[m ²]	Plocha výstupního průřezu přehříváku
S^K	[m ²]	Plocha stěny kotle celková
t	[°C]	Teplota
t_P	[°C]	Teplota přehřáté páry
t_{PV}	[°C]	Teplota páry před vstříkem
t_{S1}	[°C]	Horní teplota ve spalovací komoře č.1
t_{S2}	[°C]	Horní teplota ve spalovací komoře č.2
$t_{SKŽ}$	[°C]	Teploty na výstupu ze spalovací komory
T	[K]	Absolutní teplota
TP	[-]	Teplotní pole
TZL	[mg/m ³]	Tuhé znečišťující látky
$u(t)$	[-]	Vektor akčních veličin
$v(t)$	[-]	Vektor poruchových veličin
$y(t)$	[-]	Vektor regulovaných veličin
W_R	[-]	Regulátor
W_S	[-]	Regulovaná soustava
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
ν	[-]	Stupeň konverze
τ	[s]	Doba reakce

Symbol	Jednotka	Význam
η_{SP}	[%]	Hospodárnost spalovacího procesu
δ^{O_2}	[mg/m ³]	Měrná koncentrace O ₂ ve spalinách
δ^{CO}	[mg/m ³]	Měrná koncentrace CO ve spalinách
$\delta_W^{O_2}$	[mg/m ³]	Žádaná hodnota koncentrace O ₂ ve spalinách
δ_W^{CO}	[mg/m ³]	Žádaná hodnota koncentrace CO ve spalinách
μ^{KL}	[%]	Porucha klapky
μ^K	[%]	Porucha kotle
$x_1 \dots x_{20}$	[-]	Neurony regulátoru 1 až 20
<i>BAT</i>		Best Available Techniques
<i>CEMS</i>		Continuous Emissions Monitoring System
<i>DeNOx</i>		Denitrogenizace
<i>EU</i>		Evropská unie
<i>FK31</i>		Fluidní kotel 31
<i>FK32</i>		Fluidní kotel 32
<i>IEA</i>		International Energy Agency
<i>IPPC</i>		Integrovaná prevence a omezování znečistění
<i>JRRO</i>		Jednorozměrný regulační obvod
<i>MŽP</i>		Ministerstvo životního prostředí
<i>PEMS</i>		Predictive Emissions Monitoring Systems
<i>SCR</i>		Select Catalytic Reduction
<i>SNCR</i>		Select Non-Catalytic Reduction
<i>TG6</i>		Turbogenerátor 6
<i>TG31</i>		Turbogenerátor 31
<i>TG32</i>		Turbogenerátor 32
<i>TO</i>		Teplotní okno

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Rozdělení emisí ze spalovacích zařízení [3]</i>	12
<i>Obrázek 2 – Koncentrace NO₂ v ovzduší nad Evropou v roce 2005 a 2013 [10]</i>	17
<i>Obrázek 3 – Tvorba jednotlivých typů oxidů dusíku v závislosti na teplotě. [14]</i>	18
<i>Obrázek 4 – Přeměna palivového dusíku [15]</i>	19
<i>Obrázek 5 – Potlačení vzniku palivového NO_x.....</i>	20
<i>Obrázek 6 – Metody snižování NO_x.....</i>	24
<i>Obrázek 7 – Postupné spalování paliva ve třech zónách hoření (dospalování) [17].....</i>	25
<i>Obrázek 8 – Závislost účinnosti SNCR na teplotě spalin [17],[18],[19]</i>	27
<i>Obrázek 9 – Implementace monitorovacího a optimalizačního řešení.....</i>	30
<i>Obrázek 10 – CEMS systém aplikovaný na tepelném zdroji FK31</i>	31
<i>Obrázek 11 – Přehled prediktivních modelovacích systémů [20]</i>	32
<i>Obrázek 12 – Technologické schéma bubnového kotle [22].</i>	32
<i>Obrázek 13 – Celková přenosová bilance kotle [22]</i>	33
<i>Obrázek 14 – Tepelné bilanční schéma fluidního kotle [20]</i>	38
<i>Obrázek 15 – Blokové schéma</i>	39
<i>Obrázek 16 – Blokové schéma neuronového regulátoru se simulačním modelem NO_x.....</i>	40
<i>Obrázek 17 – Venkovní pohled na FK31</i>	42
<i>Obrázek 18 – Blokové schéma teplárny Zlín [24]</i>	43
<i>Obrázek 19 – Tepelný zdroj FK31 systém „Circofluid“ se studeným cyklonem.....</i>	45
<i>Obrázek 20 – Schéma kontinuálního měření koncentrace emisí ve spalinách</i>	47
<i>Obrázek 22 – Průběh teploty po dráze spalin.....</i>	49
<i>Obrázek 21 – Rozmístění snímačů měření teploty ve spalovací komoře</i>	49
<i>Obrázek 23 – Prosávací pyrometr [18]</i>	50
<i>Obrázek 24 – Body pro měření teplotních polí [18].....</i>	50
<i>Obrázek 25 – Změřené teploty, hladina +26,0m</i>	50
<i>Obrázek 26 – Aproximované teplotní pole, hladina +26,0m.....</i>	50
<i>Obrázek 27 – Změřené teploty, hladina +21,7m</i>	51
<i>Obrázek 28 – Aproximované teplotní pole, hladina +21,7m.....</i>	51
<i>Obrázek 29 – Optimalizace spalování dle tvorby NO_x a CO</i>	52
<i>Obrázek 30 – Vliv doby setrvání v redukční zóně na tvorbu NO_x.....</i>	52
<i>Obrázek 31 – Dvoulátkové trysky Laval firmy Hydro-tech [26]</i>	53
<i>Obrázek 32 – Uspořádání reaktoru s katalyzátorem [22].....</i>	54

<i>Obrázek 33 – Blokové schéma základního způsobu řízení</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 34 – Blokové schéma optimalizovaného návrhu řízení[30]</i>	<i>57</i>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti vybraných emisí [3]

Tabulka 2: Specifické emisní limity platné do 31.12.2015

Tabulka 3: Specifické emisní limity platné od 1.1.2016

Tabulka 4: Aplikace primárního opatření [15]

Tabulka 5: Aplikace sekundárního opatření [15],[18]

Tabulka 6: Stávající emisní limity pro FK31

Tabulka 7: Reálně dosahované emise FK31

Tabulka 8: Specifické emisní limity pro FK31 (stacionární zdroj >100 až 300 MW) [18]

Tabulka 9: Hrubý rozbor dřevní štěpky

Tabulka 10: Hrubý rozbor černého uhlí

Tabulka 11: Hrubý rozbor hnědého uhlí

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I	Řez tepelného zdroje FK31
Příloha P II	Panel řízení výkonu FK31
Příloha P III	Panel řízení vzduchu a spalín FK31

PŘÍLOHA P I: ŘEZ TEPELNÉHO ZDROJE FK31