

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE



FAKULTA STROJNÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV ENERGETIKY
DEPARTMENT OF ENERGY ENGINEERING

MOŽNOSTI SNÍŽENÍ NO_x RECIRKULACÍ SPALIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THEISIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR MAREŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
PRAHA 2015

Prof. Ing. FRANTIŠEK HRDLIČKA, CSc.

Seznam odborné literatury:

Vilimec L.: Stavba kotlů II. díl, Vysoká škola báňská Ostrava

Hrdlička F., Břetislav J.: Metody a zařízení pro snižování emisí tuhých částic, SO₂ a oxidu dusíku do ovzduší v energetice, Praha

Doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá snižováním oxidů dusíku (NO_x) ze spalin fluidních kotlů. V první části je popsána problematika znečištění ovzduší v ČR a následná řešení. V další části se rozebírají a popisují mechanismy vzniku NO_x a způsoby odstraňování plynů NO_x ze spalin. Dále se tato práce soustředí na projekt vybudovaný v uhelné teplárně UE-Komořany a.s., kde mají za cíl snížení oxidů dusíku (NO_x) ze spalin kotlů, a to primární cestou, která byla navržena pro vybrané kotle. Hlavní myšlenka této části je zhodnotit stav před recirkulací a po recirkulaci spalin a porovnat je.

KLÍČOVÁ SLOVA

NO_x , kyslík, O_2 , CO, recirkulace, fluidní kotle, teplárna UE Komořany a.s., přebytek O_2 , spaliny, komínová ztráta

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focuses on reduction of nitrogen oxides (NO_x) from flue gas of fluid boilers. In first part is describes the issue of air pollution in the Czech Republic and the subsequent solution. In the next section we discuss and describe the mechanisms of NO_x and methods for removing NO_x from flue gases. Furthermore, this work focuses on a project built a heat-plant TEPLÁRNA UE-Komorany a.s., where the aim is to reduce oxides of nitrogen (NO_x) from flue gas by primary way, which has been designed for the selected boiler. The main idea of this section is to assess the state before and after the recirculation of exhaust gas recirculation, and compare them.

KEYWORDS

NO_x , oxygen, O_2 , CO, the recirkulation, fluid boiler, heat plant UE Komořany a.s., excess of O_2 , spaliny, chimney loss,

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, na téma „recirkulace fluidních kotlů“, vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, které tvoří přílohu této práce a neporušil jsem autorská práva.

V Praze, dne 19.6.2015

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Františku Hrdličkovi, CSc. za jeho odborné vedení a také Doc. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. za cenné rady a připomínky. Dále pak děkuji vedení teplárny UE Komořany a.s., konkrétně technickému řediteli Ing. Petru Marešovi za cenné rady a veškeré poskytnuté informace, bez kterých by nemohla vzniknout tato bakalářská práce.

Obsah

1	Úvod	11
2	Znečištění ovzduší a jeho zdroje	12
2.1	Znečištění ovzduší	12
2.2	Nejvýznamnější redukce emisí	12
2.2.1	Odsiřování: SO ₂	12
2.2.2	Denitrifikace: NO _x	13
2.3	Zdroje znečištění ovzduší	13
2.3.1	Mobilní ZZO	14
2.3.2	Stacionární ZZO	14
3	NO_x, vznik a vlivy na jejich produkci	15
3.1	Obsah dusíku	15
3.2	Oxidy dusíku, NO _x	17
3.2.1	Oxid dusnatý NO	17
3.2.2	Oxid dusičitý NO ₂	17
3.3	Mechanismy vzniku NO _x	17
3.3.1	Termické NO _x	17
3.3.2	Promptní (rychlé) NO _x	19
3.3.3	Palivové NO _x	19
3.4	Optimalizace spalování z hlediska tvorby NO _x a CO	22
3.5	Vlivy na tvorbu NO _x	23
3.5.1	Vliv jemnosti mletí na tvorbu NO _x	23
3.5.2	Vliv vlastností paliv na tvorbu NO _x	23
4	Způsoby opatření pro snížení NO_x	24
4.1	Primární opatření	24
4.2	Sekundární opatření	25
5	Legislativní ustanovení pro emisní limity No_x stacionárních zdrojů v ČR	26

5.1	Specifické emisní limity a stavové vztažné podmínky pro spalovací stacionární zdroje	26
6	Technický popis fluidního kotle K6	27
6.1	Všeobecný popis	27
6.2	Schéma kotle	27
7	Návrh recirkulačního okruhu pro TKY	28
7.1	Problematika recirkulace spalin TKY	28
7.2	Návrhy projektových řešení	28
8	Souhrn a porovnání účinků recirkulaci spalin	30
8.1	Rozbor paliva	30
8.2	Předpoklady a odhady účinnosti recirkulace	30
8.2.1	Předpokládaná redukce NO _x	30
8.3	Vyhodnocení naměřených dat	30
8.3.1	Výstupní hodnoty: teplota spalin, mn. páry, obsah NO _x a CO spalin 30	
8.3.2	Výstupní hodnoty: přebytek O ₂ ve spalinách	33
8.4	Naměřené vstupní/výstupní hodnoty	34
9	Stanovení účinnosti kotle K6 nepřímou metodou	35
9.1	Příloha	37
9.1.1	Výpočet dle normy ČSN 07 0302	37
10	Závěr	38
11	Seznam použitých zdrojů:	39
12	Seznam použitých obrázků:	41
13	Seznam použitých tabulek:	41
14	Seznam všech použitých zkratk:	41
15	Seznam příloh:	42

1 Úvod

Už od dob zavádění uhelných elektráren zde byl velký problém, který se týkal znečišťování ovzduší. Od této doby uplynuly desítky let, kdy vznikaly různé projekty (např. odsiřování), které měly za cíl co nejvíce snížit obsah škodlivých látek (síry) ze spalin kotlů. V dnešní době jsou nejaktuálnějším znečišťujícím faktorem oxidy dusíku. Tyto oxidy dusíku (NO_x) mohou mít za následek tvorbu fotochemického smogu, kyselých dešťů, okyselování vodních ploch či vod a také mají negativní vliv na vegetaci. [3]

Jedním z možných řešení pro odstranění tohoto problému je recirkulace spalin vycházejících z fluidních kotlů. Dnes tento primární systém s oblibou využívá mnoho uhelných elektráren v České republice, hlavně především díky své nízkonákladové údržbě. Důvodem je zákon o ochraně životního prostředí (vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší), který říká, že do roku 1. 1. 2016 musí mít všechna zařízení dle svého výkonu a paliva sníženou produkci NO_x . Tento systém spočívá v odvádění části spalin z kouřovodů zpětně do spalovacího prostoru kotle, aby se pro fluidaci paliva nemusel přivádět další vzduch, který by podpořil oxidaci vzdušného dusíku N_2 . [3]

2 Znečištění ovzduší a jeho zdroje

2.1 Znečištění ovzduší

Znečištění ovzduší zahrnuje celou škálu zdrojů ať chemických, fyzických či biologických, které mají negativní vliv na kvalitu ovzduší a atmosféry.

Téma znečištění ovzduší se stalo aktuálním na přelomu devatenáctého a dvacátého století, kdy největší intenzity nabylo v průběhu dvacátého století díky stále se zvyšujícím nárokům na produkci elektrické energie a trvá dodnes. Tuto intenzitu způsobily nové průmyslové zóny jako hnědouhelné a černouhelné elektrárny, hutě a slévárny. Poměrně menší procento zaujímaly mobilní zdroje jako automobily, vlaky, lodě či letadla.

Od roku 1989 se stav ovzduší nad Českou republikou razantně zlepšil. Pomohly tomu zákony, které přesně stanovily emisní limity nebo mezinárodní dohody (např.: *Kjótský protokol*, ve kterém se země z celého světa zavazují k individuálním snížením emisí). [4, 9]

V dnešní době jsou největší hrozbou pro ovzduší mobilní a statické zdroje spalující pro svou potřebu paliva jako jsou pevná paliva (např.: uhlí, biomasa, rašelina), kapalná paliva (např.: zkapalněný plyn) a plynná paliva (např.: koksárenský plyn, vysokopecní plyn, zemní plyn), ale také sami občané domácím vytápěním.

K nejvíce škodlivým a nejagresivnějším látkám, které bychom našli ve spalinách uhelných elektráren patří oxid siřičitý SO_2 , oxidy dusíku NO_x (např.: oxid dusnatý: NO , oxid dusičitý: NO_2), TZL (tuhé znečišťující látky) a CO (oxid uhličitý). [4]

2.2 Nejvýznamnější redukce emisí

2.2.1 Odsiřování: SO_2

Ke konci minulého století byl nejaktuálnějším problémem oxid siřičitý SO_2 , neboli síra obsažená v uhlí používaném v uhelných elektrárnách. Obsah síry v uhlí připadá na 5-10% pro hnědé a asi 1% pro černé uhlí. V České republice v průměru uhlí obsahuje 1-3% síry, které při spalování v kotlích odchází z 5% do popele a z 95% spalinami v podobě SO_2 . [4]

Proto byl vydán zákon o ovzduší 309/91Sb., respektive jeho novely zákonem 218/92 Sb. Tento zákon zavedl emisní limity pro nové střední a vysoké zdroje. Zákon za střední zdroje považoval zdroje od 0,2 do 5 MW a za velké považoval od 5 MW a více. Každý existující střední a velký zdroj měl stanoven emisní limit pro stávající zdroje, který vycházel z minima dosažitelných emisí na daném zdroji. Jednou z nejpoužívanějších metod pro odsiřování v uhelných elektrárnách v České republice je tzv. mokrá vápencová vypírka. Důvody pro odsiřování byly pro dopad síry na životní prostředí a na člověka samotného. [4]

2.2.2 Denitrifikace: NO_x

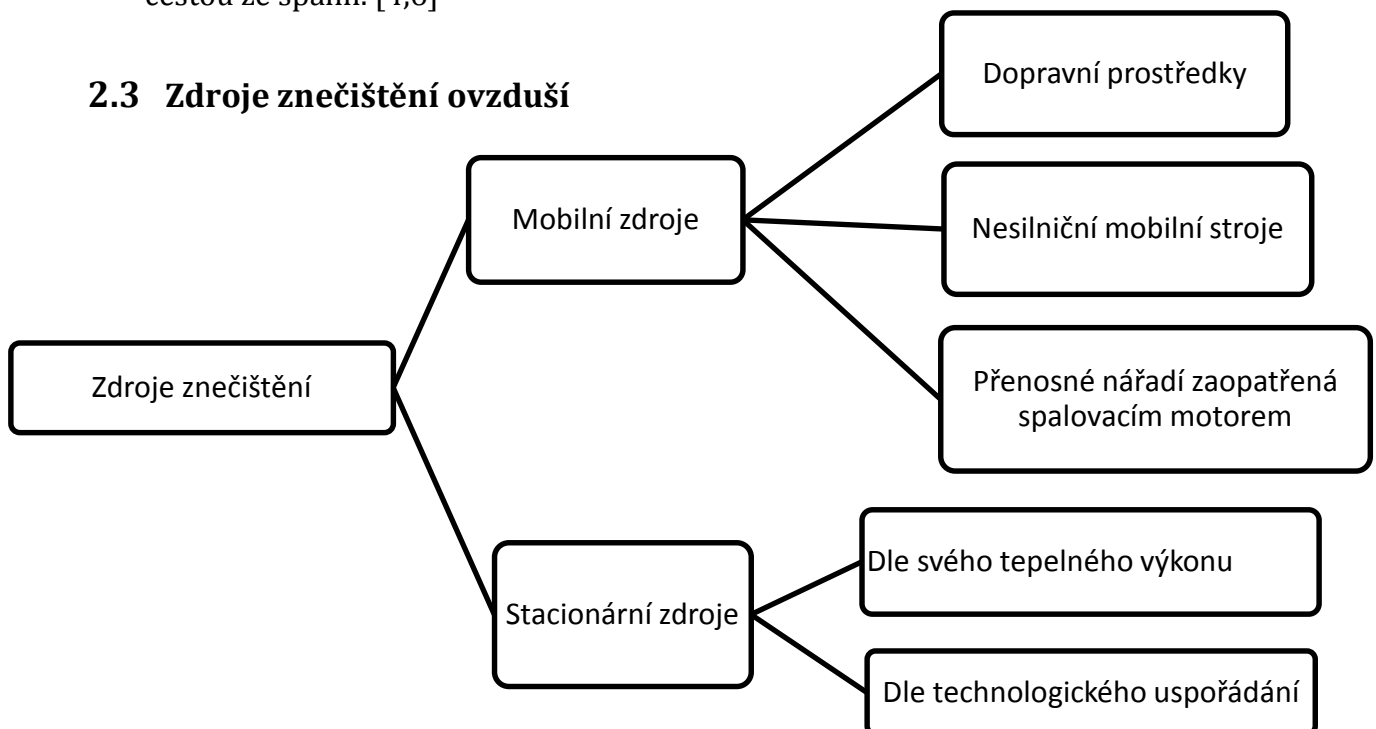
Denitrifikace je o něco složitější proces, než je odsiřování. Denitrifikace spalin může být aplikována dvěma způsoby či jejich kombinací. První opatření je tzv.: primární opatření a druhé opatření je tzv.: sekundární opatření.

Primární opatření zamezuje tvorbě NO_x již v prostoru hoření a dělí se na několik generací dle nutnosti snížení tvorby NO_x. Nejznámější metody jsou např.: LNB(Low NO_x Burner), TSC(Two Stage Combustion), BOOS(Burner Out Of Service), FGR(Flue Gas Recirkulation).

Sekundární opatření spočívá v odstraňování již vzniklých NO_x v prostoru kouřovodů a to různými katalyzátory s redukčními činidly. Nejznámější metody jsou např.: SNCR(Selective Noncatalyst Reduction) , SCR(Selective Catalyst Reduction). V podstatě organický dusík obsažený v palivu, ale i dusík obsažený ve vzduchu, je při vysokých teplotách v prostoru spalování zoxidován na různé oxidy dusíku jako je např.: oxid dusnatý NO z cca.:95%, oxid dusičitý NO₂ z cca.:5%. Pokud teplota v kotli stoupne na 900 C, tak se začne vytvářet další oxid dusný N₂O. Obsah a tvorbu těchto oxidů ve spalinách ovlivňuje především teplota v prostoru hoření a množství kyslíku přivedeného do prostoru plamene.

Metody pro odstraňování oxidů dusíku jsou dvě, primární a sekundární. Primární metoda se nazývá recirkulace a je řešena mechanickou (fyzickou cestou) odstraňování spalin, na rozdíl od sekundární metody, která spočívá v chemické reakci, kdy už vytvořené oxidy Nox ve spalinách jsou odstraňovány chemickou cestou ze spalin. [4,6]

2.3 Zdroje znečištění ovzduší



Obr. č. 2.1 rozdělení zdrojů znečištění [11]

2.3.1 Mobilní ZZO

Mobilní zdroj znečištění je jakýkoliv samohybný či jinak pohyblivý zdroj využívající spalovací motor, který je zdrojem emisí. Spalovací motor může být jeho pohonnou jednotkou nebo jeho nedílnou součástí technologického vybavení stroje.

Mobilní zdroje se dále rozdělují:

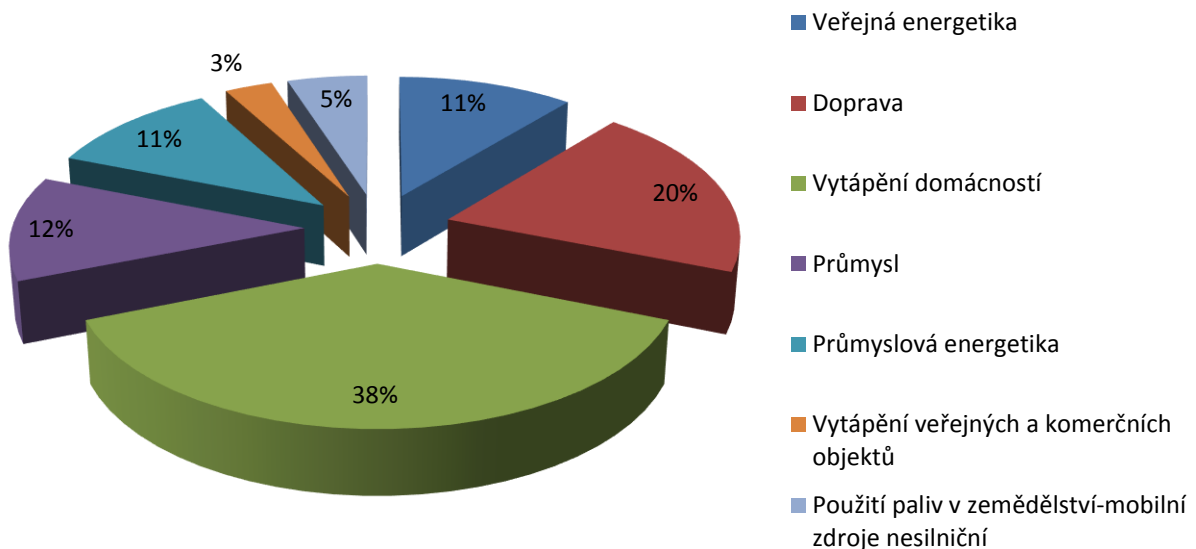
- Dopravní prostředky (silniční vozidla, železniční stroje, lodě, letadla)
- Nesilniční mobilní stroje (stavební stroje, zemědělské stroje, stroje na údržbu a opravu silnic, kompresory, generátory a podobná zařízení)
- Přenosná nářadí zaopatřená spalovacím motorem (motorové pily, sekačky, pneumatická kladiva a podobná zařízení) [11]

2.3.2 Stacionární ZZO

Stacionární zdroj znečištění ovzduší je zařízení spalovacího či jiného technologického procesu, který znečišťuje či může znečišťovat ovzduší jako uhelné elektrárny, hutě, doly, šachty, spalovny odpadů, lomy, skladiště, a to jak rozptylem, hořením, tak únikem nebezpečných látek do ovzduší. [11]

Stacionární zdroje se dále rozdělují:

- **Podle míry svého vlivu na znečištění ovzduší**
 - Zvlášť velké
 - Velké
 - Střední
 - Malé
- **Podle technologického uspořádání**
 - Zařízení spalovacích technologických procesů, u kterých oxidace paliva je součástí procesu hoření na využití uvolněné tepelné energie
 - Spalovny odpadů a zařízení určená pro spolužalování odpadů
 - Ostatní stacionární zdroje
- **Stroje dělí se dle svého tepelného výkonu**
 - *Zvlášť velké spalovací zdroje*, které jsou zdrojem znečištění o jmenovitém tepelném příkonu 50MW a více bez ohledu na jmenovitý tepelný výkon
 - *Velké spalovací zdroje* jsou zdroje, o jmenovitém tepelném výkonu od 5MW do 50MW (nespadají pod zvlášť velké zdroje)
 - *Střední spalovací zdroje*, jsou zdroje se jmenovitým tepelným výkonem od 0,2MW do 5 MW včetně
 - *Malé spalovací zdroje*, jsou zdroje se jmenovitým tepelným výkonem nižším, než 0,2MW
- Celkový podíl jednotlivých zdrojů je graficky vyjádřen na obr.:2.2 [11]



Obr. č. 2.2 vyjádření míry znečištění jednotlivých zdrojů [5]

3 NO_x, vznik a vlivy na jejich produkci

3.1 Obsah dusíku

Dusík v uhlí je součástí prchavé hořlaviny a pro česká uhlí se jeho obsah v hořlavině pohybuje v rozmezí 0,7% až 1,6% a pro česká černá uhlí v rozmezí 1,1% až 1,9%.

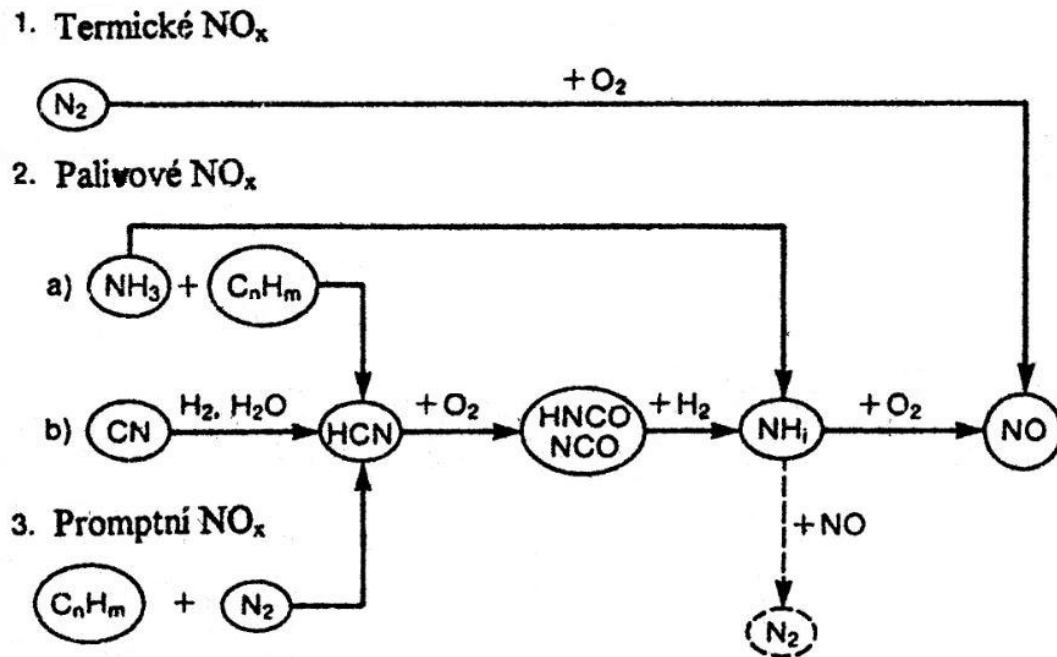
Při spalování uhlí pak teoretický objem dusíku ve spalinách tvořený uvolněným dusíkem ze spálení hořlaviny paliv a z dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu ($\alpha = 1$) lze stanovit ze známého vztahu.

$$O_{N_2} = 0,78 O_{VZ} + 0,8 \frac{N^r}{100} \quad [m_N^3/kg] \quad [1]$$

- Kde:
- O_{VZ} $[m_N^3/kg]$ je teoretický objem suchého spalovacího vzduchu, na 1kg uhlí.
 - N^r [%] obsah dusíku v hmotnostních procentech v původním palivu.

Ale protože takto uvedený vztah neudává žádný přehled o vzniku NO_x, ale pouze jeho obsahu, bude v následující kapitole detailně popsána jeho tvorba.

Při spalování částic uhlí vznikají oxidy dusíku (NO_x) jako směs oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO_2), přičemž výrazně převažuje obsah NO . NO_2 je však několikanásobně toxičtější než NO . Mechanismus vzniku NO je na **obr. č. 3.3** [1]



Obr. č. 3.3 Mechanismus vzniku NO . [1]

3.2 Oxidy dusíku, NO_x

3.2.1 Oxid dusnatý NO

Oxid dusnatý je bezbarvý, relativně reaktivní plyn. I ve vysoce znečištěném ovzduší je jeho koncentrace zlomek ppm (1 ppm ~ 1340 μg/m³). Prahová hodnota pro průmyslovou expozici je 25 ppm. NO ve větších prostředích je předchůdcem NO₂, který je důležitý pro tvorbu fotochemického smogu. Ve vnitřním prostředí za nepřítomnosti ultrafialového záření a ozónu probíhají oxidační reakce řadu hodin, resp. mnohem déle se srovnatelnými dobami výměny vzduchu infiltrací. Tedy uvnitř budov jsou emise NO resp. oxidace NO a NO₂ nevýznamné. [1,4]

3.2.2 Oxid dusičitý NO₂

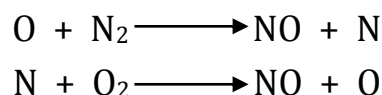
Oxid dusičitý je červeně hnědý plyn, jehož charakteristickou barvu lze někdy vidět za smogových situací na obloze. NO₂ je reaktivní, silně oxidická látka. Expozice po dobu jedné hodiny v prostředí s koncentrací 0,5 až 1,5 ppm NO₂ (1000 - 3000 μg/m³) již způsobí dýchací potíže. Vnější koncentrace NO₂ v městech dosahují hodnot 0,05 – 0,2 ppm (100 - 400 μg/m³). V kombinaci s uhlovodíky a slunečním zářením NO₂ vytváří ozón, dále peroxyacetyly nitrates (organické peroxidy) PAN a další produkty fotochemického smogu. Obojí, tj. ozón i PAN dráždí oči a otravují vegetaci. To jsou tedy důvody, proč jsou přípustné emise NO_x limitovány. [1,4]

3.3 Mechanizmy vzniku NO_x

Dle původu, resp. způsobu vzniku rozlišujeme tři skupiny oxidů dusíku a to tzv. *termické, promptní (rychlé) a palivové*. [1]

3.3.1 Termické NO_x

NO vzniká ze spalovacího vzduchu, který obsahuje kyslík a dusík, který není zcela inertní, ale může do určité míry reagovat za vyšší teploty s kyslíkem a tvoří tak kysličník dusnatý NO. Toto je první zdroj, resp. forma vzniku oxidu dusíku. Tento mechanismus je podmíněn vysokou teplotní energií, která aktivuje celý proces při teplotách nad 1000°C a to při relativně dlouhé prodlevě na ní. Při teplotách nad 1000°C se rozkládají některé molekuly kyslíku a dusíku (O₂ a N₂) na atomy O a N.



Tyto atomy mohou poté reagovat s O₂ a N₂ a mohou tvořit NO a to podle vztahu (Zeldovič).

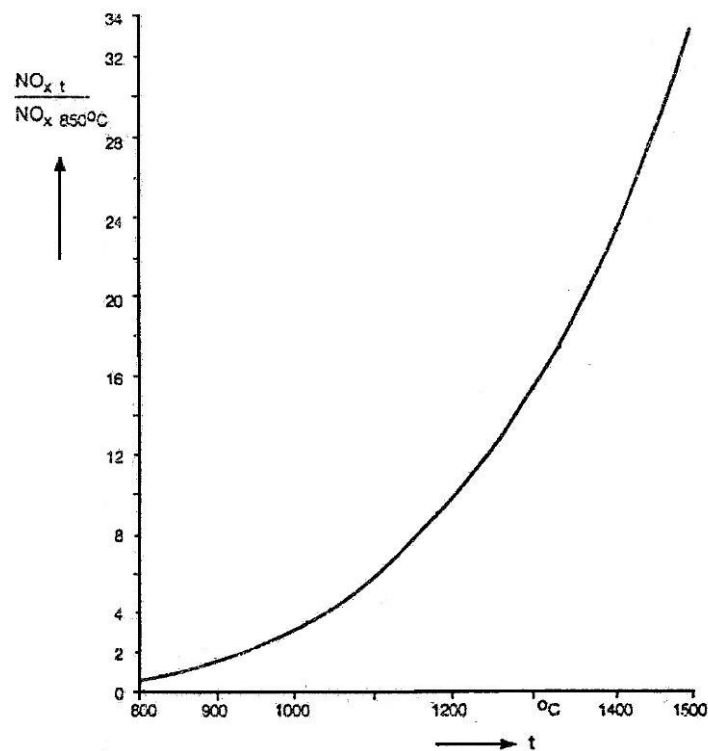
$$\frac{d NO}{d \tau} = \frac{4 \times 10^{21}}{T} \cdot e^{\frac{-68400}{T}} \cdot x_{N_2} \cdot \sqrt{x_{N_2}} \quad [1]$$

- Kde: - T [K] teplota v ohništi
- x molární podíly O₂ resp. N₂

Tato rovnice ukazuje silný vliv teploty a koncentrace O₂ na vznik NO.

Vzhledem k potřebné vysoké teplotě a dlouhé době setrvání na této teplotě nejsou u práškových granulačních ohnišť „termické NO_x“ rozhodující pro celkové emise NO_x.

Na **obr. č. 3.4** je pro představu vynesena graf závislosti tvorby „termických NO_x“ na teplotě v poměru s hodnotou při 850°C (což je teplota ve fluidních ohništích, v nichž se při spalování uhlí předpokládá jen produkce palivového a promptního NO_x). [1]



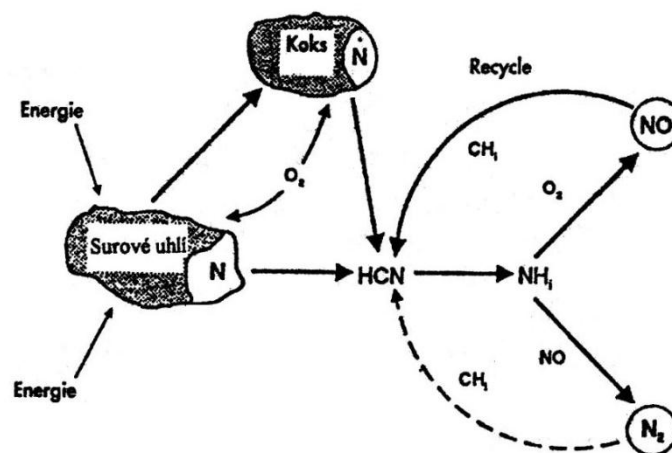
Obr. č. 3.4 „Termických NO_x“ – poměrná hodnota. [1]

3.3.2 Promptní (rychlé) NO_x

Tento mechanismus je založen na náhradě molekul vzdušného dusíku radikály CH_i , a to v primární reakční zóně uhlovodíkového plamene. Vzniká HCN a další oxidací přes NH_i vzniká NO. Při spalování práškového uhlí nemá „promptní NO_x “ z hlediska celkových emisí NO_x rovněž velký význam. [1]

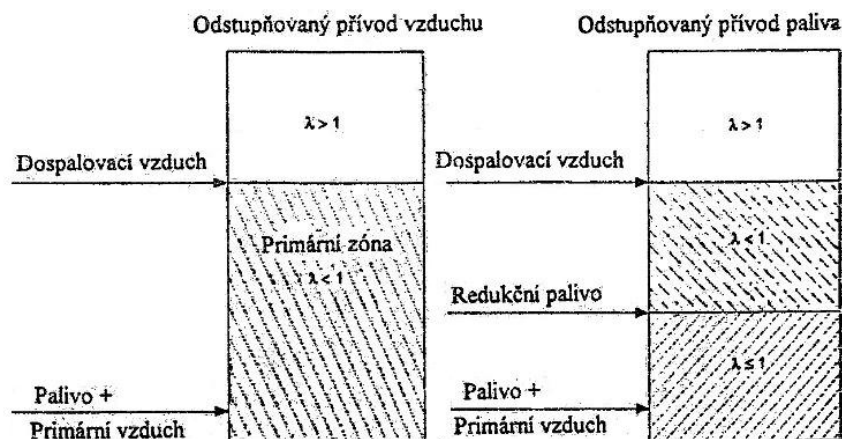
3.3.3 Palivové NO_x

Tento mechanismus má při spalování práškového uhlí rozhodující význam z hlediska celkové emise NO_x , což je zjevné na **obr.: 3.7** (pro případ fluidního spalování s teplotou plamene cca 850°C). Dusíkaté sloučeniny vázané v palivu jsou s rychlými reakcemi s radikály přeměněny na HCN a další relativně pomalou reakcí na sloučeniny NH_i .



Obr. č. 3.5 Mechanismus tvorby NO z palivového dusíku. [1]

Mechanismus tvorby z palivového dusíku je samostatně znázorněn na **obr. 3.5**. Podle lokálních podmínek může dále proběhnout přeměna na NO nebo proběhne redukce na molekulární dusík. Toto má značný význam při redukování emisí NO_x , neboť mezi „lokální podmínky“ patří i vytvoření redukční atmosféry v oblasti spalování, např.: odstupňování přívodem vzduchu. Při nedostatku kyslíku se zesiluje redukce na molekulární dusík. Mezi lokální podmínky patří i odstupňovaný přívod paliva (Reburning).

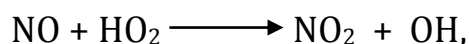


Obr. č. 3.6 Odstupňovaný přívod vzduchu a paliva. [1]

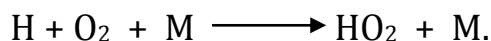
Hlavními faktory na tvorbu „palivových NO_x“ jsou tedy jako u „termických NO_x“ přebytek vzduchu, resp. molární podíl O₂, obsah dusíku v prchavé hořlavině a obsah dusíku v tuhé hořlavině (mechanismus tvorby NO je u obou složek různý) a jemnost mletí.

Veškerý palivový N se však nespálí, spálí se jen 10% až 35%. Stupeň oxidace palivového dusíku klesá se stoupajícím obsahem N v palivu. Je tedy zřejmé, že vlastnosti paliva silně ovlivňují tvorbu palivového NO a jeho obsah ve spalinách.

Co se týká tvorby NO₂, předpokládá se všeobecně, že nevzniká přímo oxidací dusíku v ohništi, ale další oxidací dle rovnice

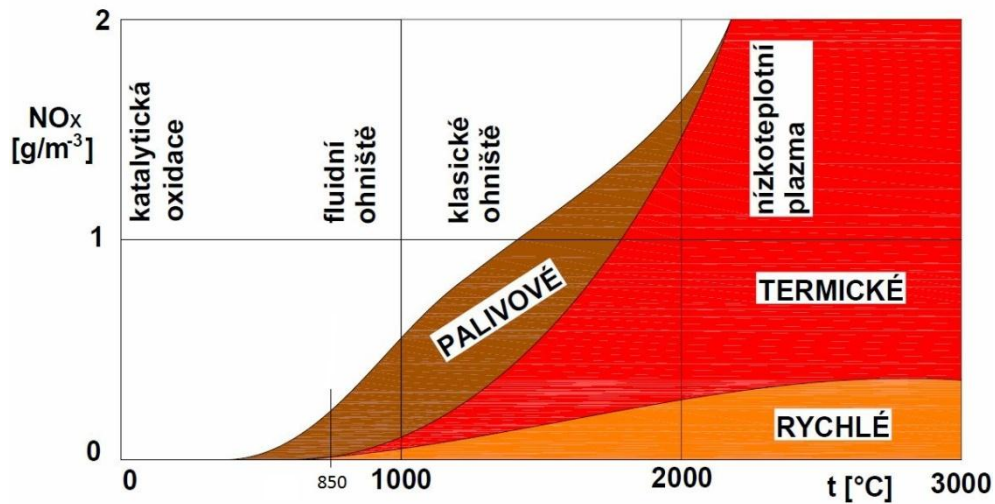


kdy HO₂ vzniká reakcí radikálů H s molekulárním kyslíkem a další látkou podle rovnice



Tvorba HO₂ vzniká při nižších teplotách. Vlivný radikál HO₂ není příliš reaktivní, ovšem na druhé straně reaguje i s NO, vzniklými i jinými reakcemi v plamenu. Při vyšších teplotách probíhají jiné reakce HO₂. Tvorba NO₂ v plamenu může tedy někdy paradoxně stoupat i při opatřeních, kterými se snižuje teplota plamene.

Pro přehlednost je na **obr.: 3.7** uveden graf s celkovými podíly jednotlivých mechanismů na tvorbu NO_x v závislosti na teplotě v prostoru plamene. [1]

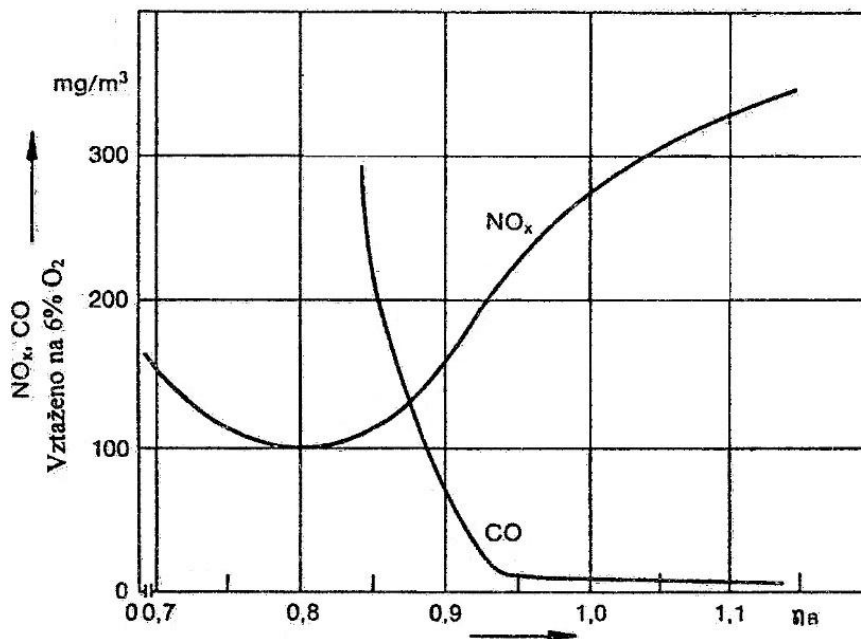


Obr. č. 3.7 Tvorba NO_x v závislosti na teplotě. [3]

3.4 Optimalizace spalování z hlediska tvorby NO_x a CO

Provoz s velice malým přebytkem kyslíku O_2 (podstechiometrický) vede k silné redukci NO_x , přebytek vzduchu menší než 0,9 již k dalšímu omezení tvorby NO_x výrazně nepřispívá. Také vliv složení paliva na tvorbu NO_x se při podstechiometrickém provozu již tak neuplatňuje.

S redukcí NO_x při podstechiometrickém provozu úzce souvisí produkce CO. Tato souvislost je znázorněna na **obr.: 3.8**.



Obr. č. 3.8 Průběh tvorby NO_x a CO v závislosti na přebytku vzduchu v prostoru plamene. [1]

Emisní minimum NO_x je při přebytku vzduchu 0,8, ohniště však s tímto přebytkem nelze provozovat vzhledem k vysoké hodnotě CO. To znamená, že i když jsou v ohništi teploty vyšší, než 1000°C , musí se při hledání cest pro redukcí NO_x respektovat zvyšující se podíl spalitelných látek na odchodu z ohniště, např.: zbytkový koks (obsah spalitelného uhlíku v popílku) a CO. [1]

3.5 Vlivy na tvorbu NO_x

3.5.1 Vliv jemnosti mletí na tvorbu NO_x

Příznivou roli hraje u práškových kotlů i vyšší jemnost mletí, která zajistí rychlejší vznícení a vytvoření vysokoteplotního redukčního plamene (při podstechiometrickém spalování) a neoxidované uhlovodíky při této vysoké teplotě působí redukčně na již vzniklé NO_x a převádí je na N₂.

Při hrubším mletí jednak probíhá nárůst teploty pomaleji, resp. se dosáhne teploty nižší, jednak hrozí riziko většího mechanického nedopalu zrn, resp. je nutno volit větší α a prostředí je méně redukční.

U nízkoemisních hořáků je tedy jemnější mletí výhodné, resp. žádoucí. Obava, že tím vzrůstá neekonomicky vlastní spotřeba, není ve většině případů na místě. Při cenové relaci mezi palivem a el. energií je nárůst vlastní spotřeby bohatě kompenzován úsporami paliva, jelikož ve většině případů dochází k výraznému poklesu mechanického nedopalu. [1,2]

3.5.2 Vliv vlastností paliv na tvorbu NO_x

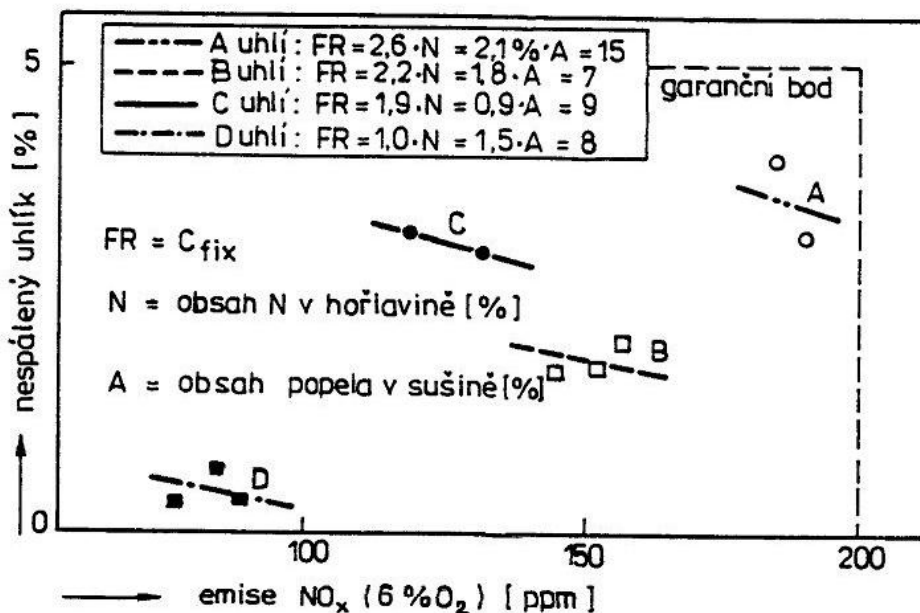
Dalším důvodem, proč je možno z hlediska omezování NO_x považovat za vhodnější paliva s vyšším prchavým podílem, je fakt, že aplikace primárního opatření, především snižování přebytku vzduchu, vede vždy k riziku zvyšování nedopalu. Nedopal může být limitující pro stupeň jejich aplikace. U paliv s vyšším prchavým podílem lze za jinak stejných podmínek obvykle dosáhnout menšího mechanického nedopalu, resp. progresivněji aplikovat primární opatření.

Celkový vliv prchavého podílu a obsah dusíku na vznik palivových NO se vyjadřuje jako tzv.: palivový faktor (fuel factor) a je definován rovnicí: [2]

$$FF = a \frac{C_{fix}}{V} + b (N - 1,0) \cdot c \quad [2]$$

- Kde:
- C_{fix} Obsah tuhého uhlíku
 - V Obsah prchavých látek
 - N Obsah dusíku
 - a,b,c Konstanty
 - $\frac{C_{fix}}{V} = FR$ Palivový poměr (fuel ratio)

Pro přehled souvislosti mezi faktorem FR =, obsahem dusíku a emisí NO_x znázorňuje graf na **obr. 3.9**. Z grafu můžeme vidět, že nejlepších výsledků při 5% nespáleného uhlíku dosahuje uhlí typu D.



Obr. č. 3.9 Vliv vlastností paliva na tvorbu NO_x a nedopal. [2]

4 Způsoby opatření pro snížení NO_x

Možnosti snížení emisí NO_x lze rozdělit do dvou kategorií. Jsou to tzv. primární opatření, která především omezují finální tvorbu NO_x v ohništi v rámci spalovacího procesu, a opatření sekundární zprostředkovávající likvidaci již vzniklých NO_x v prostoru kouřovodů speciálními postupy a systémy (tzv. denitrifikace). [2,4]

4.1 Primární opatření

Primární opatření představují v podstatě specifické řízení spalovacího režimu, jsou méně nákladná, dosahují však menšího snížení obsahu NO_x než opatření sekundární. Uvádí se, že při využití všech možností primárního opatření lze snížit tímto způsobem emisi NO_x u zcela nově konstruovaných zařízení až o 70%. Při úpravách již provedených při spalovacích zařízení jsou možnosti většinou omezenější, takže obvykle se dosáhne snížení o 40 až 60%.

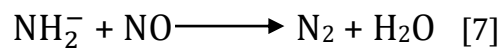
U tuhých a kapalných paliv může být obsah NO_x ovlivněn i vhodnou volbou paliva resp. některými jeho vlastnostmi hořlavině, jemnost mletí apod. Lze tedy konstatovat, že primární opatření jsou do určité míry různá podle druhu paliva. Je tomu též proto, že dle druhu paliva a dle typu spalovacího zařízení (platí zvláště pro tuhá paliva) se mění podíly jednotlivých typů NO_x . Kromě toho se mění podíly, resp. emise jednotlivých typů NO_x (termické, palivové, promptní) v závislosti na teplotě plamene, jak to ukazuje obr.: 3.6.

Zatímco dle **obr.: 3.6** množství vznikajících termických NO_x s teplotou silně stoupá, závislost množství vznikajících palivových NO_x vzrůstá s růstem teploty plamene podstatně pomaleji, zvláště v oblasti vyšších teplot.

Naopak ovšem v oblasti nižších teplot plamene, tj. kolem 1000°C až 1200°C , kdy se termické NO_x objevují zřídka, je již množství palivových NO_x relativně dosti vysoké a v této oblasti ještě s teplotou stoupá. V oblasti vyšších teplot je nárůst palivových NO_x s teplotou rapidně nižší. [1]

4.2 Sekundární opatření

Sekundární opatření spočívá v odstraňování již vzniklých NO_x ze spalin. Všechny sekundární metody jsou založeny na reakci iontů NH_2^- s NO za vzniku molekulárního dusíku N_2 a vody H_2O .



Jako zdroje radikálů NH_2^- se používají nejčastěji látky:

- Čpavková voda NH_4OH
- Močovina $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
- Kyanomočová kyselina $(\text{HNCO})_3$

Účinnost selektivní nekatalytická redukce (SNCR) je 40 až 60 %. Hlavním problémem SNCR metody je relativně úzké teplotní okno ($850\text{-}1050^\circ\text{C}$). Pokud je reagent vstřikován do oblasti s nízkou teplotou, oxidy dusíku NO_x nereagují s radikálem NH_2^- , protože reakční rychlost je nízká. To má za následek zvýšení koncentrace čpavku NH_3 ve spalinách tzv. čpavkový skluz. [1,6,7]

5 Legislativní ustanovení pro emisní limity NO_x stacionárních zdrojů v ČR

Dnes, jak již bylo zmíněno, je nejaktuálnější problematikou odstraňování oxidů dusíku ze spalin kotlů. Díky jejich negativnímu vlivu na ovzduší a životní prostředí musely být zredukovány a tyto limity byly sjednoceny nejprve zákonem č. 86/2002 Sb., později zákonem č. 201/2012 Sb. a nejaktuálnější je vyhláška č.451/2012 .

Tato vyhláška přesně určuje emisní limity pro jednotlivé stacionární zdroje, udává frekvenci pro kontrolu těchto limitů a jejich provádění.

Sbírka se soustředí na emise oxid siřičitého SO_2 , tuhé znečišťující látky TZL, oxidy dusíku NO_x a oxid dusnatý CO.

Tato práce se specializuje na problematiku odstraňování emisí NO_x v teplárně UE Komořany, a proto jim v následující kapitole bude soustředěna větší pozornost. [5,10]

5.1 **Specifické emisní limity a stavové vztažné podmínky pro spalovací stacionární zdroje**

O celkovém jmenovitém tepelném příkonu *50MW a vyšším*, pro něž byla podána kompletní žádost o první povolení provozu, nebo odborné povolení podle dřívějších právních předpisů před 7. lednem 2013 a byly uvedeny do provozu nejpozději 7. ledna 2014, jsou uvedeny v tabulce č. 1. [10]

Tabulka č. 1

Specifické emisní limity [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]				
Druh paliva	50-100 MW			
	SO_2	NO_x	TZL	CO
Pevné palivo obecně	400	300	30	250
Biomasa	200	300	30	250
Plynné palivo obecně	35	200	5	100
-	100-300MW			
Pevné palivo obecně	250	<u>200</u>	25	250
Biomasa	200	250	20	250
Plynné palivo obecně	35	200	5	100

Informace uvedené v této tabulce vztahují k zařízením používaným v teplárně UE Komořany resp.: ke kotli K6 ($P=100\text{MW}$), dále zařízení nepodléhají žádným dalším interním limitům. [10]

6 Technický popis fluidního kotle K6

6.1 Všeobecný popis

Kotel K6 je bubnovým kotlem s přirozeným oběhem paro-vodní směsi v membránových trubkách, tvořících stěny topeniště, posilované oběhovými čerpadly v hadech fluidního lože. Předehřev páry je prováděn v přehřívacích páry, umístěných za komorou topeniště. Regulace teploty páry je prováděna vstřikováním napájecí vody do přehřáté páry před koncovým stupněm přehříváku páry.

Kotel je vybaven topeništěm fluidního typu.

Vzduch potřebný pro spalování uhlí je přiváděn ventilátorem primárního vzduchu do fluidní komory a ventilátorem sekundárního vzduchu do spalovací komory, umístěné nad fluidní komorou. Primární vzduch je využit i pro fluidizaci lože.

Pro regulaci výkonu kotle a teploty lože je kromě regulování množství podávaného uhlí využívána výška lože, jakož i recirkulace popílku z kotelních výsypek a tkaninových filtrů.

Ohřev primárního a sekundárního vzduchu je prováděn v trubkových ohřívacích vzduchu.

Komora topeniště, mezitah a II. tah jsou zavěšeny na nosné konstrukci a dilatují směrem dolů. Fluidní komora a ohřívák vzduchu spočívají na nosné konstrukci kotle.

Odvádění strusky z fluidní komory v suchém stavu je prováděno šnekovým podavačem chlazeným vodou. [12]

6.2 Schéma kotle

Výkres fluidního kotle K6 je doložen v příloze č.:1.

7 Návrh recirkulačního okruhu pro TKY

7.1 Problematika recirkulace spalin TKY

Cílem recirkulace v severočeské teplárně Komořany bylo docílení nižšího obsahu NO_x ve spalinách v celé výkonové škále kotlů.

Jelikož konstrukční řešení kotlů (prim. vzduch) neumožňovalo dodržení stejného procenta kyslíku v celém provozním rozsahu kotle, muselo vedení teplárny přistoupit k výstavbě recirkulačního zařízení, které i při vyšších výkonech (nad 110t/h) umožňovalo provoz s nižším obsahem kyslíku a to díky náhradě fluidizačního vzduchu stejným objemem spalin.

Celkový zdroj vzduchu v prostoru plamene se rozděluje na vzduch určený pro hoření a nezbytnou fluidizaci paliva a na vzduch určený pouze k dohoření paliva. V projektu recirkulace TKY se přistoupilo na primární způsob recirkulace, tedy snížení NO_x .

Hlavní myšlenkou a stěžejním bodem je nahrazení přebytečného vzduchu (fluidizačního) stejným objemem spalin. To znamená, že na kotli budou zachovány podmínky fluidizace odpovídající současnému stavu (možnost 1). Druhou možností recirkulace (možnost 2) je ve zvýšení fluidizačních podmínek kotle (promíchávání, přestup tepla, rovnoměrnost). [8]

7.2 Návrhy projektových řešení

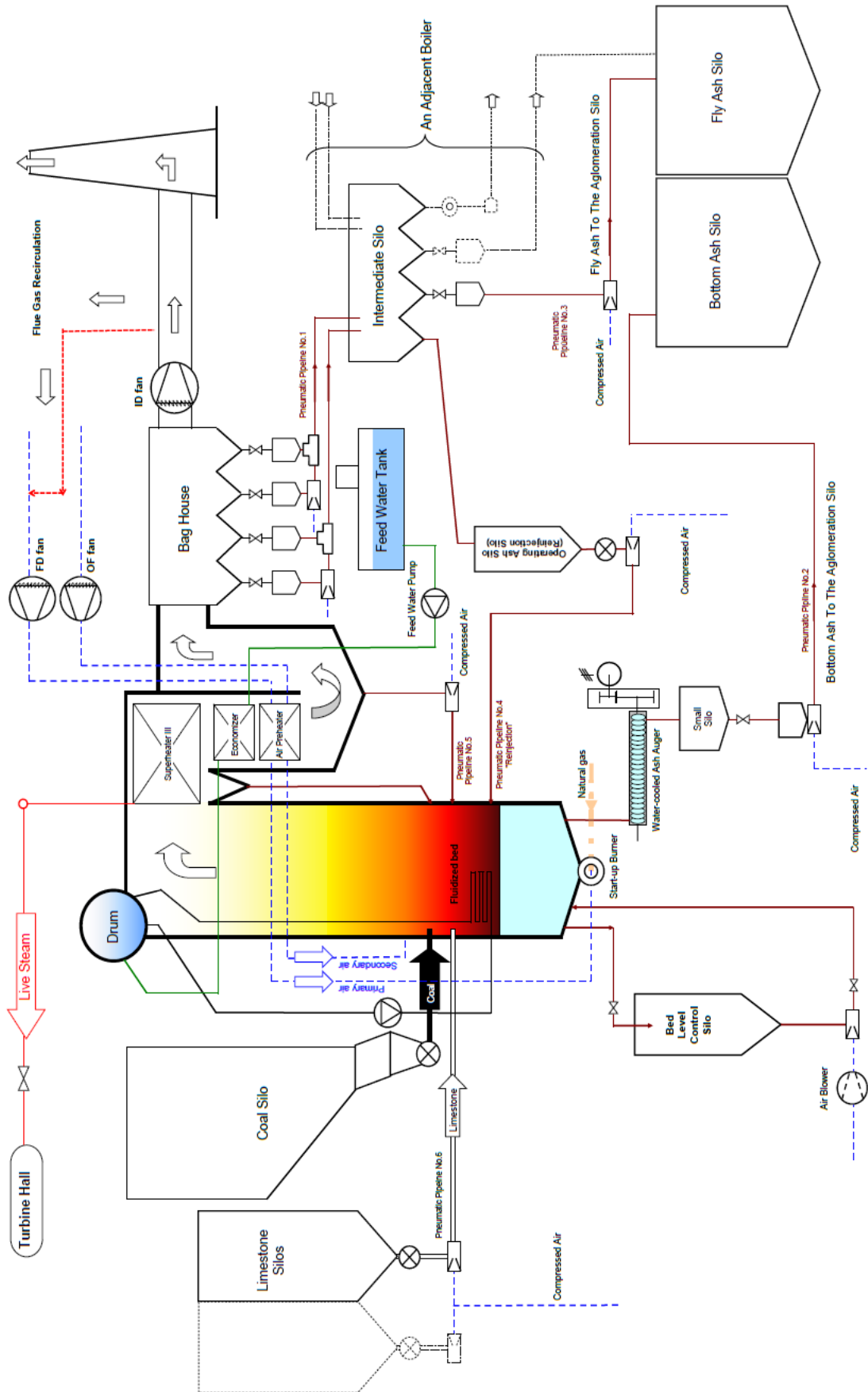
Recirkulace je navržena ve čtyřech řešeních:

- I. Varianta s převodem spalin do sání primárního ventilátoru
- II. Varianta s převodem spalin do sání primárního ventilátoru a odvodem tepla
- III. Varianta s převodem spalin za sání primárního ventilátoru a posilovacím ventilátorem
- IV. Varianta s převodem spalin do windboxu

Předpokládá se, že investičně nejméně náročná varianta bude varianta č. 1. V konečném důsledku byla zvolena varianta č.1. (převod spalin do sání primárního ventilátoru). [8]

Vybraná varianta je pro lepší představu znázorněna na **Obr. č. 7.1. Schématický výkres kotle K6**

General boiler scheme



Obr. č. 7.1. Schématický výkres kotle K6

8 Souhrn a porovnání účinků recirkulaci spalin

8.1 Rozbor paliva

Tabulka č. 2

Rozbor paliva					
	Ø2011/13			Ø2011/13	
Cr [%] hm	32,7	29,69	Nr [%] hm	0,44	0,64
Hr [%] hm	2,76	2,62	Wr [%] hm	25,5	27,15
Sr [%] hm	0,82	1,45	Ar [%] hm	25,48	27,21
Or [%] hm	12,3	11,16	Qi [kJ]	12 470	12630

Hodnoty v této tabulce se skládají z vážených ročních průměrů za dané období

8.2 Předpoklady a odhady účinnosti recirkulace

Jsou zde ohodnoceny veškeré přínosy, ale také vlivy či omezení související s recirkulací.

8.2.1 Předpokládaná redukce NO_x

Přesný odhad vývoje NO_x je možné většinou zjistit rozsáhlými matematickými modely či simulacemi, které jsou dále ještě korigovány experimentálními daty. Proto pro prognózu vlivu-přínosu recirkulace byly použity dva empiricky zjištěné vztahy.

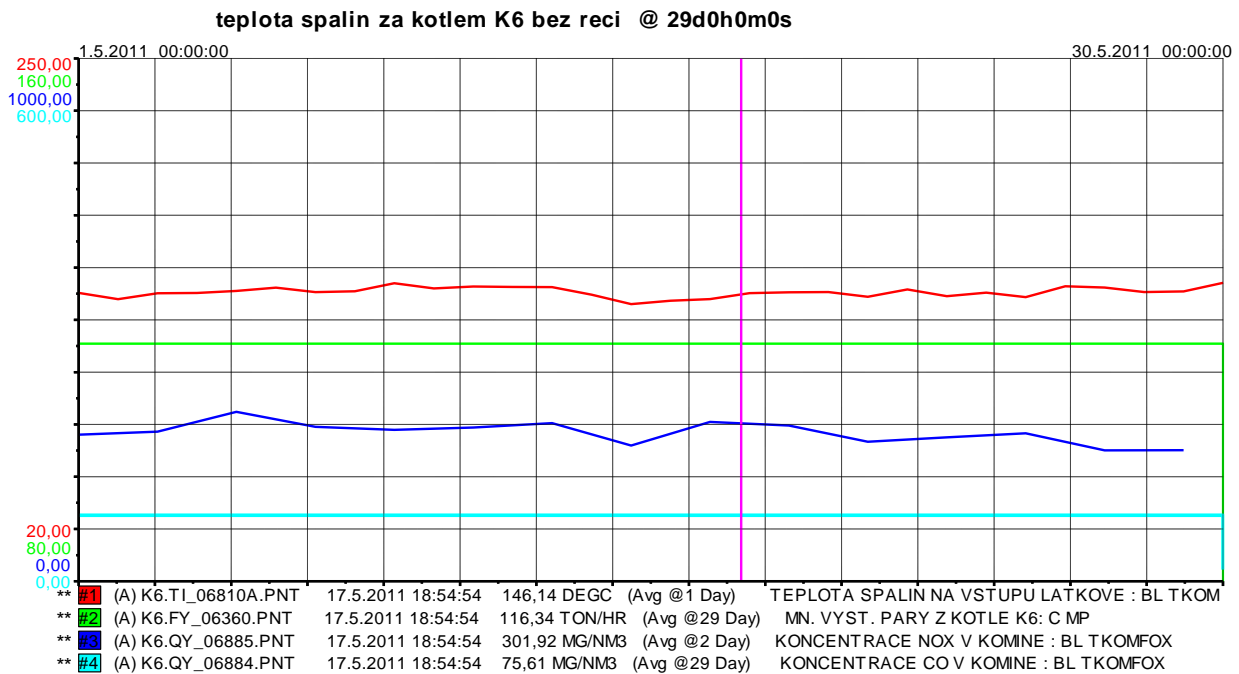
- **Metoda maximálního NO₂**
- **Metoda odhadu z kyslíku**

8.3 Vyhodnocení naměřených dat

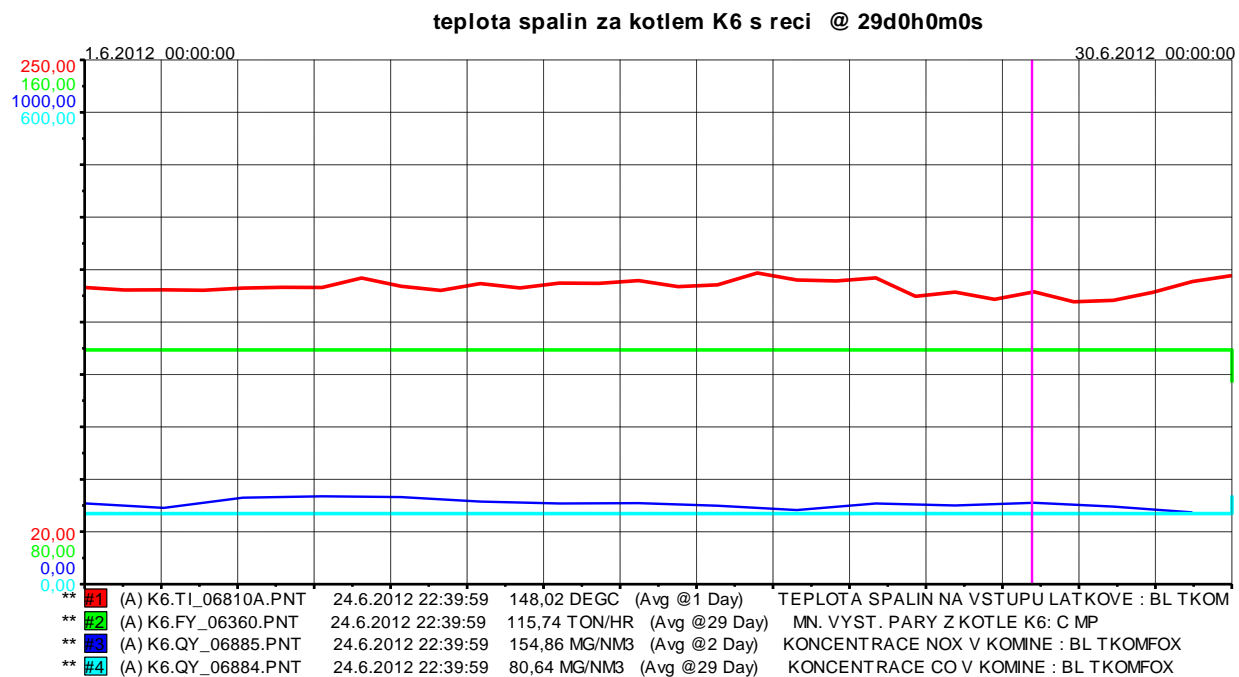
8.3.1 Výstupní hodnoty: teplota spalin, mn. páry, obsah NO_x a CO spalin

Recirkulační okruh byl na kotel K6 nainstalován v březnu roku 2012 a jeho spuštění do provozu bylo uskutečněno v dubnu téhož roku. Z důvodu najíždění nového systému a problémy s tím spojenými, by mohla být získaná data velmi zkreslená a proto jsou veškeré hodnoty včetně těch, které můžeme vidět v tabulce č. 2 brány z období před recirkulací (tj.:květen 2011) a období s recirkulací (tj.: červen 2013).

Pro příkladnou ukázkou můžeme na **obr.:8.1a/b** vidět změnu vybraných dat. Na **obr.: 8.1a** a **8.1b** můžeme vidět grafy, ke kterým byly zvoleny pro porovnání dva měsíce ze stejného ročního období tj. léto, které mají zhruba stejný průměrný parní výkon, počet provozních hodin.



Obr. č. 8.1a Graf: teplota spalin, parní výkon, NO_x, CO (1.-30. 5. 2011)

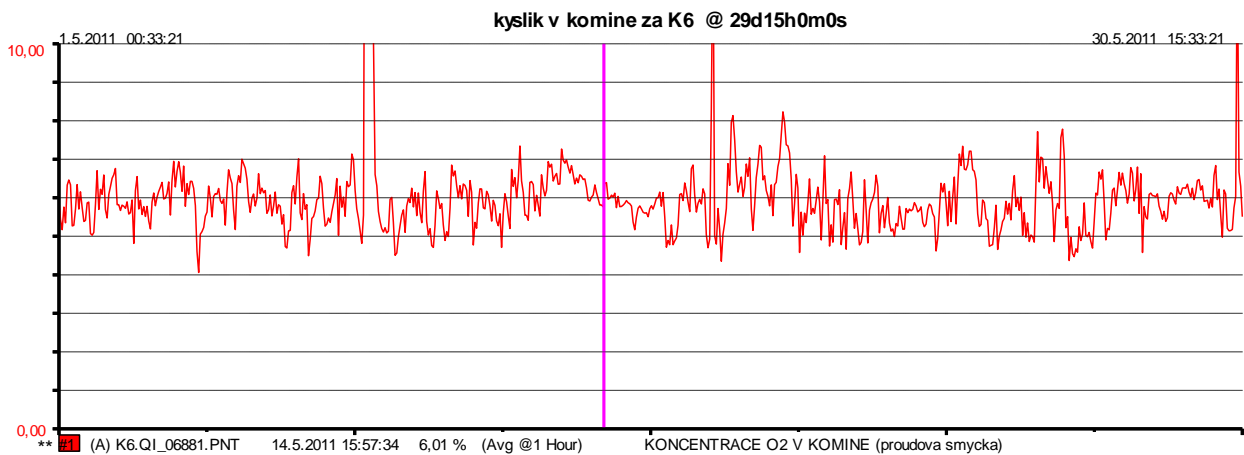


Obr. č.8.1b Graf: teplota spalin, parní výkon, NO_x, CO (1.-30. 6. 2012)

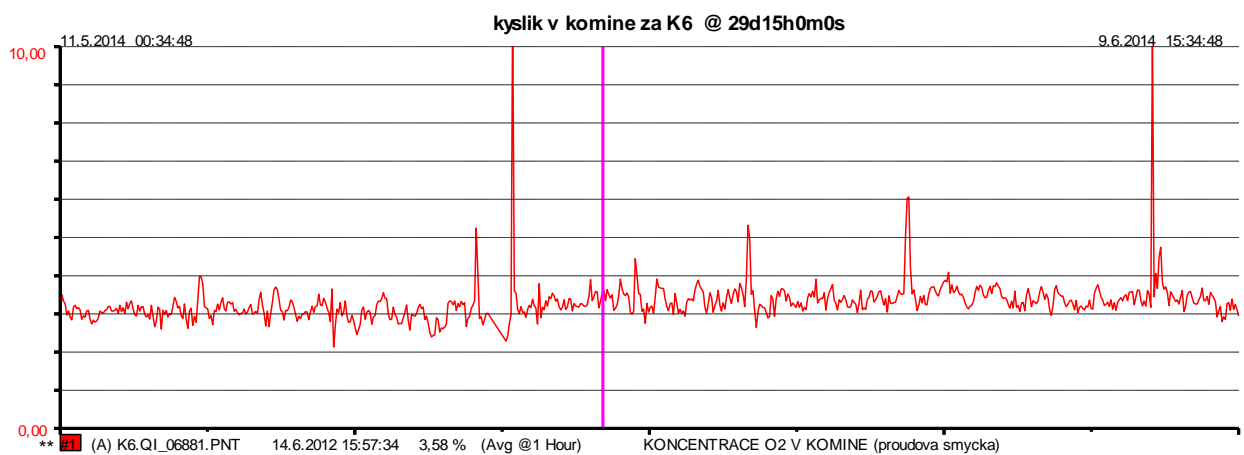
Z grafů na **Obr. č.8.1a/b** můžeme vidět znatelný pokles koncentrace NO_x ve spalinách z původních $301,92 \text{ mg/Nm}^3$ na $154,86 \text{ mg/Nm}^3$, což je zhruba o 49%. Tento úspěšný krok je však doprovázený zvýšeným obsahem CO z důvodu menšího přebytku vzduchu v kotli, který má za příčinu nedokonalé spalování a zvýšení produkce CO.

I přes navýšení produkce CO z původních $75,61 \text{ mg/Nm}^3$ na $80,64 \text{ mg/Nm}^3$ se jeho hodnota ani z daleka nepřibližuje limitu 250 mg/Nm^3 . Dále můžeme sledovat navýšení teploty spalin, které je v průměru 2°C .

8.3.2 Výstupní hodnoty: přebytek O₂ ve spalinách.



Obr. č.8.2a Graf: obsah O₂ ve spalinách, komín (1. -30. 5. 2011)



Obr. č.8.2b Graf: obsah O₂ ve spalinách, komín (1. -30. 5. 2014)

Další velmi důležitou hodnotou je přebytek O₂ ve spalinách za kotlem. Jak můžeme pozorovat z grafů na **obr. č.8.2a/b**, je patrný pokles zhruba o 40% tj. z původních 6,01% na aktuálních 3,58% O₂ ve spalinách. Tento výrazný pokles je ukázkovým výsledkem recirkulace spalin, kde nezbytnou fluidizaci paliva zajistily recirkulované spaliny.

8.4 Naměřené vstupní/výstupní hodnoty

Následující hodnoty byly poskytnuty společností United Energy a.s.. Hodnoty jsou pro kotel K6, na kterém byla recirkulace prováděna jako na prvním.

Tabulka č. 3

K6	před recirkulací	s recirkulací	-
Napájecí voda			
Teplota vody	172,4	172,8	[°C]
Tlak vody	10,82	11	[MPa]
Entalpie	735,3	737,2	[kJ/kg]
Pára			
Teplota	482,8	483,7	[°C]
Tlak	7,35	7,28	[MPa]
Množství	114,21	109,12	[t/h]
Entalpie	3364,4	3367,4	[kJ/kg]
Spaliny			
Teplota	135	136,3	[°C]
O ₂	4,5	2,7	[%]
CO	92,8	122,02	mg/Nm ³
NO _x	277,13	159,85	mg/Nm ³
Součinitel recirkulace (r)	-	0,0729	[-]
Tuhé zbytky			
Nedopal – popílek ($\xi_{Cú}$)	0,304	0,309	[%]
Nedopal – popel (ξ_{Cs})	0,336	0,376	[%]
Zachycení popílku	40	40	[%]
Zachycení popela	60	60	[%]
Další údaje			
Jmenovitý výkon kotle	83,41	79,72	[MW]
Naměřená teplota vzduchu	32,5	37,3	[°C]
Vlhkost vzduchu	20	20	[%]

Tato tabulka obsahuje data „před recirkulací“ (leden až prosinec 2011) a „s recirkulací“ (leden až prosinec 2014), která byla zprůměrována za celý daný rok.

9 Stanovení účinnosti kotle K6 nepřímou metodou

$$\eta = 100 - \xi_{CO} - \xi_C - \xi_k - \xi_f - \xi_{sv} [\%]$$

kde: ξ_k - ztráta fyzickým teplem (komínová)
 ξ_C - ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
 ξ_{CO} - ztráta hořlavinou ve spalinách
 ξ_f - ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
 ξ_{sv} - ztráta sdílením tepla do okolí

Tabulka č. 4

Ztráty		
[%]	Před recirkulací	S recirkulací
ξ_C	0,641	0,686
ξ_k	7,037	6,361

V teplárně UE Komořany a.s. vzhledem k velikosti jsou komínová ztráta a ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích uváděny jednotlivě, ale zbylé ztráty jsou vyjádřeny v sumě vzhledem k jejich malému rozměru.

Pro stanovení účinnosti kotle před instalací recirkulace jsem použil průměrné hodnoty ztrát uvedené v **tabulce č. 4**.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{před reci.}} &= 100 - \xi_C - \xi_k - (\xi_{CO} - \xi_f - \xi_{sv}) \\ \eta_{\text{před reci.}} &= 100 - 0,641 - 7,037 - (3,72) \\ \eta_{\text{před reci.}} &= \underline{88,61\%} \end{aligned}$$

Pro stanovení účinnosti kotle s nainstalovanou recirkulací jsem použil průměrné hodnoty ztrát uvedené v **tabulce č. 4**.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{s reci.}} &= 100 - \xi_C - \xi_k - (\xi_{CO} - \xi_f - \xi_{sv}) \\ \eta_{\text{s reci.}} &= 100 - 0,686 - 6,361 - (3,09) \\ \eta_{\text{s reci.}} &= \underline{89,86\%} \end{aligned}$$

Tabulka č. 5

K6 2011 - 2014					
období	Průměrná koncentrace NO _x [mg/Nm ³]	Provozní hodiny [hod]	Průměrný výkon [t/h]	Průměrná koncentrace CO [mg/Nm ³]	Provozní účinnost [%]
leden 11	272,534	447	107,24	133,182	88,71
únor 11	265,296	526	113,02	103,855	89,81
březen 11	284,657	635	113,29	96,036	89,48
duben 11	270,039	719	114,96	84,285	89,66
květen 11	288,414	737	116,54	73,846	89,24
červen 11	302,503	74	111,13	77,71	88,09
červenec 11	267,586	693	111,27	94,392	88,65
srpen 11	255,955	695	118,40	92,742	88,48
září 11	269,058	647	117,33	89,35	89,67
říjen 11	273,612	491	115,62	87,761	89,35
listopad 11	272,521	658	119,13	85,615	89,38
prosinec 11	303,388	744	112,64	94,798	89,66
Ø	277,13	589	114,21	92,798	89,18
leden 12	300,398	695	116,93	85,611	90,11
únor 12	318,429	459	123,34	78,772	89,59
březen 12	320,899	528	114,85	81,131	90,36
duben 12	199,459	720	114,80	89,171	89,97
květen 12	168,185	744	111,39	95,19	90,27
červen 12	155,478	720	116,02	79,494	89,42
červenec 12	156,698	742	110,65	98,384	89,74
srpen 12	152,917	200	116,26	106,706	89,98
září 12	154,136	714	116,96	103,222	89,39
říjen 12	139,833	625	113,27	103,692	90,11
listopad 12	-	-	-	-	-
prosinec 12	160,442	580	106,25	157,701	90,04
Ø	202,44	611,55	114,61	98,10	89,91
leden 13	153,354	683	112,34	136,23	90,81
únor 13	141,254	408	110,17	127,802	89,71
březen 13	139,981	744	115,77	114,767	89,40
duben 13	149,489	553	108,25	131,281	89,42
květen 13	-	-	-	-	-
červen 13	177,011	41	110,24	73,58	90,47
červenec 13	153,085	695	107,97	126,18	89,76
srpen 13	155,96	744	101,01	124,179	89,50
září 13	162,189	672	105,67	129,578	90,02
říjen 13	210,706	447	109,56	125,09	90,05
listopad 13	159,257	645	110,20	133,473	90,30
prosinec 13	156,015	728	109,16	120,013	90,33
Ø	159,85	578,18	109,12	122,02	89,93

V tab. č. 5 jsou uvedeny průměrné hodnoty pro každý měsíc až na výjimky.

Jak můžeme vidět v **tabulce č. 5** jsou znázorněna klíčová data v období 1/2011 až 12/2013 a poukazují na přesný pokles obsahu NO_x i očekávaný vzestup koncentrace CO při zhruba stejném průměrném výkonu kotle (tyto hodnoty jsou pro lepší představu promítnuty v grafech na **obr.8.1a/b**).

9.1 Příloha

Příloha obsahuje veškeré pomocné výpočty.

9.1.1 Výpočet dle normy ČSN 07 0302

Výpočty jsou doloženy v příloze č.2.

10 Závěr

Recirkulace spalin na kotli K6 dopadla v rámci očekávaných hodnot, pokud hovoříme o hodnotách NO_x a komínových ztrátách. Hodnoty NO_x se pohybují v průměru asi $40\text{mg}/\text{Nm}^3$ pod hranicí limitu, což je velmi příznivé z důvodu výkonnostních výkyvů či většího obsahu dusíku v palivu. Tímto je zřejmé, že by nemělo dojít k překročení zpřísněných limitů.

Jak jsem již zmínil, tak nevyhnutelným účinkem recirkulace je nárůst nedopalu (kde nárůst objemu popílku činí 0,005%, popela 0,04%) a koncentrace CO zhruba o $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ (z $92,8\text{ mg}/\text{Nm}^3$ na $122\text{ mg}/\text{Nm}^3$), ale s limity $250\text{mg}/\text{Nm}^3$ tento nárůst nepředstavuje do budoucnosti žádnou hrozbu. Obě tyto změny jsou nežádoucí a jsou přímými důkazy zhoršení kvality spalování.

Dalším velmi monitorovaným parametrem, hlavně z pohledu účinnosti kotle, je přebytek O_2 ve spalinách. Přebytek O_2 za provozu bez recirkulace byl cca 6% a díky recirkulaci spalin se toto číslo zmenšilo na cca 3,58%, tudíž rozdíl činí zhruba 2,4%. Tento výsledek poukazuje na velikost zbytečně používaného vzduchu pro fluidizaci paliva.

Dále provoz recirkulace přináší ohřev spalovacího vzduchu před vstupem do OHV a navýšení teplotní úrovně spalin o cca 3 – 5°C. Tento nárůst je velmi nepříznivý z hlediska účinnosti kotle, protože veškeré odevzdané teplo znamená pro teplárnu ročně ztráty v řádech desítek miliónů korun.

Tomuto problému se ovšem podařilo předejít díky zmenšení obsahu spalin. Díky redukci obsahu spalin došlo ke snížení komínové ztráty, která závisí na teplotě spalin, ale především také na objemu spalin, kdy komínová ztráta je považována za největší ze všech ztrát.

Vyhodnocení účinnosti kotle zohledňuje ve smyslu ČSN 07 0302¹ a ČSN 07 0305 obsah kyslíku ve spalinách (grafy na **Obr. č.8.2a/b**) a teplotní úroveň odchozích spalin (grafy na **Obr. č.8.1a/b**). Na kotli K6 se dosáhlo průměrné navýšení účinnosti o **0.75%** (za období tj. 4/2011 až 12/2012 vůči 1/2011 až 3/2012).

¹ Pozn.

Recirkulace spalin nebývá používána jako standardní regulační opatření u každého kotle. Kromě toho ani její řešení není typizováno, protože rozhodnutí o jejím užití u toho kterého kotle, stejně jako konstrukčním provedení, záleží na mnoha faktorech a tím se stává výrazně individuální. Z tohoto důvodu je účelné, aby způsob přepočtu účinnosti při recirkulaci spalin byl navržen výrobcem kotle tak, aby byl v souladu s výchozími předpoklady a postupy tepelného výpočtu celého kotle i jednotlivých výhřevných ploch eventuálně jeho částí.

11 Seznam použitých zdrojů:

- [1] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1997-1999, 2 sv. ISBN 80-7078-681-72.
- [2] HRDLIČKA, František a Břetislav JANEBA. *Metody a zařízení pro snižování emisí tuhých částic, SO₂ a oxidů dusíku do ovzduší v energetice*. Praha, 2 sv.
- [3] *Tvorba škodlivin při spalování*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [4] Odsíření tepelných elektráren, denitrifikace spalin. In: *Vodní a tepelné elektrárny*. [cit. 2015-04-7]. Dostupné z: <http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/odsireni-denitrifikace.htm>
- [5] *Znečištěné ovzduší nemá hranice*. [cit. 2015-05-7]. Dostupné z: http://www.mzp.cz/cz/zneisten_ovzdusi_vytapeni
- [6] VYBÍRAL, Pavel. *Denitrifikace*. [cit. 2015-05-7]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Prednasky/Prednaska%20Odsirovani.pdf>
- [7] GRÝCMANOVÁ, Markéta a Rostislav ZBIEG. *Metody dosažení emisních limitů emisí NO_x kotlů velkých výkonů*. 2012 [cit. 2015-04-9]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-dosazeni-emisnich-limitu-emisi-nox-kotlu-velkych-vykonu>
- [8] ANDREJOVSKÝ, Jan. *Recirkulace spalin TKY - studie*. 2011.
- [9] Kjótský protokol. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Kjótský_protokol](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kj%C3%B3tsk%C3%BD_protokol)
- [10] Česká republika. 415. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *SBÍRKA ZÁKONŮ*. Praha, 2012, č. 415. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/emisni_vyhlaska/\\$FILE/000-415_2012-23012013.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/emisni_vyhlaska/$FILE/000-415_2012-23012013.pdf)
- [11] *Kategorizace ZZO*. 2013 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/kategorizace-zzo/>
- [12] Mgr ing. J. Huwer. *Technický projekt kotlů K6-K10 v teplárně KomořanyII. . . 4.2001* [cit. 2015-05-23].
- [13] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999, 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7.

- [14] MARTIN, Přívozník. Bakalářská práce -Porovnání výpočtu účinnosti parního kotle. 20.11.2012 [cit. 2015-06-02].

12 Seznam použitých obrázků:

- 1) *Obr. č.2.1 rozdělení zdrojů znečištění [11]*
- 2) *Obr. č.2.2 vyjádření míry znečištění jednotlivých zdrojů [5]*
- 3) *Obr. č.3.3 Mechanismus vzniku NO. [1]*
- 4) *Obr. č.3.4 „Termických NO_x“ – poměrná hodnota. [1]*
- 5) *Obr. č.3.5 Mechanismus tvorby NO z palivového dusíku. [1]*
- 6) *Obr. č.3.6 Odstupňovaný přívod vzduchu a paliva. [1]*
- 7) *Obr. č.3.7 Tvorba NO_x v závislosti na teplotě. [3]*
- 8) *Obr. č.3.8 Průběh tvorby NO_x a CO v závislosti na přebytku vzduchu v prostoru plamene. [1]*
- 9) *Obr. č.3.9 Vliv vlastností paliva na tvorbu NO_x a nedopal. [2]*
- 10) *Obr. č. 7.1. Schématický výkres kotle K6*
- 11) *Obr. č.8.1a Graf: teplota spalin, parní výkon, NO_x, CO (1.-30.5.2011)*
- 12) *Obr. č.8.1b Graf: teplota spalin, parní výkon, NO_x, CO (1.-30.6.2013)*
- 13) *Obr. č.8.2a Graf: obsah O₂ ve spalinách, komín(1.-30.5.2011)*
- 14) *Obr. č.8.2b Graf: obsah O₂ ve spalinách, komín (1.-30.5.2014)*

13 Seznam použitých tabulek:

- 1) Tabulka č.1 – Specifické emisní limity
- 2) Tabulka č.2 – Rozbor paliva
- 3) Tabulka č.3 – Vstupní a výstupní údaje
- 4) Tabulka č.4 - Ztráty
- 5) Tabulka č.5 – Výpis průměrných měsíčních hodnot
- 6) Tabulka č.6 – Koeficienty A(I), B (I), C (I) složek spalin a vzduchu

14 Seznam všech použitých zkratk:

P.V.	primární ventilátor
LF	látkový filtr
UE	United energy
ZZO	Zdroje znečištění ovzduší
reci.	Recirkulace
TKY	Teplárna Komořany
mn. páry	množství páry

15 Seznam příloh:

Příloha č.1 : 6.2) Příloha – Výkres kotle K6

Příloha č.2 : 9.1) Příloha - Podpůrné výpočty [13,14]

9.1 Příloha – podpůrné výpočty

9.1.1 Výpočet dle normy ČSN 07 0302

Následující výpočty dle normy ČSN 07 0302 jsou nezbytné k určení nepřímé účinnosti a tepelných ztrát kotle.

9.1.1 Jmenovitý výkon kotle

Jmenovitý výkon kotle je spočten z množství vyrobené páry, z entalpie napájecí vody a entalpie vyrobené páry.

$$\dot{Q}_N = \frac{\dot{m}_{SST}(h_{SST} - h_{FW})}{3600 [s]}$$

9.1.2 Minimální objem suchého vzduchu potřebný dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{vs \min} = \frac{V_{O_2 \min}}{0,2095} = \frac{22,39}{0,2095} \left[\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} - \frac{O^r}{32,00} \right] =$$

9.1.3 Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení 1kg paliva

$$V_{ss \min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

$$V_{ss \min} = \frac{22,26}{12,011} C^r + \frac{21,89}{32,066} S^r + \frac{22,40}{28,016} N^r + 0,7805 V_{vs \min}$$

9.1.4 Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{vv \min} = \chi_v \cdot V_{vs \min} \quad \chi_v = 1,016$$

9.1.4.1 Objem vodní páry v tomto objemu

$$V_{vH_2O} = V_{vv \min} - V_{vs \min} = (\chi_v - 1) V_{vs \min}$$

9.1.4.2 Minimální objem vodní páry v tomto objemu

$$V_{sH_2Omin} = 11,1111 H^r + 1,2433 W_t + (v - 1) V_{vs min}$$

Přičemž

$$v = 1 + \frac{\varphi_v p''}{p_b - \varphi_v p''} = 1 + \frac{0,55 \cdot 0,0023}{0,098 - 0,55 \cdot 0,0023} = 1,0131$$

9.1.5 Objem vodní páry ve spalínách

$$V_{sH_2O} = \frac{44,8}{4,032} H^r + \frac{22,4}{18,016} W^r + V_{vH_2O}$$

$$V_{sH_2O} = \frac{44,8}{4,032} + \frac{22,4}{18,016} +$$

9.1.6 Minimální objem vlhkých spalín při dokonalém spálení 1kg paliva

$$V_{sv min} = V_{ss min} + V_{sH_2O}$$

9.1.7 Součinitel přebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{V_{vv}}{V_{vv min}} = \frac{V_{vs}}{V_{vs min}} = V_{vv min}$$

9.1.8 Objem vlhkých spalín při dokonalém spálení 1kg paliva

$$V_{sv} = V_{sv min} + (\alpha - 1) V_{vv min}$$

9.1.9 Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spálení

9.1.9.1 Objem CO₂

$$V_{vCO_2} = 0,0003 \cdot V_{vs min}$$

9.1.9.2 Objem N₂

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot V_{vs min}$$

9.1.9.3 Objem vzniklých částic

$$V_{vAr} = 0,0093 \cdot V_{vs min}$$

9.1.10 Složky stechiometrických objemů ve spalinách pro dokonalé spálení

9.1.10.1 Objem CO₂

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r$$

9.1.10.2 Objem SO₂

$$V_{sSO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r$$

9.1.10.3 Objem N₂

$$V_{sN_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r$$

9.1.11 Složky stechiometrických objemů ve spalinách pro nedokonalé spálení

9.1.11.1 Objem CO

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r$$

9.1.11.2 Objem O₂

$$V_{O_2}(C) = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r$$

9.1.12 Parametry spalin při nedokonalém spalování

$$b = \frac{A^r}{C^r} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i}$$

$$a_1 = \frac{R_7 \omega_{CO}}{R_1 \omega_{O_2} + R_2 \omega_{CO} + R_3}$$

9.1.13 Konstanty R1 až R7

$$R1 = -V_{vs \min} \cdot V_{sCO}$$

$$R2 = V_{vs \min}(0,5 \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_2)$$

$$R3 = 0,2095 \cdot V_{vs \min} \cdot V_{sCO}$$

$$R4 = V_{sCO_2} \cdot (V_1 + b \cdot V_3)$$

$$R5 = V_2 \cdot (b \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_{vs \min}) - 0,5 \cdot V_{O_2}(C) (V_1 + b \cdot V_3)$$

$$R6 = V_{sCO} \cdot (0,2095 \cdot V_{vs \min} b \cdot V_{O_2}(C))$$

$$R7 = V_{vs \min} \cdot (0,2095 \cdot (V_1 + b \cdot V_3) + 0,2095 V_{vs \min} - b \cdot V_{O_2}(C))$$

dále

$$V_1 = V_{ss \min} - V_{vs \min}$$

$$V_2 = V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}$$

9.1.14 Výpočet přebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{R4 \omega_{O_2} + R5 \omega_{CO} R6}{R1 \omega_{O_2} + R2 \omega_{CO} + R3}$$

9.1.15 Výpočet přebytku vzduchu za kotlem

$$\alpha_k = \frac{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R4 \cdot (\omega_{O_2})_k + R6) + a_1 \cdot R5 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)}{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R5) + a_1 \cdot R2 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)}$$

9.1.15 Skutečný objem spalin v místě odchodu z PK

$$V_{ss} = V_{ss \min} + a_1 \cdot (V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + b \cdot (V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + (\alpha_k - 1) \cdot V_{vs \min}$$

9.1.16 Skutečný objem vlhkých spalin

$$V_s = V_{ss} + V_{sH_2O}$$

9.1.17 Obsah vodní páry ve spalinách

$$V_{sH_2O} = V_{sH_2Omin} + (\alpha_k - 1) \cdot (\nu - 1) \cdot V_{vsmin}$$

9.1.18 Poměrný obsah vodní páry

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{sH_2O}}{V_s}$$

9.1.19 Výpočet konstanty A_0

$$A_0 = [(1-a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2}] \cdot A_1 + V_{sSO_2} \cdot A_2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot A_3 + V_{vAr} \cdot A_4 + V_{sH_2O} \cdot A_5 + A' \cdot (1 - X_{sk}) \cdot A_7 - V_{vsmin} \cdot (A_6 + (\nu - 1) \cdot A_5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot A_8 + a_1 \cdot V_{sCO_2} \cdot A_9$$

9.1.20 Výpočet konstanty B_0

$$B_0 = [(1-a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2}] \cdot B_1 + V_{sSO_2} \cdot B_2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot B_3 + V_{vAr} \cdot B_4 + V_{sH_2O} \cdot B_5 + A' \cdot (1 - X_{sk}) \cdot B_7 - V_{vsmin} \cdot (B_6 + (\nu - 1) \cdot B_5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot B_8 + a_1 \cdot V_{sCO_2} \cdot B_9$$

9.1.21 Výpočet konstanty C_0

$$C_0 = [(1-a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2}] \cdot C_1 + V_{sSO_2} \cdot C_2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot C_3 + V_{vAr} \cdot C_4 + V_{sH_2O} \cdot C_5 + A' \cdot (1 - X_{sk}) \cdot C_7 - V_{vsmin} \cdot (C_6 + (\nu - 1) \cdot C_5) + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot C_8 + a_1 \cdot V_{sCO_2} \cdot C_9$$

9.1.22 Výpočet konstanty A_α

$$A_\alpha = V_{vsmin} \cdot (A_6 + (\nu - 1) \cdot A_5)$$

9.1.23 Výpočet konstanty B_α

$$B_\alpha = V_{vs \min} \cdot (B_6 + (\nu - 1) \cdot B_5)$$

9.1.24 Výpočet konstanty C_α

$$A_\alpha = V_{vs \min} \cdot (C_6 + (\nu - 1) \cdot C_5)$$

Příčemž konstanty A,B,C lze vyjádřit v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu α :

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_\alpha$$

$$B = B_0 + \alpha \cdot B_\alpha$$

$$C = C_0 + \alpha \cdot C_\alpha$$

Tabulka č.6 – Koeficienty A(I), B (I), C (I) složek spalin a vzduchu [-]

I	A	B	C
1	0,000259	2,012136	-47,7837
2	0,0001791	2,15663	-43,4666
3	0,0001137	1,282718	-0,03905
4	0,0001034	0,928164	0,371915
5	0,0002507	1,464305	6,619556
6	0,0002065	1,290777	-1,65031
7	0,0003134	0,67569	2,707755
8	0,0001069	1,383063	-13,6304
9	0,0001149	1,299253	-3,30376
10	0,000259	2,012135	-47,7837

9.1.25 Střední měrná tepelná kapacita spalin pro teplotu 20°, 135° a 136,3° C

$$\bar{c}_s(t) = \frac{(A \cdot t + B + \frac{C}{t})}{V_s}$$

9.1.26 Střední integrální měrná tepelná kapacita spalin

$$\bar{c}_s = \frac{\bar{c}_s(t_k) \cdot t_k - \bar{c}_s(t_0) \cdot t_0}{t_k - t_0}$$

9.2 Výpočet hrubé nepřímé účinnosti dle normy ČSN 07 0302

V této části se bude práce zabývat výpočtu účinností kotle K6 ,před a po recirkulaci, pomocí ztrát.

9.2.1 Účinnost parního kotle η stanovená nepřímou metodou

$$\eta = 1 - \xi_{CO} + \xi_C + \xi_k + \xi_f + \xi_{sv}$$

kde ξ_{CO} je ztráta hořlavinou ve spalinách,
 ξ_C ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích,
 ξ_k ztráta fyzickým teplem ve spalinách,
 ξ_f ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků,
 ξ_{sv} ztráta sdílením tepla do okolí.

9.2.2 Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal) se vypočte

$$\xi_{CO} = \frac{12\,640 \cdot a_1 V_{SCO}}{Q_1}$$

9.2.3 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal) se vypočte z rovnice

$$\xi_C = \frac{b \cdot C^r \cdot 32\,600}{Q_1}$$

Redukovaná výhřevnost

$$Q_{i\,red} = Q_i^r + Q_S^{r3}$$

Teplu ve spalinách 3. recirkulace

$$Q_S^{r3} = r_3 \cdot I_S^{t_{r3}, \alpha_{r3}}$$

Ztráta nedopalem ve škváře nebo ve strusce

$$\xi_{Cs} = \frac{C_s}{1-C_s} \cdot X_s \cdot \frac{A^r}{Q_{s\,red}} \cdot Q_{Cs}$$

Ztráta nedopalem v úletu

$$\xi_{Cú} = \frac{C_u}{1-C_u} \cdot X_u \cdot \frac{A^r}{Q_{ú\,red}} \cdot Q_{Cú}$$

9.2.4 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová) se vypočte z rovnice

$$\xi_k = \frac{\bar{c}_s \cdot V_s \cdot (t_k - t_0)}{Q_1}$$

9.2.5 Celková účinnost parního kotle stanovená nepřímou metodou

$$\eta = 1 - \xi_C - \xi_k - (\xi_f + \xi_{sv} + \xi_{CO})$$