



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STROJNÍ  
FAULTY OF TECHNICAL ENGINEERING

ÚSTAV ENERGETIKY  
DEPARTMENT OF ENERGY ENGINEERING

MOŽNOSTI REDUKCE NO<sub>x</sub> TEPLÁRNA KOMOŘANY  
MOŽNOSTI REDUKCE NO<sub>x</sub> TEPLÁRNA KOMOŘANY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTERS'S THEISIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR MAREŠ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR  
PRAHA 2017

Prof. Ing. František Hrdlička, CSc.

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou snižováním oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) ve spalinách fluidních kotlů. V první části je popsána problematika technologií používaných pro redukcí NO<sub>x</sub> a jejich popis s následným výběrem vhodného zařízení. V další části je rozebrána vhodnost vybrané metody (tj. SNCR) pro možnost aplikace na kotlích teplárny Komořany. Hlavním cílem je ověřit, zda je metoda SNCR aplikovatelná vzhledem k teplotním podmínkám panujícím v kotlích a výpočtem stanovit množství reagentu nastříkovaného do spalin.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

NO<sub>x</sub>, denitrifikace, SCR, SNCR, fluidní kotle, teplárna Komořany, TKY, TKY I, TKY II, přebytek vzduchu, spaliny.

## **ABSTRACT**

This master's thesis is focuses on reduction of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) from fluid boilers gases. First part describes the issue of mostly used devices for reduction of NO<sub>x</sub> in power plants and final decision for appropriate devices. In next part is discused suitability of SNCR metod for aplication on boilers of Komořany power plant. The main task of this part is to verify suitability of temperature conditions in boiler for aplication SNCR and define consupmtion of injected reagentu to the flue gases.

## **KEYWORDS**

NO<sub>x</sub>, denitrification, SCR (selective catalytic reduction), fluid boiler, Power plant Komořany a.s., TKY, TKY I, TKY II, excess of air, flue gases.

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci, na téma „Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplárna Komořany“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, jež je přílohou této práce a neporušil jsem autorská práva.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl především poděkovat vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Františku Hrdličkovi CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, dále potom vedení firmy ORGREZ a.s., konkrétně obchodnímu řediteli Ing. Rostislavu Malému za podrobný popis technologie a vedení teplárny UE Komořany a.s., konkrétně technickému řediteli Ing. Petru Marešovi za veškeré informace poskytnuté ke zhotovení diplomové práce, bez kterých by tato diplomová práce nemohla vzniknout.

## Úvod

Tato práce se zabývá možnostmi redukce produkovaných oxidů dusíku NO<sub>x</sub> na teplárně Komořany. Teplárna Komořany je stacionární zdroj vybavený deseti kotli s fluidním ložem na hnědé uhlí, které byly přestavěny z původních dřívě roštových kotlů. Teplárna Komořany je rozdělena na dva celky. Teplárna Komořany I (dále TKY I), která zahrnuje kotle K1 až K5 a Teplárnu Komořany II (dále TKY II), která zahrnuje zbylé kotle K6 až K10.

V tzv. integrovaném povolení Českého institutu životního prostředí (ČIŽP) má teplárna Komořany předepsáno plnění emisních limitů, které musí plnit. Pro plnění jednotlivých závazků je nutné přistupovat k příslušným opatřením. Tato práce se zabývá dnes nejvíce používanými technologiemi. Tyto technologie jsou detailně popsány, rozebrány, srovnány z hlediska jejich problematiky, včetně rizik aplikace jednotlivých metod.

V další části je rozebrána problematika vybrané metody denitrifikace, ověření aplikovatelnosti ve vybraných místech kotle a výpočet spotřeby reagentu do vhodného místa.

<b>1</b>	<b>Obsah</b>	
	Úvod .....	5
<b>2</b>	<b>Rešerše .....</b>	<b>8</b>
2.1	Popis stávajícího stavu v Teplárna Komořany .....	8
2.1.1	Teplárna Komořany .....	8
2.1.2	Vliv legislativních změn na chod TKY .....	9
2.2	Popis kotle .....	11
2.2.1	Popis systémů fluidních kotlů .....	11
2.3	Popis primárních opatření pro redukci NO <sub>x</sub> .....	15
2.3.1	Primární opatření .....	15
2.4	Popis sekundárních opatření pro redukci NO <sub>x</sub> .....	18
2.4.1	SCR .....	18
2.4.2	SNCR .....	25
2.5	Popis vlivů na NO <sub>x</sub> metodou SNCR .....	42
2.6	Srovnání vhodných metod pro redukci NO <sub>x</sub> na teplárně Komořany .....	47
2.6.1	Hlavní rozdíly mezi technologií .....	47
<b>3</b>	<b>Verifikace a posouzení vhodnosti metody SNCR pro snížení emisí NO<sub>x</sub> na TKY .....</b>	<b>50</b>
3.1	Emisní měření NO za použití AMS instalovaného za kotlem K5 .....	50
3.1.1	Vyhodnocení ověření regresivních závislostí analyzátorů plynů dle ČSN EN 14 181 50 .....	
3.1.2	Závěr .....	53
3.2	Popis stávajícího stavu a posuzování vhodnosti metody SNCR .....	54
3.2.1	Provozní hodiny kotlů TKY .....	55
3.2.2	Stávající stav měřených NO <sub>x</sub> .....	56
3.2.3	Určení hladiny NO <sub>x</sub> pro zhodnocení účinnosti SNCR .....	58
3.2.4	Určení vhodného místa pro umístění zařízení SNCR .....	60
3.3	Výpočet teplot na konci ohniště .....	61
3.3.2	Citlivost teplot spalin .....	84
3.4	Určení předpokládané spotřeby aditiva .....	96
3.5	Závěr .....	101
<b>4</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>104</b>

5	Obrázková příloha.....	105
6	Seznam Tabulek.....	109
7	Seznam Obrázků .....	110
8	Tabulková příloha k vyhodnocení ověření regresivních závislostí analyzátorů plynů dle ČSN EN 14 181 .....	112
9	Tabulková příloha .....	115
10	Citovaná literatura.....	120

## 2 Rešerše

### 2.1 Popis stávajícího stavu v Teplárna Komořany

#### 2.1.1 Teplárna Komořany

Teplárna Komořany (dále TKY) byla vystavěna v padesátých letech minulého století za účelem zajištění výroby elektřiny a následně i tepla do města Mostu, Litvínova, Chomutova a přilehlého okolí. TKY je rozdělena do dvou provozních celků a to z pohledu výrobních jednotek na Teplárnu Komořany I (dále TKY I), do které spadají kotle K1 až K5 a na Teplárnu Komořany II (dále TKY II), do které spadají jednotky K6 až K10. Oba tyto celky byly původně vybaveny uhlí spalujícími výrobními jednotkami s technologií vratisuvných roštů se jmenovitým výkonem 120 t/h páry od společnosti Vítkovické strojírny.

Tyto kotle byly na základě rozhodnutí vedení TKY zmodernizovány na kotle fluidní se stacionárním ložem společností RAFAKO Raciborz, Polsko, model OF - 140. Modernizace probíhala od počátku devadesátých let až do roku 2001, kdy až na výjimku kotel (K6) byly všechny kotle uvedeny do provozu bez delších prodlev (kotel K10 byl uveden do provozu v průběhu roku 2006). Modernizace se týkala všech výrobních jednotek a to s rozdílnými výstupy. Kotle spadající do celku TKY I byly modifikovány na jmenovitým výkon 125 t/h páry a kotle z celku TKY II byly modifikovány na jmenovitý výkon 145 t/h.

Další úpravou výkonů na kotlích TKY bylo provedeno navýšení výkonu u celku TKY I z původních 125 t/h páry na aktuálních 137 t/h páry.

U celku TKY II došlo k navýšení z původních 145 t/h páry na 156 t/h páry.

V současnosti jsou z části TKY I používány pouze kotlové jednotky K3 až K5. Jistou výjimečnost v řešení získaly Komořanské kotle díky částečné recirkulaci popílku zpět do fluidní vrstvy. Při aplikaci tohoto opatření byl projektant veden snahou maximalizace vyhoření paliva a využití nezreagovaného aditiva v úletovém popílku.

Detailní popis technologických celků kotle a provozních parametrů je podrobněji rozebrán v kapitole 2.2 Popis kotle.

### 2.1.2 Vliv legislativních změn na chod TKY

Již delší řadu let dochází po celém světě ke snižování produkce škodlivých látek, jako jsou například oxidy dusíku, oxidy síry a oxidy uhlíku. Tyto polutanty mají v určitých koncentracích negativní dopad na stav ovzduší, životní prostředí a v neposlední řadě i na životy lidí. Díky těmto vlivům a následným rozhodnutím vedení České republiky předcházet jim vznikají již řadu let jako osvědčený nástroj zákony a vyhlášky omezující produkci těchto polutantů. Takto jasně definovaná usnesení ukládají provozovatelům, až na výjimky, všech stacionárních znečišťujících zdrojů, jimiž je i TKY, povinnost na vlastní náklady snížit produkci vybraných polutantů a to v závislosti na druhu a velikosti zdroje. Pro rozdělení a vytyčení limitů jednotlivým zdrojům je nutné jejich rozdělení do skupin. Pro toto rozdělení slouží charakteristické parametry jako např. používané palivo, doba uvedení zdroje do provozu a celkový příkon v MWt.

Nejaktuálnější a nejvýznamnější vyhláška s vlivem na redukcí emisí stacionárních znečišťujících zdrojů je vyhláška č. 415/2012 sbírky zákonů. Jejím obsahem je přípustné úroveň znečišťování a výklad některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. (201/2012 Sb.).

Tato vyhláška má samozřejmě přímý vliv na TKY a to bylo a je důvodem dalších úprav na kotlích TKY. Dle znění této vyhlášky je zdroji o příkonu >300MWt na obecně tuhá paliva, povinnost držet produkci jednotlivých polutantů pod hranicemi:

- 200 mg/nm<sup>3</sup> pro SO<sub>2</sub> (1)
- 250 mg/nm<sup>3</sup> pro CO (1)
- 25 mg/nm<sup>3</sup> pro TZL (1)
- 200 mg/nm<sup>3</sup> pro NO<sub>x</sub> (1)

Pro vyřešení této problematiky z hlediska NO<sub>x</sub> došlo v TKY k rozhodnutí využití takzvaných primárních opatření pro denitrifikaci vznikajících a produkovaných oxidů dusíku, které bylo nutno zredukovat, aby TKY mohla pokračovat ve svém provozu.

TKY je z hlediska legislativního posuzována jako jeden stacionární zdroj znečištění.

Vzhledem k momentálnímu předpokladu snížení využití - celkového instalovaného parního výkonu bylo vedením společnosti rozhodnuto o provedení denitrifikace pouze na části TKY II a zavedení příslušných změn v provozním režimu.

Pro redukci NO<sub>x</sub> na kotlích TKY II došlo k rozhodnutí pro zavedení recirkulace spalin odebíraných ze spalínovodů do sání ventilátoru primárního vzduchu. Výsledky této metody byly více než uspokojivé již od aplikace na první z kotlů TKY II a to kotel K6. Technologie byla kompletně instalována v rozmezí let 2011 až 2014 a to z důvodu pevně daného termínu konečného 31.12.2015, kdy bylo stanoveno ukončení produkce NO<sub>x</sub> nad 200 mg/Nm<sup>3</sup>.

Jelikož trend snižování přípustných hranic znečišťování ovzduší stacionárními znečišťujícími zdroji je v současné době stále více populární a stává se nezbytným, je na místě se domnívat, že jeho pokračování s ještě přísnějšími limity na sebe nenechá dlouho čekat a v nedaleké budoucnosti bude třeba dalších opatření ke snižování produkce oxidů dusíku a dalších znečišťujících látek.

Tato práce se zabývá využitím těch nejvhodnějších metod snížení tvorby NO<sub>x</sub> pod hranici 200 mg/Nm<sup>3</sup> a to jak na celku TKY I i na celku TKY II. Rozhodnutí pro použití zařízení na snižování vyplývá z nutnosti dosažení trvale udržitelných výstupních hodnot NO<sub>x</sub>. Toto rozhodnutí je primárně platné pro TKY II, ale i pro TKY I.

## 2.2 Popis kotle

Teplárna Komořany je vybavena kotly s technologií fluidního spalování uhlí ve fluidním loži s vnější cirkulací popílku. Tyto kotle slouží pro spalování hnědého uhlí a v následující kapitole budou popsány jednotlivé celky, kterými jsou kotle TKY vybaveny. (2)

### 2.2.1 Popis systémů fluidních kotlů

#### 2.2.1.1 Systém přivádění vzduchu

Sání vzduchu je instalované pod střechou kotelny, odkud je vedeno do sání primárního (fluidizačního) a sekundárního ventilátoru vzduchu. (2)

#### 2.2.1.2 Systém podávání paliva

Systém podávání paliva (uhlí) do kotle z uhelných zásobníků (bunkrů) je sestaven z deskových uzávěrů, hrablových podavačů, řetězových dávkovačů a pohazovačů uhlí. Pohazovače jsou poslední částí trasy uhlí a vedou přímo do spalovací komory. (2)

#### 2.2.1.3 Systém fluidního lože a jeho řízení

Komora fluidního spalování je pokryta ohnivzdorným a izolačním materiálem. Spalovací komora je na dvě vybavena tryskami pro rozvod fluidizačního vzduchu a tryskami sloužícími k přívodu vápence a popílku z II. Tahu kotle. Systém řízení výšky fluidního lože je složen ze zásobníku ložového materiálu, který slouží k regulaci výšky vrstvy pomocí odvádění a přivádění ložového materiálu. Celá regulace je řízena pomocí pneumatické dopravy a to dmychadly.

Spalovací komora je dále na svém dně vybavena deskovými plochami pro chlazení dna komory chladicí vodou a deskovými výhřevnými plochami výparníku zapuštěnými do fluidní vrstvy. (2)

#### 2.2.1.4 Tlakový systém kotle

Tlakový systém slouží k předehřevu napájecí vody, vytvoření a přehřátí potřebného množství páry. (2)

Systém se skládá z:

- Ohříváku vody
- Výparník s vynuceným cirkulačním systémem s deskovými plochami ve fluidním loži
- Výparník s přirozenou cirkulací tvořícího membránové stěny spalovací komory nad fluidním ložem
- Přehříváku páry vestavěného ve formě membránových stěn v mezitahu a II.tahu, jakož i ze závěsných trubek
- Stupeň II-a., II-b. a III. Přehříváku, vestavěného ve formě trubkových svazků v mezitahu a v horní části II. Tahu.



- Vstřikového chladiče teploty páry
- Potrubí spojující jednotlivé otápěné plochy

## 2.2.1.5 Tlakový systém kotle

### 2.2.1.5.1 Uzel napájecí vody.

Napájecí voda pro kotel je odebírána ze sběrných kolektorů. Uzel napájecí vody je vestavěn mezi kolektory, přes vstupní (sběrnou) komoru ohříváku vody je umožněno napájení kotle:

- najížděcím potrubím, na kterém je zabudován regulační ventil o propustnosti přibl. 50 t/h,
- jedním ze dvou hlavních napájecích potrubí, na kterých jsou zabudovány regulační ventily o propustnosti > než 140 t/h.

Kromě toho je z napájecího uzlu ještě odebírána napájecí voda pro vstřikový regulátor teploty páry na výstupu z kotle.

### 2.2.1.5.2 Ohřívák vody.

Ohřívák vody je vestavěn do II. tahu kotle mezi přehřívákem páry a ohřívákem vzduchu v protiproudovém uspořádání. Ohřívák vody je složen ze dvou paralelních větví. Každá větev se skládá ze tří svazků, z nichž jeden (instalovaný dodatečně) se nachází v kanálu spalin nad ohřívákem vzduchu, další dva se opírají o nosníky připevněné na membránové stěny II. tahu.

Voda z ohříváku vody je odváděna do bubnu. (2)

### 2.2.1.5.3 Buben.

Buben je nádrž, do které je přiváděna voda z ohříváku vody a parovodní směs z výparníku umístěného ve fluidním loži a na stěnách spalovací komory.

V bubnu jsou zabudována odlučovací zařízení pro oddělení vody od páry. Pára je odváděna do přehříváku páry, voda do cirkulačních čerpadel a dolních komor výparníku zabudovaného na stěnách spalovací komory.

Pod povrchem vody v bubnu je zabudováno zřízení pro kontinuální odluhování, ze kterého je voda s nejvyšším stupněm koncentrace solí v oběhu odváděna do expandéru odluhů.

Buben je též vybaven zařízením pro havarijní (poruchové) vypouštění. Úkolem tohoto zařízení je odvádění přebytku vody z bubnu při špatné funkci systému regulace napájení. (2)

### 2.2.1.5.4 Cirkulační čerpadla.

Byla zabudována v počtu 2 kusů na kotel pro vynucení průtoku vody a parovodní směsi ve vodorovných hadových svazcích výparníku, umístěného ve fluidním loži.

Při najíždění, provozu a odstavování kotle musí být jedno čerpadlo v provozu, druhé pak v záloze, zapojené do systému automatického zásoku. (2)

### 2.2.1.5.5 Výparník vestavěný ve fluidním loži

Tato část výparníku má otápenou část zabudovanou ve formě vodorovných hadových svazků ve fluidním loži. Průtok vody a parovodní směsi v této části výparníku zajišťují na požadované výši cirkulační čerpadla. Čerpadlo, které má být provozováno, musí být najeto před zahájením fluidizace lože, odstaveno pak ne dříve než po poklesnutí teploty lože na přibližně 280 °C - s výjimkou havarijních situací.

Tento výparník je složen z:

- potrubí spojujícího dolní část bubnu se sacím kolektorem cirkulačních čerpadel,
- sacího kolektoru,
- potrubí spojujících sací kolektor se sacími hrdly cirkulačních čerpadel,
- potrubí spojujících výtlačný kolektor s výparníkem zabudovaným ve fluidním loži,
- výparníku zabudovaného ve fluidním loži (2 x 9 paralelních modulů po 8 hadových svazcích),
- potrubí spojujících výparník v loži s bubnem.

Na vstupu do jednotlivých paralelních hadových svazků lože jsou vestavěny škrticí clony pro vyrovnání průtoků. (2)

### 2.2.1.5.6 Výparník zabudovaný na stěnách spalovací komory

Stěny a strop horní části spalovací komory (tzv. dohořivací komory) jsou pokryty trubkami výparníku, vytvářejícími membránové stěny. Výparník vestavěný v této části komory tvoří samostatný cirkulační obvod s přirozenou cirkulací. S bubnem je spojen systémem spádových a odváděcích trubek.

Stěny této části spalovací komory jsou zavěšeny na nosné konstrukci stropu kotle. Mezi membránovými stěnami komory a fluidním ložem je zabudována dilatace a tkaninový kompenzátor pro zachycení tepelných posuvů.

V horní výstupní části spalovací komory jsou instalovány svislé U profily, jejichž účelem je zmenšení zaprášení spalin odcházejících ze spalovací komory do mezitahu. (2)

### 2.2.1.5.7 Ohřívák páry

Sytá pára z bubnu je odváděna do přehříváku páry. Přehřívák páry je podél cesty průtoku páry zhotoven z těchto elementů: (2)

- membránové stěny zabudované na stropu mezitahu a zadní stěně II. tahu,
- membránových stěn zabudovaných na bočních stěnách II. tahu,
- membránových stěn zabudovaných na bočních stěnách mezitahu,
- membránové stěny zabudované na přední stěně II. tahu,
- závěsných trubek zabudovaných v horní části II. tahu pro zavěšení hadových svazků IIa/1. a IIa/2. stupně přehříváku,
- IIa/1. a IIa/2. stupně přehříváku zabudovaného v horní části II. tahu ve střídavém uspořádání s protiproudým průchodem spalin oproti páře,

- IIb. stupně přehříváku zabudovaného v zadní části mezitahu ve střídavém uspořádání s protiproudým průchodem spalin oproti páře,
- III. (výstupního) stupně přehříváku zabudovaného v přední části mezitahu ve střídavém uspořádání s protiproudovým průchodem spalin oproti páře.

### **2.2.1.5.8 Vstříkový chladič páry**

Je vestavěn mezi IIb. a III. stupeň přehříváku páry. Jako vstříková voda je použita napájecí voda o teplotě 170 °C.

Tento chladič udržuje teplotu páry na výstupu z kotle na úrovni ne vyšší než 490 °C.

### **2.2.1.5.9 Vyvedení páry z kotle**

Přehřátá pára je z kotle vyvedena jedním parovodem. Z tohoto parovodu může být pára odvedena do : (2)

- parního kolektoru,
- najížděcího kolektoru,
- atmosféry přes najížděcí ventil.

### **2.2.1.5.10 Pomocná zařízení tlakové části kotle**

Tlaková část kotle je v rámci dodávek Rafako vybavena nezbytnými přípojkami k níže uvedeným vnějším zařízením: (2)

- odvzdušnění,
- odvodnění,
- kontinuální odluhování,
- pravidelného odkalování,
- havarijního vypouštění z bubny,
- profuku vodoznaků,
- odběru vzorků páry a vody,
- dávkování fosforečnanů.

### **2.2.1.5.11 Systém ofukovačů popílku**

Pára do rozvodu pro ofukovače popílku je odebírána z výstupní komory vstříkového chladiče páry. Systém je opatřen samočinným redukčním ventilem, redukujícím tlak páry na hodnotu přibližně 3,0 MPa. Teplota páry v místě jejího odběru do zařízení pro ofukovače nemůže v době jeho provozu překračovat 425 °C. Na straně nízkého tlaku (3,0 MPa) je zařízení vybaveno pružinovým pojistným ventilem s výfukem páry nad střechu kotelny. Před uvedením jednotlivých ofukovačů do chodu musí být odvodňovací zařízení prohráno na teplotu minimálně 240 °C. (2)

## 2.3 Popis primárních opatření pro redukci NO<sub>x</sub>

### 2.3.1 Primární opatření

Primární opatření představují v podstatě specifické řízení spalovacího režimu, jsou méně nákladná, dosahují však menšího snížení obsahu NO<sub>x</sub> než opatření sekundární. Uvádí se, že při využití všech možností primárního opatření lze snížit tímto způsobem emisi NO<sub>x</sub> u zcela nově konstruovaných zařízení až o 70%. Při úpravách již provedených spalovacích zařízení jsou možnosti většinou omezenější, takže obvykle se dosáhne snížení o 40 až 60%.

U tuhých a kapalných paliv může být obsah NO<sub>x</sub> ovlivněn i vhodnou volbou paliva resp. některými jeho vlastnostmi hořlavíně, 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<sub>x</sub>. Kromě toho se mění podíly resp. emise jednotlivých typů NO<sub>x</sub> (termické, palivové, promptní) v závislosti na teplotě plamene.

Zatímco množství vznikajících termických NO<sub>x</sub> s teplotou silně stoupá, závislost množství vznikajících palivových NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> objevují zřídka, je již množství palivových NO<sub>x</sub> relativně dosti vysoké a v této oblasti ještě s teplotou stoupá. (3; 4)

#### 2.3.1.1 Rozdělení primárních opatření

Primární opatření lze rozdělit do tři generací.

##### První generace:

- Opatření, která nevyžadují žádnou větší rekonstrukci spalovacího systému:
  - Přesné vyladění spalovacího systému
  - Provoz s nízkým přebytkem kyslíku
  - Odlišná zatížení hořáků v jednotlivých úrovních

##### Druhá generace:

- Opatření pro snížení koncentrace O<sub>2</sub> v zóně interního spalování (primární zóně) a opatření pro snížení a zrovnoměnění teplotních gradientů při spalování:
  - Nízko emisní hořáky LNB
  - Recirkulace spalin

Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplárna Komořany

---

- Odstupňovaný přívod vzduchu do spalovací komory (přídavné vzduchové trysky)
- Odstupňovaný přívod paliva a vzduchu

Třetí generace:

- Opatření, zahrnující kromě prvních dvou uvedených generací, také opatření pro omezení tvorby NO<sub>x</sub> také opatření ke snížení NO<sub>x</sub>, který ve spalovací komoře již vznikl.:
- Kombinovaná opatření druhé generace, jako např.: odstupňovaný přívod vzduchu, plus přídavné palivo pro redukci NO.
- Nový práškový systém.
- Nové vývojové trendy.

Opatření třetí generace přicházejí v úvahu nejspíše jen u nově budovaných zařízení, protože u starších zařízení by tato metoda znamenala rozsáhlé zásahy do konstrukce zařízení.

Primární opatření i přes jejich nesporně levnější provoz přinášejí i řadu nevýhod jako jsou např.:

- Zhoršení stability hoření.
- Zvýšení mechanického i chemického nedopalu a následné snížení účinnosti.
- Koroze některých částí zařízení.
- Struskování stěn ohniště.
- Změnu rozložení přenosu tepla v kotli a s tím související důsledky (např.: vliv na teplotu přehřáté pára nebo výstupní teplotu spalin).

Primární opatření se jeví jako ideální pro zařízení s nepřilíživými limity (např.: 100 mg.m<sup>-3</sup>). V každém případě je vždy snaha o optimalizaci celého systému z důvodu vyhnutí se sekundárním opatřením. V případě nezbytného požití sekundárního opatření je výhodná kombinace obou metod, kdy primární opatření odlehčují zatížení sekundárních redukčních zařízení, katalytických i nekatalytických, takže se u nich snižuje spotřeba reakčních činidel a prodlužuje životnost katalyzátorů. (4)

### 2.3.1.2 Příklady primárních opatření

Tato diplomová práce se zaměřuje na částečné využití (FGR - systém recirkulace spalin) pro redukci NO<sub>x</sub>, ostatní systémy budou pouze stručně nastíněny.

Systémy, které se používají pro redukci NO<sub>x</sub> se označují zkratkami či symboly z nichž nejznámější jsou:

- LEA - (Low Excess Air) Spalování s nízkým přebytkem vzduchu příznivě ovlivňuje tvorbu palivových NO<sub>x</sub>, jelikož snižuje molární podíl O<sub>2</sub>.
- RAPO – (Reduce Air Preheat Operation) Opatření proti tvorbě termických NO<sub>x</sub>.
- TSC – (Two Stage Combustion) Jde o dvoustupňové spalování, první fáze podstechiometricky, čímž nedosáhne redukčního účinku uhlovodíků na již vzniklý NO.
- BOOS – (Burner out of service) Jde o podstechiometrický provoz se spalováním v hlavních hořácích a přívod dospalovacího vzduchu horními hořáky bez paliva.
- FGR – (Flue Gas Recirculation) Tento proces spočívá v odběru zhruba až 15% spalin v oblasti ekonomizéru a jejich zpětném zavedení do ohniště a to nejčastěji v kombinaci se spalovacím vzduchem. Efektivnost této metody spočívá ve snížení koncentrace kyslíku v prostoru plamene, což je užitečné zvláště z hlediska tvorby termických NO<sub>x</sub>, a také redukuje výskyt míst s maximální teplotou. V případě snižování palivových NO<sub>x</sub> je mechanismus recirkulace složitější, jelikož ovlivňuje i rychlost odplyňování paliva. Tento způsob vždy znamená rozsáhlé konstrukční i provozní komplikace a v neposlední řadě ovlivňuje i rozložení přenosu tepla v kotli a tím i čas teplotu přehřátí páry. (4) (3)

## 2.4 Popis sekundárních opatření pro redukcí NO<sub>x</sub>

Pro redukcí NO<sub>x</sub> v teplárně Komořany bylo již na TKYII tzn. Kotlích K6 až K10 využito primárních opatření redukce NO<sub>x</sub>. Pro další snižování tvorby NO<sub>x</sub> bude tudíž zapotřebí instalace sekundárních opatření.

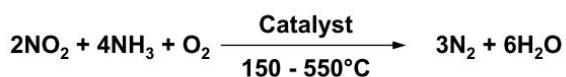
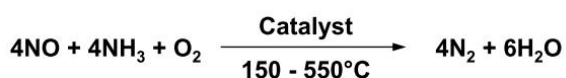
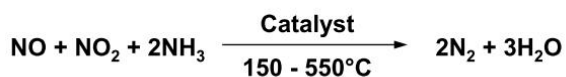
Mezi hlavní zástupce této kategorie patří SCR (selektivní katalytická redukce) a SNCR selektivní nekatalytická redukce. Obě tyto metody budou v následující kapitole podrobně rozebrány a podrobeny srovnání za účelem určení nejvhodnější varianty pro další pokračování v cestě za snižováním NO<sub>x</sub> produkovaných na kotlích v TKY. (5)

### 2.4.1 SCR

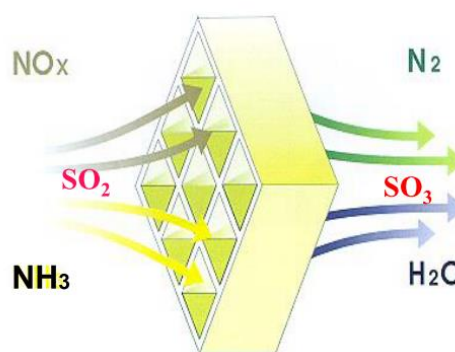
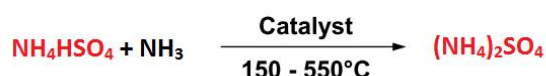
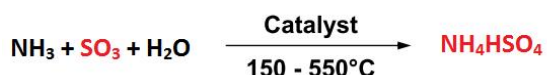
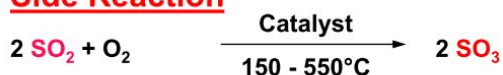
#### 2.4.1.1 Popis technologie SCR

Selektivní katalytická redukce je katalytickým procesem, založeným na selektivní redukcí oxidů dusíku čpavkem nebo močovinou za přítomnosti katalyzátoru. Redukční činidlo se vstříkuje do spalin před katalyzátorem (poměr NSR (NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>) = 0,8 – 0,9). Na povrchu katalyzátoru dochází při teplotě mezi 150 až 550°C k redukcí NO<sub>x</sub> obr.2-1. Katalyzátor pro selektivní katalytickou reakcí jsou na bázi oxidů kovu nasycených na skelet z oxidu titaničitého. (5)

#### Main Reactions



#### Side Reaction



Obrázek 2-1 - Průběhy reakcí v katalyzátoru (6)

## 2.4.1.2 Druhy katalyzátorů

### 2.4.1.2.1 Vanadové katalyzátory

Během sedmdesátých let většina vydaných patentů, zabývající se katalitickou redukcí NO<sub>x</sub> a pocházejících z Japonska, obsahovala jako aktivní komponentu pentaoxid vanadičitý V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. První patenty používající V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> k redukcí oxidu dusíku byl přihlášen společností BASF v roce 1965. (5)

Některé katalyzátory používaly pouze nenasycený V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ale většina katalyzátorů pro zvětšení aktivního povrchu obsahovala nosiče aktivní složky – oxid hlinitý, křemičitý či tytaničitý. Některé z těchto patentů obsahovaly směsi šesti nebo více oxidů jako katalytické promotory (např.: WO<sub>3</sub>, MoO<sub>3</sub>, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> či GeO<sub>2</sub>) za účelem zvýšit aktivitu katalyzátoru při redukcí NO<sub>x</sub> a snížit nežádoucí oxidaci SO<sub>2</sub>.

Určitý průlom ve zdokonalení denitrifikačních katalyzátorů znamenalo objevení vyšší aktivity a odolnosti vůči katalytického systému V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> společností Mitsubishi a Hitachi. (5)

### 2.4.1.2.2 Zeolitové katalyzátory

Druhou skupinu denitrifikačních katalyzátorů tvoří zeolity – vysoce krystalické aluminosilikáty. Krystaly zeolitů obsahují složitý vnitřně propojený systém dutin – pórů. Velikosti těchto „otevřených dutin“ a „spojovacích tunelů“ jsou dvojnásobek až desetinásobek velikosti molekul jako jsou oxid dusnatý NO, amoniak NH<sub>3</sub>, oxid siřičitý SO<sub>2</sub> a kyslík O<sub>2</sub>. Pro tuto obdržely zeolity přezdívku „molekulová síta“. (5)

Katalytický účinek zeolitických katalyzátorů spočívá v jejich kyselosti, je-li některý, popřípadě všechny kationty alkalických kovů (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) nahrazeny vodíkovým kationtem H<sup>+</sup>, některé z patentů uvádí rovněž železo a měď. Náhradou 95% kationtů alkalických kovů vodíkem lze zeolity připravit ve formách, které jsou teplotně stabilní za podmínek, kde probíhá redukce NO<sub>x</sub>. (5)

### 2.4.1.2.3 Nejnovější katalyzátory

Zlepšení katalytických schopností denitrifikačních katalyzátorů se týkalo zejména přidavku promotorů, které zlepšily aktivitu katalyzátoru či odolnost vůči arsenu nebo byla patentována



nová složení zeolitických katalyzátorů a nových fyzických struktur. Nejvíce patentovanými katalyzátory jsou:

- A. Katalyzátory  $V_2O_5/TiO_2$  s přidavkem oxidu wolframového  $WO_3$ , resp. Oxidu molybdenového  $MoO_3$  (Mitsubishi Heavy Industry, Babcock Hitachi)
- B. Katalyzátory se specifickým složením pro vysoké prostorové rychlosti (BASF)
- C. Katalyzátory se zvýšenou kyselostí
- D. Zeolitické katalyzátory (Engelhardt)

### 2.4.1.3 Geometrický tvar denitrifikačních katalyzátorů

Vzhledem k tomu, že se v katalytickém denitrifikačním reaktoru zpracovává oproti klasickým chemickým reaktorům obrovské množství spalin (např.: pro výkon 700 MW to je až 2 miliony  $m^3/h$ ), které mohou podle druhu paliva obsahovat značné množství prachu. Proto je potřeba zvolit vhodný geometrický tvar katalyzátoru.

Návod, jak vyřešit tento problém poskytly katalyzátory používané k čištění výfukových plynů osobních a nákladních automobilů. Denitrifikační katalyzátory se používají ve formě keramických monolitů, v anglické literatuře označované jako honeycomb (včelí plástev či voštiny) nebo ve tvaru desek. Keramické monolity typu honeycomb jsou vyráběny protlačením katalytického materiálu přes vhodnou matici a mají kanálky čtvercového průřezu *obr.2-2*. Velikosti kanálků, tzv. Pitch (světlost kanálku + tloušťka stěny) a jejich

počet v katalytickém monolytu se řídí type použitého paliva a umístěním katalytického reaktoru v technologickém schématu čištění kouřových plynů. (6)



Obrázek 2-2 - Druhy katalytických náplní (6)

Zvláštní tvar denitrifikačních katalyzátorů (honeycomb či deska) vykazuje velmi nízký tlakový spád v reaktoru. Zamezuje se usazování pevných částic a je jednodušší manipulaci s katalyzátorem, který se do reaktoru vsazuje ve formě modulů. Aby bylo možno odstranit katalyzátor z denitrifikačního reaktoru nebo jej nahradit katalyzátorem od jiného dodavatele, bylo v roce 1986 v Německu přijato doporučení o standardizaci rozměrů katalyzátoru. (5)

Standardizace rozměrů byla založena na průřezu existujících katalytických modulů 1940 x 970mm nebo 970 x 970 mm. Celých 90% všech instalovaných denitrifikačních jednotek v Německu používá tyto standardizované rozměry a rovněž Japonsko a začaly již standardizované moduly používat.

Standardizace umožnila nahradit deskový či „honeycomb“ katalyzátor např. jiným výrobcem, z jiného zařízení či jiného skladu. (5)

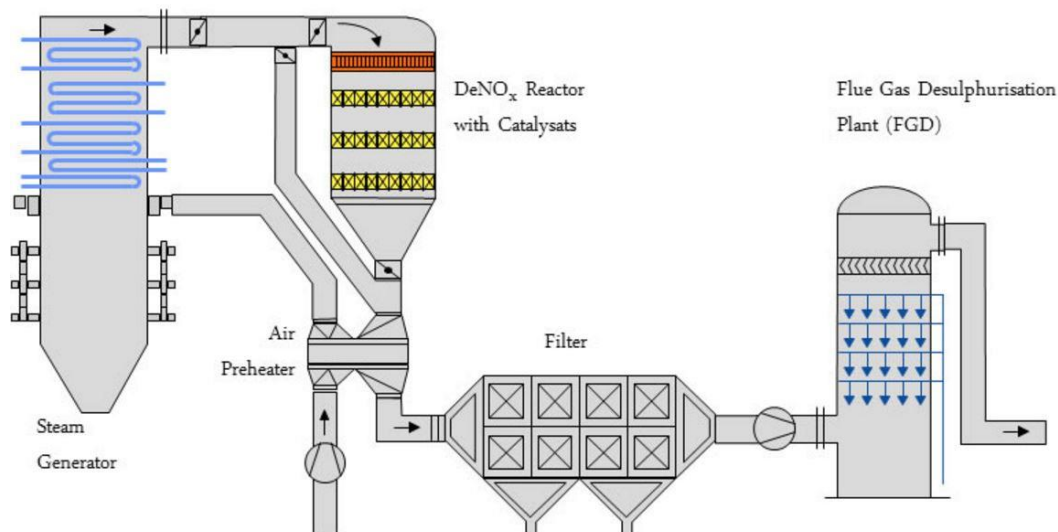
V katalitických člancích deskového typu je do rámu zasazeno 0 – 100 katalytických desek (podle velikosti povrchu). Článek měří 464 x 464mm (výška, což odpovídá asi třem modulům typu honeycomb). (5)

#### **2.4.1.4 Rozdělení dle umístění reaktoru**

Jednotku selektivní katalitické redukce je možno zařadit různými způsoby do provozní linky čištění spalin.

Rozdělení variant

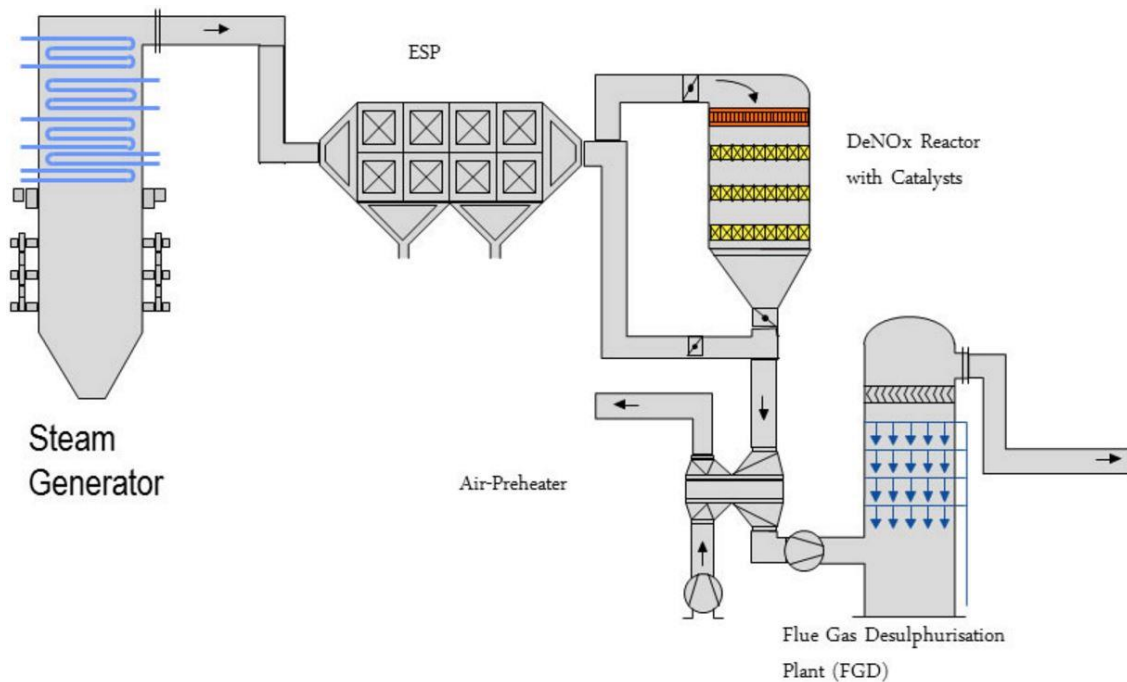
- High dust – vysokoprašné uspořádání (*obr.2-3*)
- Low dust – nízkoprašné uspořádání (*obr.2-4*)
- Tail end –Koncové uspořádání s dohřevem spalin (*obr.2-5*)



Obrázek 2-3 - Uspořádání katalyzátoru High dust (6)

Je-li katalitický reaktor umístěn ihned na výstupu spalin před předehřivač a elektrostatický odlučovač, a obsahuje-li velké množství prachu, nazývá se takovéto uspořádání „high-dust“ – vysokoprášné supořádání viz. obr.2-3. Teplota spalin leží v rozmezí 360 – 400°C a kvůli zanášení katalytického monolitu prachem je třeba použít kanálky s větší světlostí obsah aktivní komponenty katalyzátoru pentaoxidu je nízký (pod 0,5% váh. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Při tomto typu zařazení je katalyzátor vystaven všem nečistotama prachu, které jsou obsaženy ve spalinách a je náchylnější k postupnému oděru a erozi, jakož i k chemické otravě. (5) (6)

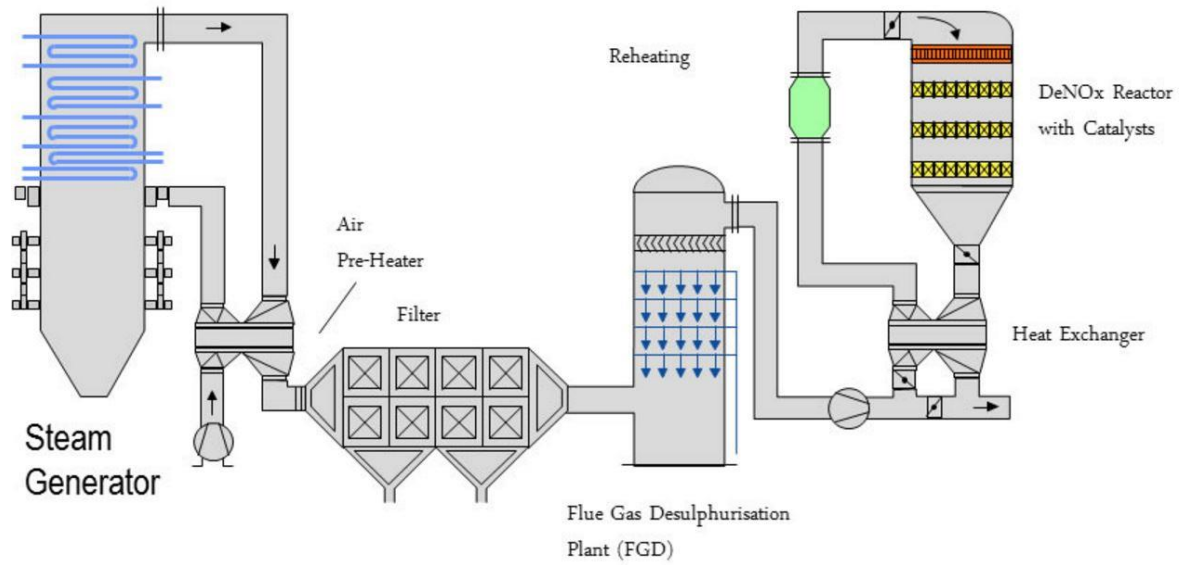
Obsah pevných nečistot ve spalinách se dá snížit zařazením horkého elektrostatického odlučovače, pracujícího při teplotách (350-400°C), před katalytický reaktor. Takovéto zařazení se nazývá „low-dust“ – nízkoprašné uspořádání viz obr.2-4. Spaliny jsou v tomto případě zbaveny pevných nečistot (obsah je dán účinností odlučovače), ale obsahují oxid siřičitý a eventuální další nečistoty (arsén) v plynném stavu, tzn. látky, které mohou způsobovat korozi v zařízení nebo deaktivovat katalyzátor. Obsah vanadu v katalyzátoru pro uspořádání „low-dustů“ bývá mezi 0,8 – 1,0% váh. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a závisí především na koncentraci oxidu siřičitého. (5) (6)



Obrázek 2-4 Uspořádání katalyzátoru Low dust

Jsou-li spaliny nejprve zbaveny v odsiřovací jednotce oxidu siřičitého nebo je-li jako palivo použit zemní plyn s nízkým obsahem síry, katalytický reaktor se zařazuje až na úplný konec celé linky čištění spalin – uspořádání „tail – end“ – koncové viz. obr.2-5. Spaliny jsou v tomto případě zbaveny oxidu siřičitého, prachu a dalších chemických nečistot, které mohou deaktivovat katalyzátor, a proto katalyzátor pro tento typ uspořádání obsahuje víc než 1% váh. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, čímž lze provádět redukci NO<sub>x</sub> při nižší teplotě – mezi 300 – 330°C. Mezi nevýhody uspořádání „tail-end“ patří nutnost dodatečně ohřát spaliny vystupující z odsiřovací jednotky (mokrý metoda) z teploty 80°C na reakční teplotu. (5) (6)

Možnosti redukce NOx teplárna Komořany



Obrázek 2-5 Uspořádání katalyzátoru Tail end

## 2.4.2 SNCR

### 2.4.2.1 Popis technologie SNCR

Proces SNCR dnes reprezentuje jednu z nejlepších dostupných technologií BAT „Best Available Technology“ a dnes je jednou z nejvyhledávanějších variant a to z důvodů cenově nižších investičních i provozních nákladů.

S ohledem na využití je dnes snahou ověřit proveditelnost a funkčnost této technologie i na velkých kotlích. Kromě redukce NO<sub>x</sub> a celkové ceny ve srovnání s SCR se klade velký důraz na utváření čpavkových solí způsobených čpavkovým skluzem ve spalinách a efektem na popel, sádrovec a odpadní vodu z odsiřovací jednotky instalované po proudu spalin za kotlem.

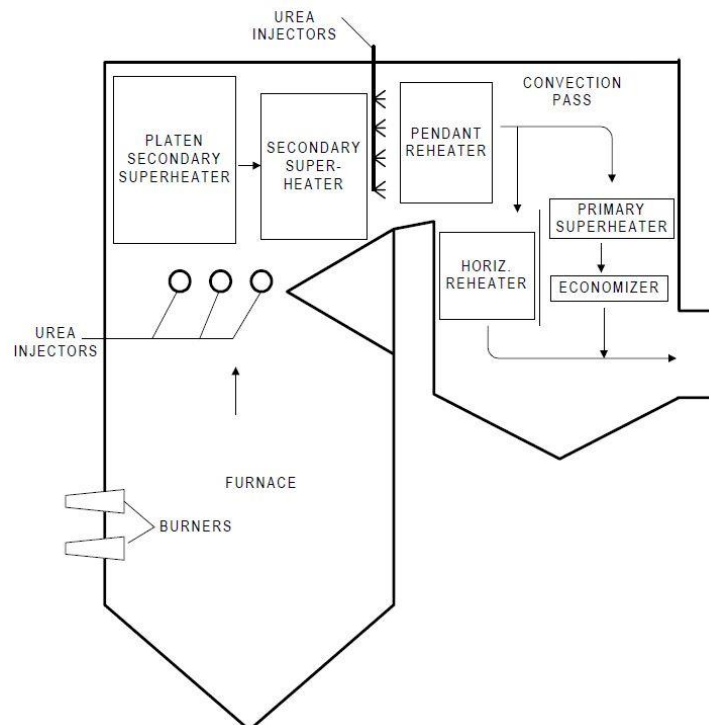
SNCR je založeno na chemické redukci NO<sub>x</sub> při rozkladu na molekulární dusík N<sub>2</sub> a odpařenou vodu H<sub>2</sub>O. Dusíkaté činidlo (reagent), jako je močovina či čpavková voda, je vstříkováno do spalin. Reagent reaguje s mnoha složkami spalin. Nicméně NO<sub>x</sub> redukční reakce jsou výhodnější než ostatní chemické procesy pro svůj specifický teplotní rozsah za přítomnosti kyslíku, a proto tyto reakce jsou považovány za selektivní chemické procesy.

Aplikace SNCR je instalována v rámci spalovací komory, která slouží jako reakční zóna. Na *obr.2-6* je schematicky znázorněn interiér kotle s nainstalovanou technologií SNCR. Reagent je vstříkován do spalin skrz stěny kotle pomocí speciálních trysek. Trysky jsou obecně instalovány do pospalovací atmosféry. Pro tuto atmosféru jsou typické vyšší pasáže kotlů a konvekční tahy kotlů. Samotný vstříkovací systém se stará o distribuci a dostatečné promíšení činidla se spalinami. Teplo, které je kumulované ve spalinách umožňuje průběh redukčních reakcí. Molekuly NO<sub>x</sub> jsou redukovány při reakci s činidlem a jsou unášeny, bez jakékoliv změny, pryč z kotle. (7) (8)

### 2.4.2.1.1 Redukční reakce

Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>) jsou sloučenina skládající se z dusíku a kyslíku, které se vyskytují běžně ve formě NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, atd. Ve vzduchu se vyskytují nejčastěji NO a NO<sub>2</sub>, kde NO tvoří 90% a více. NO<sub>x</sub>, jeden z hlavních polutantů v atmosféře ke kyselým dešťům, fotochemickému smogu, mlžení a sérii problémů týkajících se životního prostředí ve městech, a je to veliký hazard se zdravím lidí a ekologií životního prostředí. Proto je velice důležité studovat technologii pro odstraňování NO<sub>x</sub>.

SNCR je relativně jednoduchý chemický proces. Tento proces je provozován s činidly založenými na dusíku. Typické pro SNCR jsou čpavek (NH<sub>3</sub>) nebo močovina (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>). Činidlo je odpařováno mimo spalovací komoru v odpařovači nebo až po vstřiku ve spalovací komoře. Po vstřiku do odpovídajícího teplotního okna a následném odparu v komoře se plynná forma močoviny či čpavkové vody rozkládá na volné radikály obsahující NH<sub>3</sub> a NH<sub>2</sub>. Po sérii reakcí dojde ke kontaktu čpavkových radikálů s NO<sub>x</sub> a ty jsou posléze přetvořeny na (7) (8)

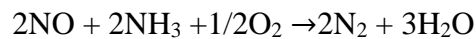


Obrázek 2-6 Schéma aplikace zařízení SNCR (8)

molekulární dusík N<sub>2</sub> a vodní páru H<sub>2</sub>O. Chemické reakce probíhající mezi činidlem a NO<sub>x</sub> jsou uvedeny níže.

V redukčních rovnicích jsou oxidy dusíku NO<sub>x</sub> nahrazeny NO jelikož obsah oxidu dusnatého ve spalinách je dominantní.

Redukční rovnice při aplikaci čpavkové vody:



Redukční rovnice při aplikaci močoviny:

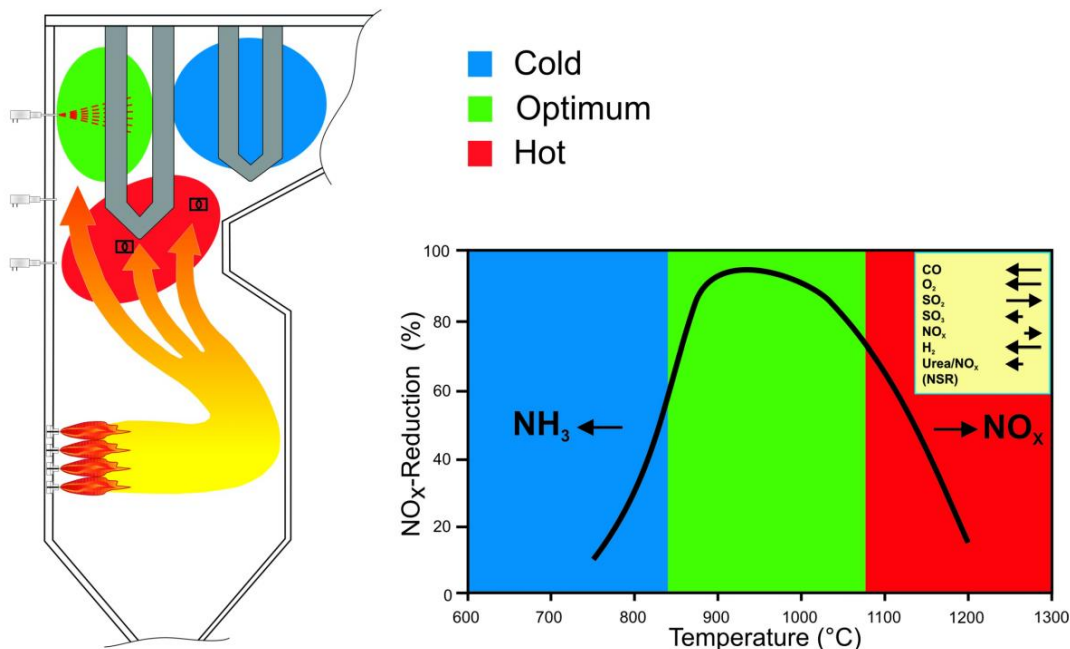


Vedlejším produktem SNCR je N<sub>2</sub>O oxid dusný. N<sub>2</sub>O má negativní dopad na ozón, ale není refulován. Systém SNCR používající močovinu obecně vyprodukuje výrazně větší množství N<sub>2</sub>O, než aplikace používající jako činidlo čpavkovou vodu. Až 30% z celkového množství NO<sub>x</sub> ve spalinách může být přeměněno na N<sub>2</sub>O při použití močoviny jako činidla. Tato problematika nalézá řešení v užití lokálního dávkování aditiv pro potlačení tvorby N<sub>2</sub>O. (7) (8)



### 2.4.2.1.2 Princip řízení a automatizace SNCR

Ve většině případů instalovaných SNCR zařízení se využívá jako reakčního činidla močoviny či čpavkové vody. Obě tyto činidla mají své výhody i nevýhody.



Obrázek 2-7 Význam funkce teplotního okna při aplikaci SNCR (7)

Pro optimální redukci NO<sub>x</sub> s minimálním NH<sub>3</sub> skluzem je třeba zabezpečit rovnoměrné distribuce a důkladného promíchání reagentu se spaliny během odpovídajícího teplotního okna viz. obr.2-6. K dosažení co nejvyšší redukce NO<sub>x</sub> v kombinaci s minimální spotřebou reagentu a minimální hodnotou čpavkového skluzu, je třeba najít optimální teplotní okno pro vstřík reagentu, které je velice úzké. Dalším velice významným faktem je složení spalin.

Pro uhlí spalující zařízení, leží optimální teplotní okno mezi 900 a 1,020°C.

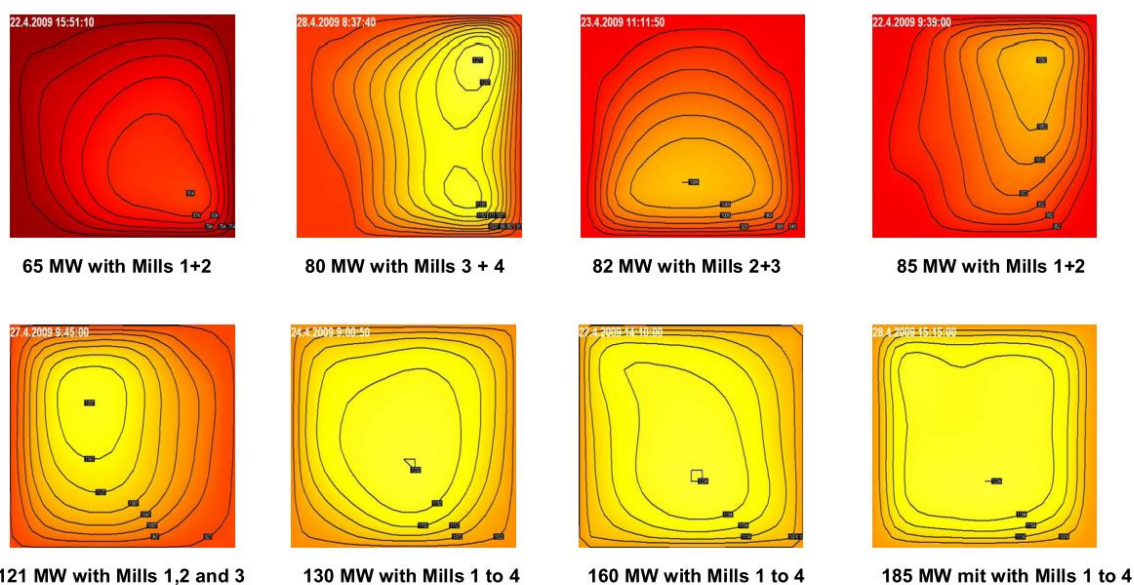
Při překročení maximálních teplot tohoto teplotního okna dochází k nárůstu množství zoxidovaného čpavku, tzn., dochází k utváření oxidů dusíku. Při podkročení minimální teploty tohoto teplotního okna klesá rychlost reakce a způsobuje nárůst čpavkového skluzu, který má dále za následek tvorbu čpavkových solí, které mohou být příčinou vedlejších problémů po celé své trase. Z těchto důvodů je důležité udržet čpavkový skluz na minimu.

Jelikož teploty po celé šířce spalovací komory jsou zřídka stejné a jsou mezi nimi značné nerovnosti. Proto je nutné zajistit, při převládajících podmínkách v ohništi, přesný nástřik činidla po celé šířce ohniště do ideálního teplotního pásma, které je už tak velmi úzké. (7) (8)

S běžným způsobem měření teplot by toto nebylo možné spolehlivě dosáhnout při daných provozních podmínkách.

Jedním z problémů může být proměnlivé složení paliva, které se projevuje v prudkých a významných změnách v teplotách a celkové stabilitě hoření. Toto má za následek nerovnoměrné uvolňování tepla po celé šířce spalovací komory a stále kolísající teploty v ohništi.

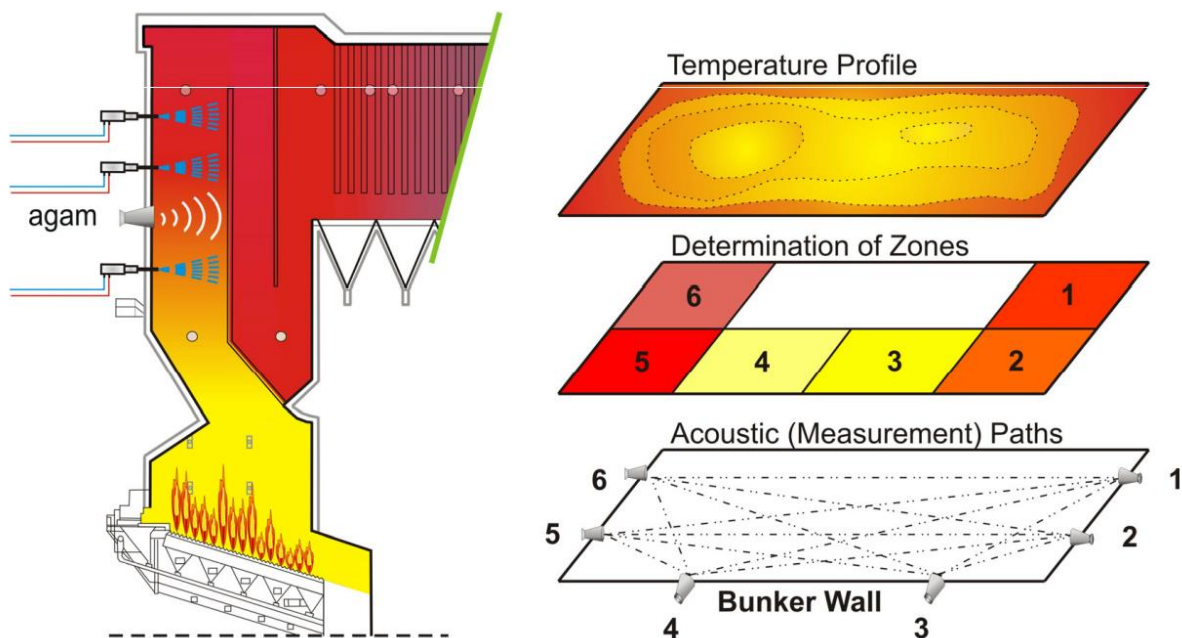
Dalším problémem je posouvání se ideálního teplotního okna po proudu dále a to z důvodu zanášení se výhřevných ploch ve spalovací komoře. Teplotní úrovně a teplotní profily ve spalovací komoře silně závisí na výkonu kotle, konfiguraci hořáků, distribuci spalovacího vzduchu, provozních cyklech ofukovačů atd. viz obr.2-8. (7) (8)



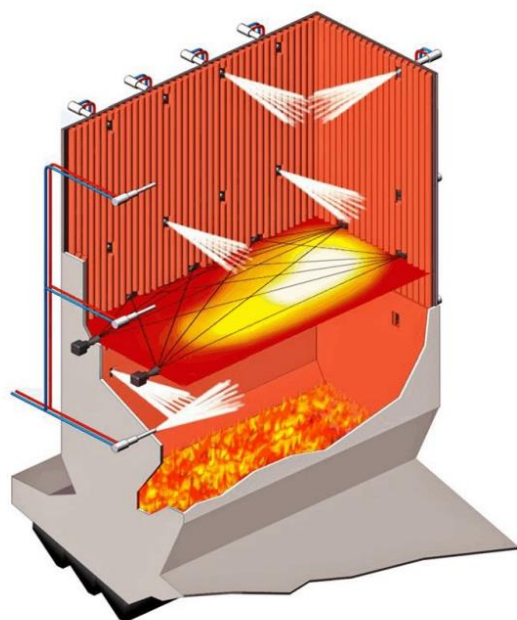
Obrázek 2-8 Teplotní úrovně v závislosti na změně výkonu (7)

Vysoký podíl na tom má také typ paliva, distribuce paliva, vzduchu a teplotní nerovnováhy až do 150°C a mnohdy i výše. Teploty ve spalovacích komorách jsou velice často měřeny termočlánky a následně zprůměrovány. Tyto průměrné hodnoty mohou být použity jako referenční, ale pouze v určitém rozsahu, i když nedávají žádnou informaci o teplotních profilech či nevyváženosti teplot v rámci vstříkovací úrovně. (7) (8)

Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplárna Komořany



Obrázek 2-10 Měřicí systém AGAM (7)



The changing of individual lances  
Following the temperature profile  
results in:

- Higher Efficiency
- Low NO<sub>x</sub> Emissions
- Low NH<sub>3</sub>-Slip < 10 mg/Nm<sup>3</sup>
- Low CO Emissions
- Lower Consumption of Reagents

Obrázek 2-9 Měřicí systém agam v kombinaci s SNCR (7)

K zajištění nástřiku činidla při všech možných provozních stavech (tzn. do ideálního teplotního okna, kde je stupeň redukce NO<sub>x</sub> nejvyšší a čpavkový skluz nejnižší), je užíváno akustického měření teplot systémem „AGAM“. Agam měří reálné teploty po celé šířce spalovací komory blízko vstřikovacích trysek a přesně stanovuje teplotní profily.

Teplotní profil se rozděluje do sekcí, které můžeme přiřadit jednotlivým vstřikům nebo skupině vstřiků, které mohou být řízeny v závislosti na naměřených teplotách viz *obr.2-9 a obr.2-10*. Toto zaručuje, že se činidlo dostane do oblasti s nejvyšší účinností reakce, i při prudce se měnících teplotách. Systém AGAM zajišťuje souběžně ideální provoz SNCR s ohledem na redukci NO<sub>x</sub>, čpavkový skluz a spotřebu činidla.

#### **2.4.2.1.3 Vliv konstrukce a provozních podmínek na výkon SNCR**

Ačkoliv princip SNCR je teoreticky velice jednoduchý, ale realizace je často doprovázena komplikacemi, jak již ukazuje praxe. Následující z příkladů, mají dopad na výkon SNCR:

- Konstrukce kotle, která může být překážkou pro instalaci vstřikovacího zařízení v místech s ideálním teplotním oknem
- Konstrukce spalovací komory
- Provozní stav kotle
- Druh paliva
- Druh reagentu – čpavková voda / močovina
- Požadovaný stupeň redukce NO<sub>x</sub>, čpavkový skluz a obsah čpavku v úletu (7)

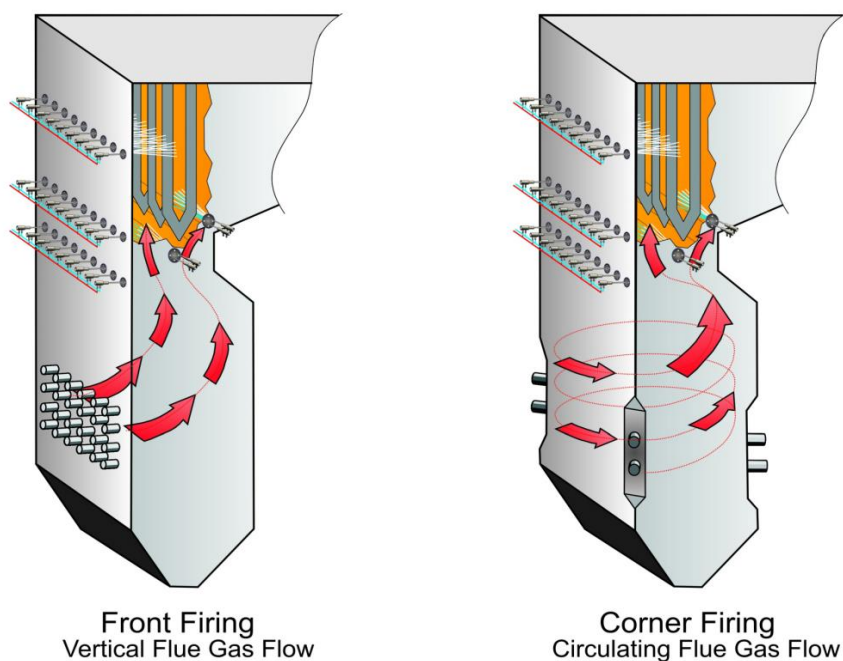
#### **2.4.2.1.4 Konstrukce kotle**

Typickou konstrukcí u uhlí spalujících kotlů jsou věžové, fluidní či roštové kotle s přehříváky instalovanými nad ohništěm či v obrátové komoře. Dále také dvoutahové kotle s nosem, deskovými přehříváky a přehříváky, ekonomizérem a ohříváky vzduchu v druhém tahu.

Fluidní či roštové kotle jsou velmi vhodné pro SNCR, díky svému velmi rozměrnému prostoru v prvním tahu nad ohništěm, který poskytuje dostatečný prostor a čas pro setrvání, než postoupí dále do přehříváků a druhého tahu. Jak už bylo zmíněno, klíčové pro funkci SNCR je rovnoměrné rozprostření činidla do ideálního teplotního rozsahu, který je nestálý. Prudkým a nahodilým změnám v prostoru vstřikování je možné se přizpůsobit pomocí několika úrovní vstřiků fungujících zároveň a s různou penetrační hloubkou činidla viz *obr.2-9 a obr.2-10*. Další možností je nainstalovat do spalovací komory vstřiky s různou délkou zasahující přímo do prostoru spalovací komory.

Dalším velice nepříjemným faktem je ovlivňování funkce systému AGAM. Častým problémem tohoto systému je zanášení akustických čidel popílkem a ovlivňování funkce celého měření a SNCR. Z těchto důvodů je vhodné provést korekci operačních cyklů ofukovačů.

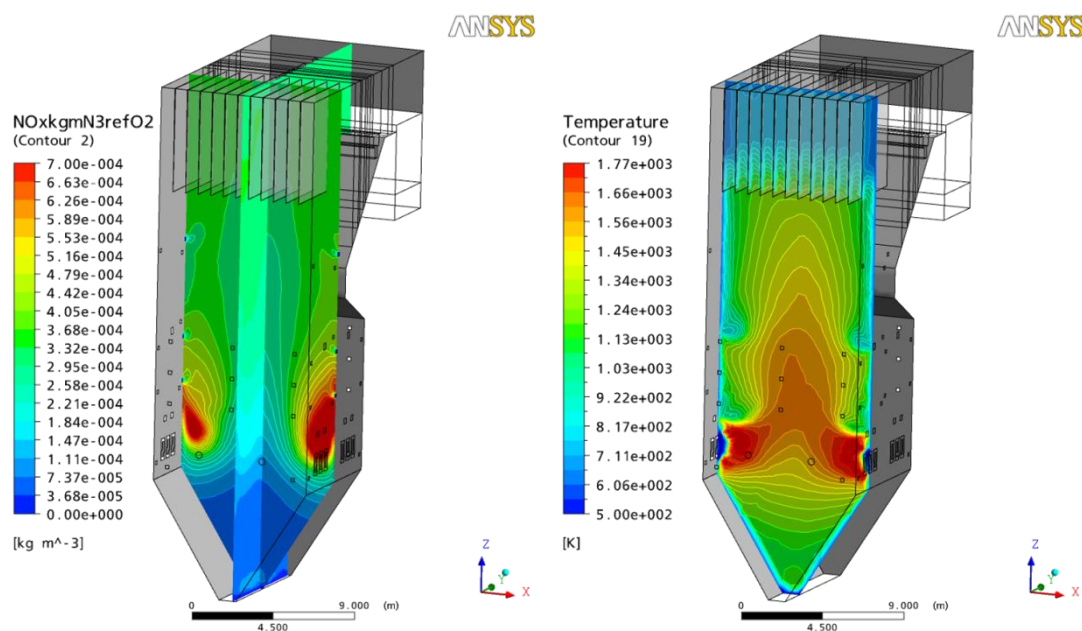
U dvoutahových kotlů, nos a přední stěna kotle vedou proud spalin přímo na přehříváky, a proto velmi záleží na uspořádání hořáků viz *obr.2-11 a obr.2-12..*



Obrázek 2-11 Tok spalin

Při plném zatížení kotle se optimální teplotní okno může pohybovat pod či přímo na úrovni přehříváku páry. Tyto komplikace takřka znemožňují rovnoměrný nástřik činidla po celé šířce ohniště v daném teplotním okně, a proto je vždy nezbytné zvážit, zda je vůbec možné z technického a ekonomického hlediska jít touto cestou.





Obrázek 2-12 Teplotní modely spalovací komory

#### 2.4.2.1.5 Konstrukce spalovací komory a hořáků

Konstrukce hořáků z pohledu distribuce paliva, spalovacího vzduchu v hořácích a ohniště je velmi klíčová pro tvorbu a koncentraci NO<sub>x</sub> ve spalinách. Mimoto teplotní nerovnosti a rychlosti záleží na velkém rozsahu kombinací nastavení hořáků, distribuce paliva a spalovacího vzduchu a na rozměrech celého ohniště.

Před použitím sekundárních opatření, jako SNCR a SCR, je třeba provést několik opatření pro minimalizaci tvorby NO<sub>x</sub> již při spalování. Toho lze dosáhnout při snižování obsahu kyslíku a teplot v primární spalovací zóně. Dále také pomocí nevyhořelých uhlíkových sloučenin (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> radikály, CO, zbytkový Koks), které mají redukční účinky na již vzniklé NO<sub>x</sub>.

Pro dosažení optimálních výsledků, tzn. nízká koncentrace NO<sub>x</sub> a maximální vyhoření paliva, je zapotřebí dostatečně dlouhá doba setrvání spalin v redukční atmosféře primární spalovací zóny v kombinaci s dostatečným smíšením spalin se sekundárním spalovacím vzduchem v sekundární spalovací zóně kde dochází k dohořívání. Pro bezpečné dosažení nízkého procenta NO<sub>x</sub> se používá následujících opatření, a to zvláště či v kombinaci: (7)

- Seřízení a optimalizace hořáků a spalovacího vzduchu
- Redukce přebytečného vzduchu
- Režie vzduchu ve spalovací komoře

- Režie vzduchu v hořácích
- Režie paliva
- Recirkulace spalin

Účinnost měření a závisí na konstrukci kotle a charakteristikách paliva. Proto každý z případů musí být pozorován individuálně s ohledem na:

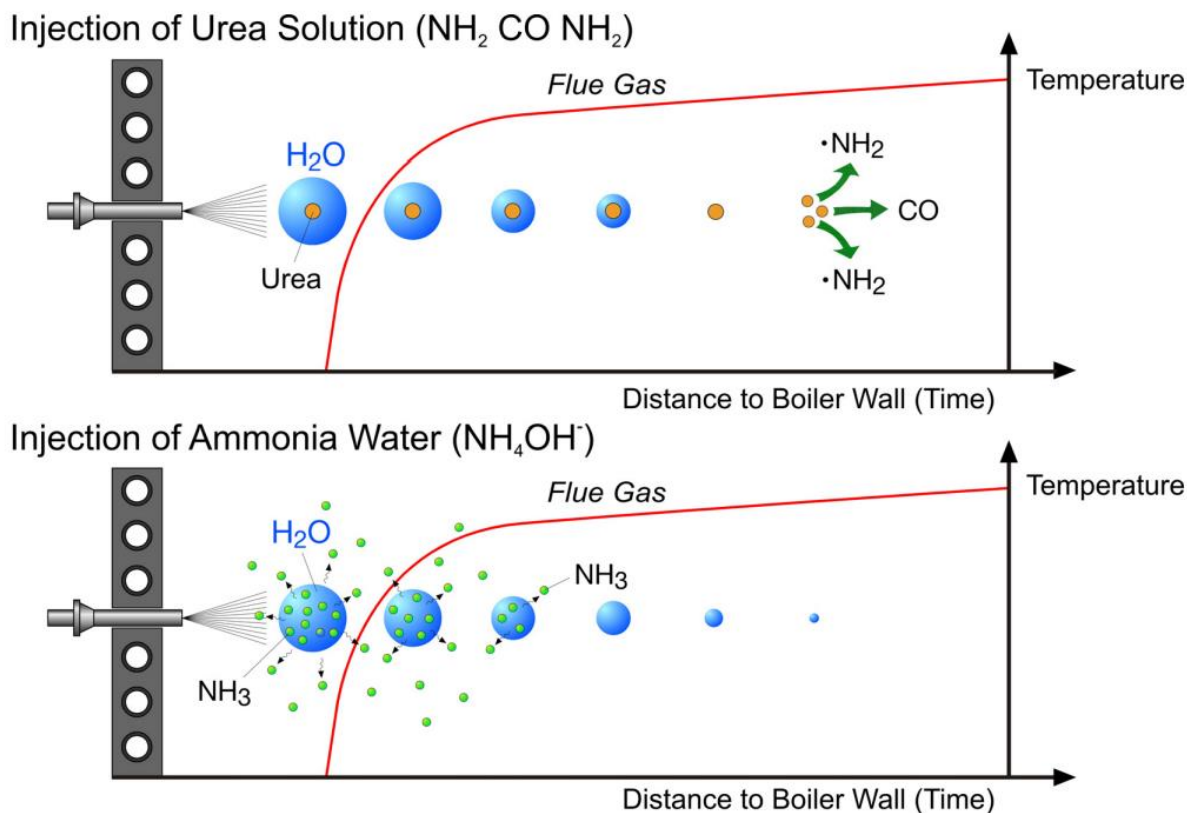
- Stabilitu plamene
- Korozi ohniště
- Vyhoření paliva
- Sortiment paliva
- Redukci NO<sub>x</sub>
- Účinnost kotle a cenu

Veškeré aplikace v praxi musí podléhat technicko-ekonomické optimalizaci.

#### **2.4.2.1.6 Používaná činidlo – Močovina a Čpavková voda**

Použití čpavkové vody jako činidla je často limitováno teplotami spalin, které jsou často příliš vysoké, tzn. že velké procento činidla shoří a zapříčiní dalšímu vzniku NO<sub>x</sub> ještě před dosažením míst s vhodnými teplotami. Toto počínání vede k celkové neúčinnosti redukce NO<sub>x</sub>.

Komplikace doprovázející vypařování a následné spalování činidla doprovází i močovinu, ale jsou mnohem lépe zvladatelné. Principem je vodní kapka, která obnáší částice močoviny. Voda slouží jako přenašeč močoviny a vypařuje se okamžitě po vstřiku do spalovací komory a díky tomu NH<sub>2</sub> z rozložené močoviny dosáhne oblasti s cílovými nižšími teplotami. Nicméně se zde objevují komplikace, které vodní kapičky obsahující močovinu přinášejí. Jednou z nejvýznamnějších komplikací nárazy kapiček na stěny kotle, kde způsobují korozi a ničí povrch trubek, stěn. Z tohoto důvodu musí být kladen velký důraz na umístění, provoz a umístění vstřikovacích trysek. (7)



Obrázek 2-13 Průběh nástřiku močoviny a čpavkové vody (9)

Ten nejvýznamnější rozdíl mezi řešením s čpavkovou vodou a močovinou je zjednodušeně naznačen na grafu v obr.2-13. Močovina rozpuštěná ve vodě se takřka pouze rozloží na reakční složku, částice NH<sub>2</sub>, a na vodní páru, která vznikne až po celkovém odpaření veškeré vody obklopující močovinu. Tím pádem dosažení potřebné vzdálenosti přesunu činidla můžeme docílit pomocí velikosti a rychlosti kapek směsi vstříkovaných do spalovací komory. Toho lze docílit nastavením tlaku stlačeného vzduchu se směsí voda/močovina. Pomocí změny tlaku stlačeného vzduchu regulujeme velikost kapiček. Díky těmto úpravám je možné upravovat hloubku průniku kapiček směsi. (7) (9) (8)

Jestliže jsou kapičky směsi dostatečně velké je možné vstříkovat směs do oblastí s výrazně vyššími teplotami, než je možné pro redukci NO<sub>x</sub>. Při celkovém procesu se vodní obal vypařuje už od chvíle opuštění vstříkovací trysky a dochází k uvolňování činidla, které se zcela uvolní až na konci trajektorie. Důsledkem je dosažení reakce ve výrazně nižších teplotách, ideálních pro redukci NO<sub>x</sub> močovinou. (7) (9) (8)

Již ze samé podstaty je jasné, že vysoké množství vypařené vody, pro přepravu močoviny, bude mít svůj vliv na průběh teploty spalin, které bude snižovat. Tudiž dalším důsledkem této metody je znatelné snížení teplot spalin a tím pádem jejich regulace. (7) (9) (8)



Jelikož je močovina velice korozivní látka, je nutné zabránit narážení kapek směsi na veškerá velice rozpálená místa spalovací komory a předejít tomu za všech okolností.

Čpavek je velice těkavé činidlo, které se uvolňuje v bezprostřední blízkosti vstřikovací trysky tzn. ihned po vstřiku do spalovací komory. Z tohoto důvodu zařízení pro vstřik čpavkové vody bude umístěno v blízkosti nízkoteplotních polí u stěn kotle, kde samozřejmě může hrozit riziko vzniku vyššího procenta čpavkového skluzu. Překážkou při vstřikování je hloubka, do které je činidlo schopno proniknout, jelikož hmotnost čpavku v plynném stavu je daleko nižší než hmotnost vody. To ovšem může zvýšit nároky na dopravu činidla, které se projeví v podobě zvýšení tlaku páry či vzduchu používaného pro dopravu činidla.

Při požadované homogenní distribuci činidla se musí počítat s velkým vlivem hustoty spalin, která zamezuje rovnoměrné distribuci a tudíž, snižuje efekt této metody. Důsledky se mohou projevit např. ve zvýšení čpavkového skluzu. Tato nepříjemná komplikace může být ovšem kompenzována přistoupením na použití vody jako transportního média, jako v předchozí variantě. (7) (9) (8)

Dále čpavek je jedovatý a snadno hořlavý plyn, který se při teplotě okolí dá snadno rozpustit ve vodě. Pro provozovatele se osvědčila jako optimální amoniaková voda o koncentraci do 25%. Se stoupající teplotou se však amoniak z vody poměrně rychle odpařuje. Při teplotě 38°C dosahuje parciální tlak amoniaku již 1 bar, proto jsou při skladování nutná odpovídající bezpečnostní opatření. K těmto bezpečnostním opatřením patří např. senzory amoniaku, osvětlené ukazatele směru větru, protipožární závěry na přetlakových a podtlakových ventilech, vratné potrubí pro odsávání par amoniaku při stlačení do zásobní nádrže a sprchy pro případ nouze a vniknutí amoniaku do očí. Další závažnou komplikací je doprava čpavkové vody. Pro přečerpávání je nutné použití speciální čerpací stanice, která dokáže souběžně čerpat čpavkovou vodu do zásobníku, ale také odčerpávat plyny z hora zásobníku vznikající nad stoupající hladinou. Tyto plyny se ukládají zpět do transportní nádoby dopravce. Dále následuje jejich likvidace viz *obr.2-16 a obr.2-17*. (7) (9) (8)

Kvůli chemické vazbě amoniaku na molekulu močoviny mohou však být roztoky močoviny zahřáté až na 106 °C, aniž by se amoniakový plyn odpařoval. Rozklad močoviny v amoniaku a oxidu uhličitém začíná naproti tomu až při teplotě 130°C a dosahuje maxima zhruba při teplotě zhruba 380°C. Těchto vysokých teplot takřka není možno být při skladování, tudíž bezpečnostní opatření předepsaná pro močovinu zde nejsou nutná. (7) (9) (8)

Možnosti redukce NOx teplárna Komořany

Jenou z neopomenutelných výhod použití močoviny (pod obchodními názvy SATAMIN, NOxAMID) je možnost tento reagent pro nastříkovanou směs kombinovat s potřebně upravenou vodou. Hlavní rozdíl a výhoda močoviny oproti čpavkové vodě, je fakt, že čpavkovou vodu je možné nastříkovat pouze v kombinaci s demivodou viz obr.2-14 a obr.2-15. (7) (9) (8) (10)

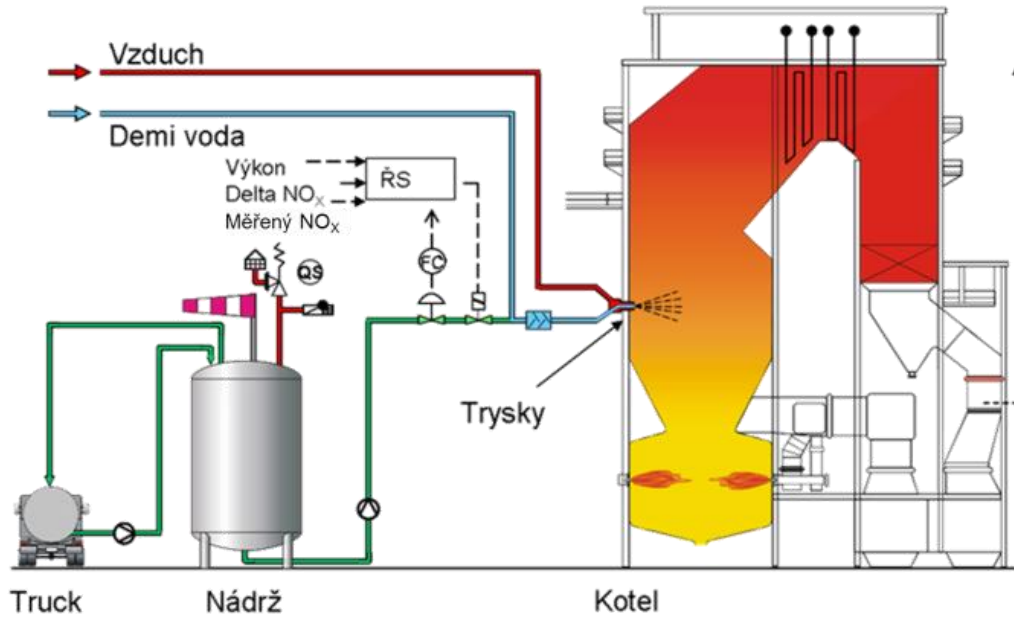


Obrázek 2-14 Nádrže a stáček stanice pro čpavkovou vodu (9)

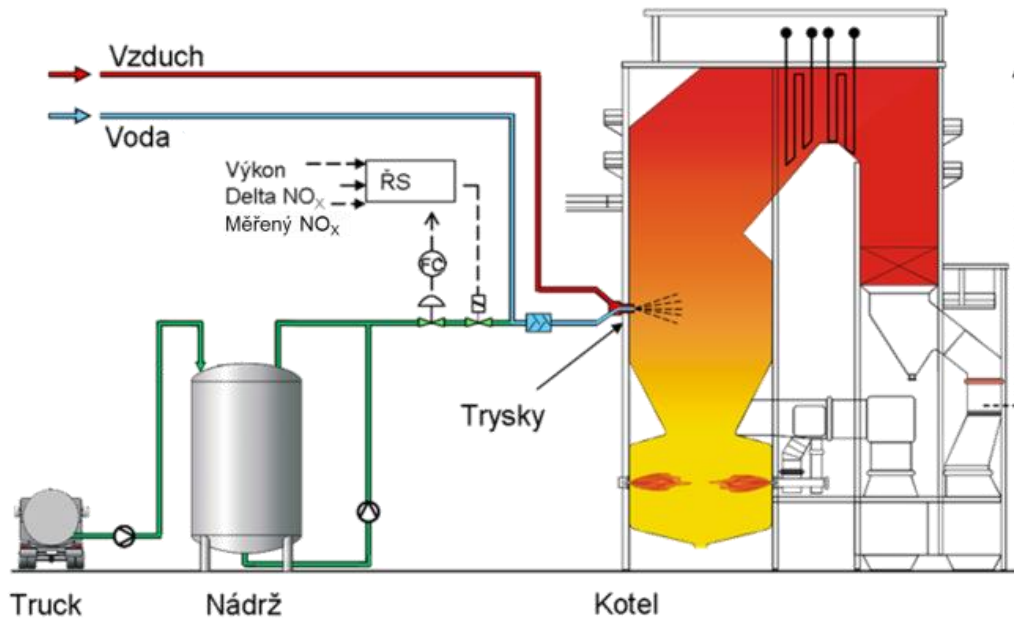


Obrázek 2-15 Zásobní nádrž pro močovinu (9)

Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplárna Komořany



Obrázek 2-16 Aplikace SNCR s použitím čpavkové vody (9)

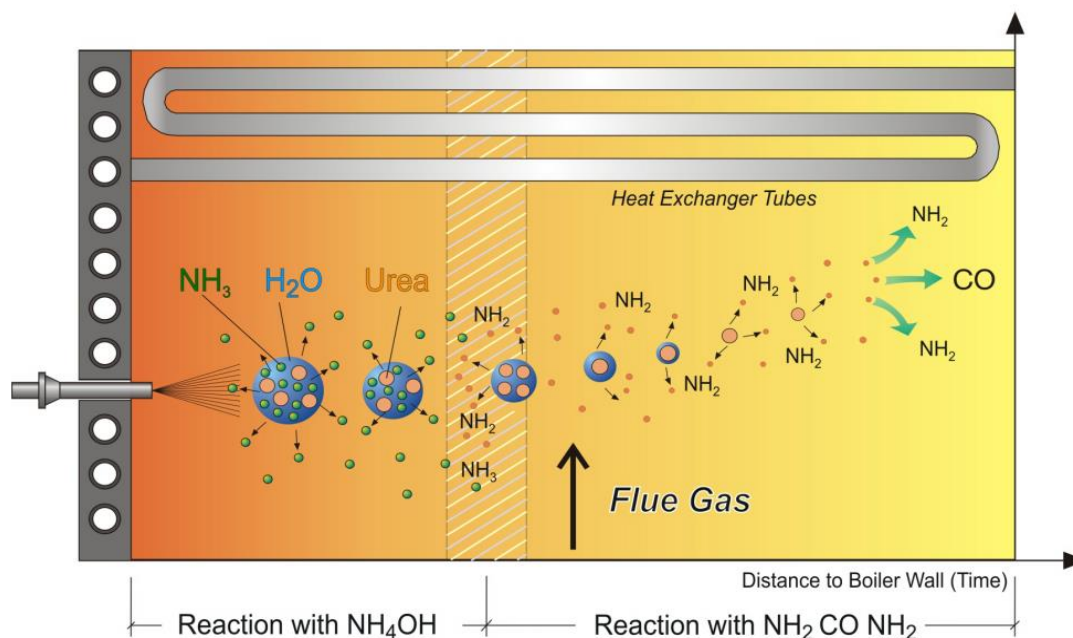


Obrázek 2-17 Aplikace SNCR s použitím močoviny (9)

### 2.4.2.2 TWIN-NO<sub>x</sub> proces – Kombinace čpavkové vody a močoviny

Technologie TWIN-NO<sub>x</sub> redukce je systém kombinující vlastnosti obou činidel. Jak již bylo zmíněno čpavková voda, jako reakční činidlo se potýká s problémem v podobě vysoké těkavosti, díky které dochází bezprostředně po vstřiku k spálení reagentu a tvorbě dalších oxidů dusíku viz. obr.2-18. Močovina na rozdíl od čpavkové vody dokáže dosáhnout daleko větších penetračních hloubek a celkově přijatelnějších redukčních vlastností z důvodů nižší těkavosti viz. obr.2-18. Ovšem nevýhodou takto dlouhodobé výdrže/trajektorie kapiček močoviny s vodou je narážení na rozpálené plochy výparníku a přehříváků. Při nárazech v zásadě po určitém čase dochází k rozrušování povrchů a následné korozi. Tato hrozba se stává limitující ve chvíli, kdy ideální teplotní pole leží mezi výparníky či přehříváky

Tato metoda spojuje již uvedené charakteristické vlastnosti obou činidel a otevírá tak další možnosti pro úpravy a zlepšování redukce NO<sub>x</sub>. (7)



Obrázek 2-18 Aplikace technologie TWIN NO<sub>x</sub> (7)

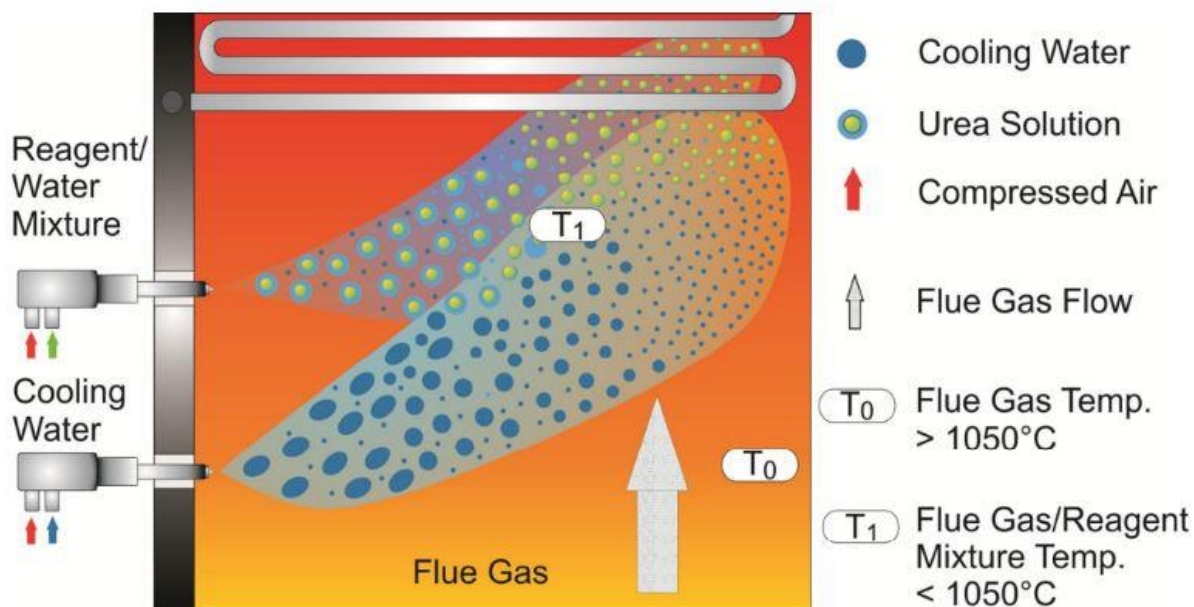
U technologie TWIN-NO<sub>x</sub> se používá dodávky směsi čpavkové vody a močoviny. Stěžejní záležitostí je správný poměr směsi pro cílené pozitivní účinky. Tato technologie a její procesní charakterity vyplynuly z dlouholetých zkušeností a provozních poznatků. Technologie se v praxi označuje pod obchodním názvem TWIN-NO<sub>x</sub>. Výhody systému TWIN-NO<sub>x</sub> jsou shrnuty ve vyšší efektivnosti systému, širším optimálním teplotním pásmu, širším výkonovém rozsahu,

vyšší účinnosti, nižším čpavkovém skluzu, nižší spotřebě činidla a minimálním riziku koroze.  
(7) (7)

### 2.4.2.3 Selektivní chlazení spalín

V případě mnoha kotlů jsou teploty spalín na konci ohniště příliš vysoké pro proces SNCR a to obzvláště při plném výkonu kotle. Vstřikování činidla v místech s nejnižšími teplotami může znamenat instalaci do prostorů již využitých přehříváky a to zásadně komplikuje situaci. Každý z těchto zásahů musí být důkladně prověřen z hlediska technické a ekonomické efektivity.

Jak již bylo zmíněno, ve většině případů jsou teploty spalín na konci ohniště příliš vysoké pro redukcí NO<sub>x</sub> metodou SNCR. Zpravidla to bývá při výkonových špičkách a v dispozičně velice omezeném prostoru. V takových to případech je možné uvažovat o uplatnění chlazení spalín procesní vodou. Jde o nástřik procesní vody do prostoru spalovací komory za účelem snížení teplot spalín. Jedním z přístupů může být použití již existujících trysek na směs činidlo/voda a jejich přestavba pro vhodné rozptýlení vody nebo instalace nových trysek viz *obr.2-19*. Systém trysek zástřiku chladicí vody je řízen dle potřeb pro SNCR a neměl by mít vliv na funkčnost vstřikované směsi činidlo/voda. (7)



Obrázek 2-19 Aplikace SNCR plus dochlazování spalín vodou (7)

Tyto varianty se používají v krajních případech kdy například chlazení spalín vodou slouží k doplňujícím transportním účelům reagentu do míst s odpovídajícím teplotním oknem. Jelikož

se tyto problémy u kotlů TKY nevyskytují, nebudou tyto metody dále rozebírány ani uvažovány pro použití v praxi.

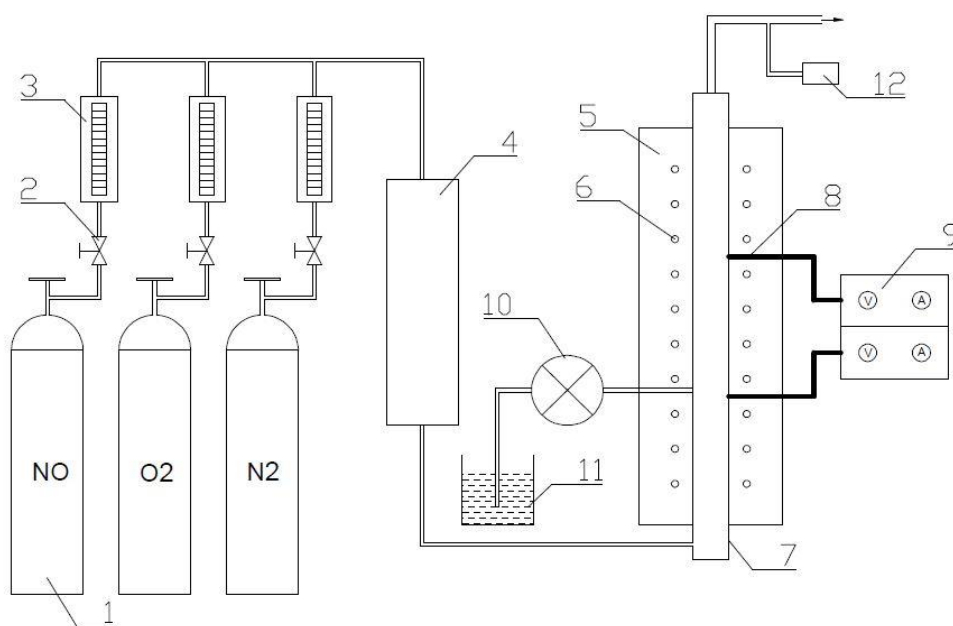
## 2.5 Popis vlivů na NO<sub>x</sub> metodou SNCR

### 2.5.1.1 Průkaz vlivů na experimentálním zařízení

Selektivní nekatalitická redukce (SNCR) je technologie, která využívá vstřiku činidla ze amino-skupiny (amoniak, močovina, hydrogenuhličitan amonný) při vhodných teplotních rozmezích (850 - 1050°C) k přeměně NO<sub>x</sub> ve spalinách na N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O bez potřeby katalyzátoru. Protože močovina je netoxická a stabilní, nenáročná na přepravu a skladování. NO<sub>x</sub>OUT proces s použitím (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>) jako denitrifikačního činidla je velice rozšířený a byl již podroben mnoha studiím. Výzkumy technologie SNCR ukázaly, že denitrifikační efekt závisí na mnoha faktorech jako je reakční teplota, NSR (nominální stechiometrický poměr - množství močoviny potřebné pro žádanou hodnotu redukce NO<sub>x</sub>), koncentrace O<sub>2</sub> a aditiv. V následujícím odstavci je nastíněn projekt který dokazuje vliv výše uvedených faktorů na tvorbu a redukci NO<sub>x</sub>. (11)

#### 2.5.1.1.1 Experimentální zařízení

K provedení experimentu byl zapotřebí sestavit vlastní vertikální stanici. Experimentální zařízení se skládá z plyn dopravujícího potrubí, z elektricky vyhřívaného ohniště (reaktoru), zařízení pro vstřik činidla, spalinového analyzátoru a ostatních komponent. Celé zařízení je schématicky naznačeno na *obr.2-20*. (11)



Obrázek 2-20 Schéma experimentálního zařízení (11)



Ohniště (reaktor) je svisle instalovaná trubka (ø60mm x 700mm), v elektricky vyhřívaném ohništi. Elektricky vyhřívané ohniště s karbidem křemíku jako vytápěcím prvkem, skrz teplotní kontrolu s termočlánky tvořící systém pro zpětnou vazbu, který může efektivně řídit a měřit teplotu v ohništi s přesností  $\pm 5^\circ\text{C}$  s nejvyšší přípustnou teplotou  $1350^\circ\text{C}$ . Směs tří druhů plynů (NO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) je čerpána ze zásobníků přes redukční ventily, průtokoměry do směšovací nádoby. V této fázi k vytvoření směsi plynů co nejvíce se podobající spalinám. Následně směs vstupuje do ohniště (reaktoru), kde reagují s činidlem vstříkovaný za nejvhodnějších podmínek.

### 2.5.1.1.2 Experimentální metoda

Pro tento experiment bylo jako činidlo byla vybrána močovina s hmotnostním podílem 2% s reakčním teplotním rozsahem od  $750^\circ\text{C}$  do  $1150^\circ\text{C}$ . Experiment probíhal za následujících podmínek: Celkový objemový tok simulovaných spalin byl  $2\text{dm}^3/\text{min}$ , počáteční koncentrace byla  $300\ \mu\text{dm}^3/\text{dm}^3$ , NSR = 1.5, koncentrace O<sub>2</sub> 2%, a N<sub>2</sub> byla vyrovnávací plyn. (11)

### 2.5.1.1.3 Výsledky experimentu

#### 2.5.1.1.3.1 Vliv teploty na SNCR

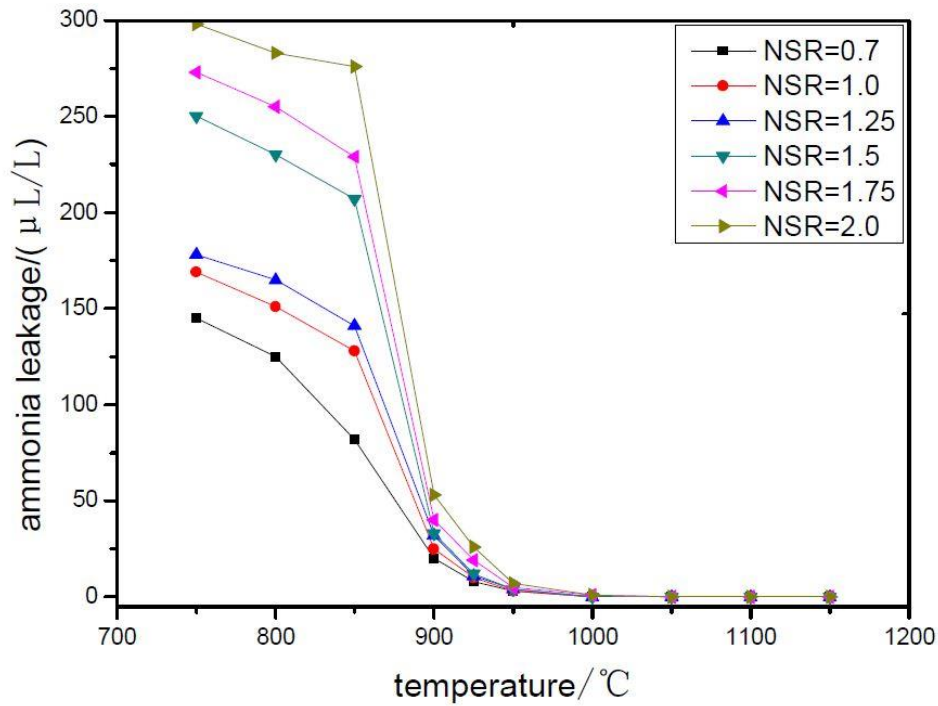
Mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující výslednou redukci NO<sub>x</sub> patří teplota spalin. Pro určení výsledné účinnosti denitrifikace slouží čpavkový skluz a koncentrace N<sub>2</sub>O. Tyto vlivy budou dále rozebírány.

Jak je zřejmé z *obr.2-21 a obr.2-22*, optimální hodnota čpavkového skluzu a redukce NO<sub>x</sub> se nacházela při různých NSR v okolí  $925^\circ\text{C}$ . Při podkročení teploty pod  $800^\circ\text{C}$  je koncentrace OH, H, O aktivních radikálů příliš nízká pro potlačení redukce NO, a požadované redukce je velice obtížné dosáhnout a její účinnost se pohybuje pod hodnotou 10%.

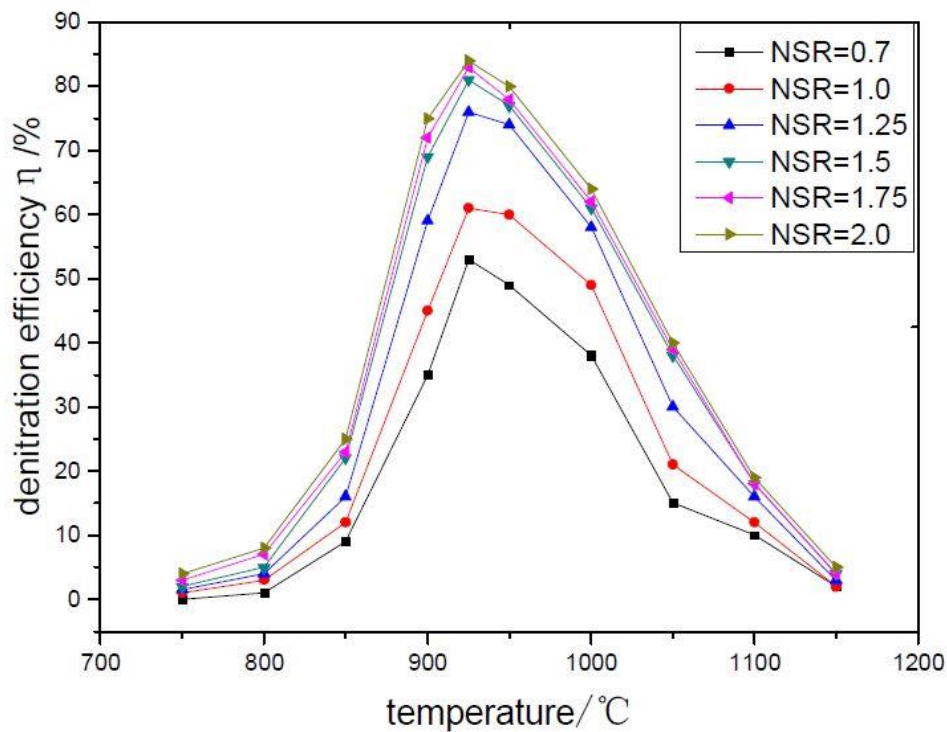
V případě nárůstu teploty dochází k prudkému nárůstu denitrifikace, který je způsoben reakcí spalin s močovinou. Tyto reakce se projeví především na koncentraci NO a na zvýšené účinnosti denitrifikace. Pokud je teplota  $925^\circ\text{C}$ , účinnost denitrifikace dosahuje svého maxima a to až 81% (při NSR=1,5) a výsledkem je ideální teplota pro denitrifikaci  $925^\circ\text{C}$ . V případě dalšího zvyšování teploty dochází k zvýšenému poměru oxidační reakci NH<sub>3</sub> oproti redukčnímu poměru NO a výsledkem je zmenšující se účinnost denitrifikace s postupně se zvyšující teplotou. V případě kdy teplota překročila  $1150^\circ\text{C}$ , účinnost denitrifikace klesla pod 10%. Z uvedených výsledků plyne závěr, že ideální teplotní rozmezí pro SNCR je od cca  $875 - 1025^\circ\text{C}$ , kde účinnost denitrifikace je vyšší než 50%. (11)



Možnosti redukce NOx teplárna Komořany



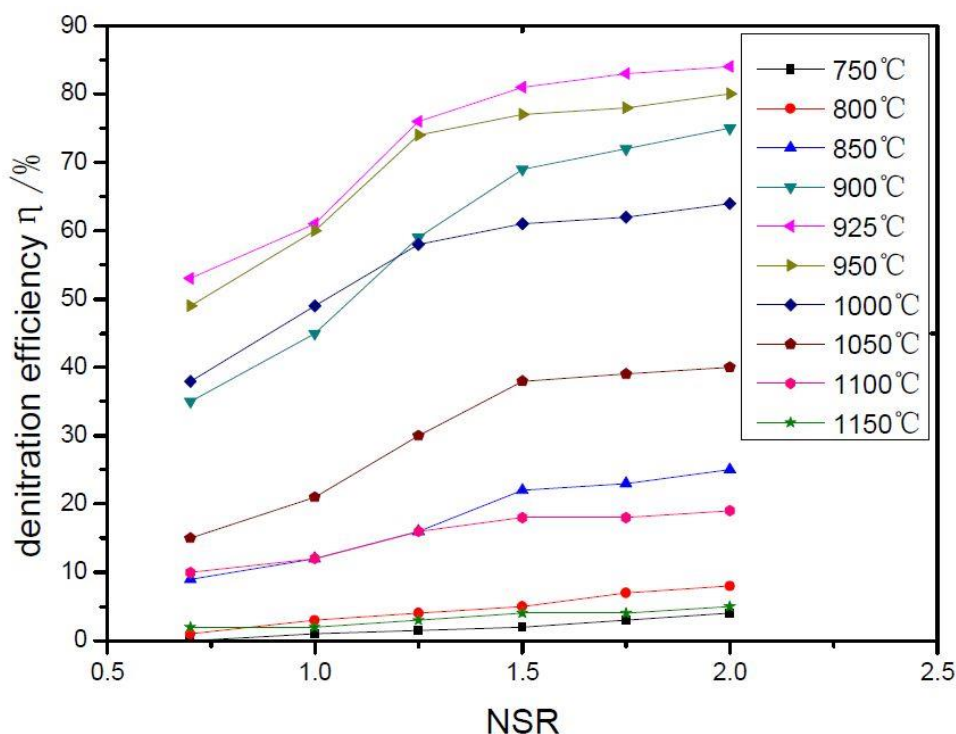
Obrázek 2-21 Vliv teploty spalin na množství čpavkového skluzu při dílčích NSR (11)



Obrázek 2-22 Vliv teploty na účinnost denitrifikace SNCR při dílčích NSR (11)

Z obr.2-21 můžeme jasně vidět vliv teploty na tvorbu čpavkového skluzu, který je naprosto zřejmý. Znatelně největší byl čpavkový skluz při nižších teplotách, protože největší rozklad a spotřeba čpavku oxidačními či redukčními reakcemi nemohla proběhnout, za tak nízkých teplot. V případě překročení 800°C se i s dále zvyšující teplotou prudce zvyšuje redukce NO a oxidace NH<sub>3</sub>. Výsledkem těchto dvou reakcí, spotřebovávajících pro svůj průběh NH<sub>3</sub>, je prudký pokles množství čpavkového skluzu ve spalinách. Při teplotách blízkých 925°C jsou koncentrace čpavkového skluzu pod hranicí 10μL/L. Při dalším zvyšování teploty spalin koncentrace čpavkového skluzu dále klesaly k hodnotám blízkým nule. (11)

Z obr.2-21 a obr.2-22 vyplývá, že při teplotách vyšších než 925°C koncentrace čpavkového skluzu je nižší a účinnost denitrifikace klesá rovnoměrně. Toto svědčí o vysoké spotřebě NH<sub>3</sub> a produkovaném NO, které taktéž přispívá k oxidaci NH<sub>3</sub>. Z obr.2-22 a obr.2-23 vyplývá, že nejvyšší účinnost denitrifikace se nachází v blízkosti teploty 925°C. (11)



Obrázek 2-23 Vliv NSR na účinnost denitrifikace SNCR při dílčích teplotách spalin (11)

### 2.5.1.1.3.2 Vliv NSR na SNCR

Normalizovaný stechiometrický poměr (NSR), představuje poměr mezi skutečným a teoretickým čpavkovým a dusíkovým poměrem. Dle chemických rovnic pro NSR=1, kde dochází k celkovému odstranění NO ze spalin. Vzhledem k vlivům je skutečný proces ovlivněn

procesy jako je stupeň promíšení, kdy při NSR=1 nelze dosáhnout požadovaných výsledků a proto je vhodné tento poměr zvýšit.

Z *obr.2-21* je zřejmé, že při zvyšování NSR dochází k nárůstu účinnosti denitrifikaci. V případě NSR=1,5 účinnost denitrifikace dosahovala maximálně 81%. Při vyšších hodnotách účinnost dále rostla a při NSR=2 účinnost dosahuje maximálně 84%. Z *obr.2-21* vyplývají důsledky zvyšování hodnoty NSR, které se projevují jako zvýšený čpavkový skluz, který již už není přínosem pro redukci NO.

Kvůli zvyšujícímu se NSR a rozkladu močoviny dochází k zvýšení produkce NH<sub>3</sub>, který má přímý vliv na čpavkový skluz. Zároveň při zvyšující se hodnotách koncentrace NH<sub>3</sub> může dojít k výraznému nárůstu koncentrace N<sub>2</sub>O, a proto by hodnoty NSR neměly výrazně přesahovat optimální hodnoty. Vzhledem k účinnosti denitrifikace a hodnotám čpavkového skluzu, optimální hodnota činí NSR=1,5. (11)

### 2.5.1.2 Závěr experimentu

Reakční teplota má veliký vliv na SNCR metodu odstraňování NO<sub>x</sub>. Optimální teplota pro metodu SNCR je cca 925°C s maximální dosaženou denitrifikační účinností 81%. Optimální teplotní okno pro provoz SNCR je 875 - 1025°C, při němž SNCR dosahuje denitrifikační účinnosti přes 50%. Čpavkový skluz se prudce snižuje s rostoucí teplotou. S teplotou přesahující 950°C je jeho hodnota cca 10μL/L. (11)

## 2.6 Srovnání vhodných metod pro redukcí NO<sub>x</sub> na teplárně Komořany

Pro srovnání byly vybrána selektivní katalytická metoda (SCR) a selektivní nekatalytická metoda (SNCR), které byly popsány již výše. Obě tyto metody byly zvažovány za účelem snížení emisí NO<sub>x</sub> na teplárně Komořany, z důvodu již využití plného potenciálu primárních opatření.

### 2.6.1 Hlavní rozdíly mezi technologií

#### 2.6.1.1 Použití technologie SNCR

##### 2.6.1.1.1 Nevýhody

Mezi všeobecně nejrozšířenější problematiku metody SNCR je dodržení potřebných teplot pro realizaci a maximální účinnost denitrifikačních reakcí mezi spaliny, respektive oxidy dusíku obsaženými v nich, a nastříkovaným činidlem.

Jedním z problémů, který by mohl nastat při instalaci SNCR v teplárně Komořany je čpavkový skluz. Jelikož kotle zde instalované jsou fluidního typu se stacionární fluidní vrstvou při středních teplotách 790°C - 860°C může být problémem dosažení spodní hranice ideálního teplotního rozsahu pro denitrifikaci viz. obr. č. 1.2.2 Pokud by bylo ovšem možné dosáhnout tohoto teplotního okna, je zde riziko vysokých hodnot čpavkového skluzu ( $\geq 5 \text{ mg/ Nm}^3$ ). Při zvýšeném čpavkovém skluzu dochází samozřejmě i k vedlejším negativním dopadům, jako je narušování povrchu stěn kotle dopadem neodpařených kapiček směsi vody s močovinou nebo čpavkové vody. Tyto dynamické účinky jsou hrozbou především na povrchu výparníku a přehříváků, kde s postupem degradace povrchu teplosměnných ploch se mohou přidat i korozní účinky čpavku, které mohou vést až k poškození zařízení.

Dalším důsledkem zvýšeného čpavkového skluzu je přestup čpavku do popílku odloučeného ze spalin. Čpavek adsorbovaný v popílku vytváří silný zápach, zhoršuje jeho jakékoliv vedlejší využití (zhoršení prodejnosti aglomerátu) a v neposlední řadě ukládání jako aglomerátu.

Důvodem pro nutnou zvýšenou opatrnost při skladování popílku s adsorbovaným čpavkem je možnost jeho vylučování z popílku a kontaminace půdy či podzemních vod. K vyloučení čpavku může dojít při ukládání popílku do otevřeného terénu z důvodu navyšování teploty navážky a následného úniku čpavku do ovzduší.

V neposlední řadě jsou zde náklady na provoz SNCR ve kterých dominuje cena a množství potřebného reagentu s náklady na jeho režii a úpravu.

### 2.6.1.1.2 Výhody

Jako hlavní výhody technologie SNCR jsou nízké pořizovací náklady ve srovnání s realizací SCR. Tyto náklady se pohybují 7mil. Kč pro jeden kotel pro všechny jednotky K1 - K10 se cena pohybuje okolo 70mil. Kč. Tato cena obsahuje projektovou dokumentaci, instalační materiál, veškerá podpůrná a aplikační zařízení, systém měření a regulace, připojení na řídicí systém kotle a kompletní elektročást. Provozní je odvozena od ceny nastříkovaného činidla a od ceny vody, která je nedílnou součástí nastříkované směsi. Pokud budeme uvažovat poměr Satamin/voda = 100/100 (100kg/h - Satamin a 100kg/h - voda) při výkonu kotle 110t/h, cena za 1t směsi Satamin + voda = 5 900 Kč a počet provozních hodin 8000h. Z uvedených předpokladů jsme potom schopni určit orientační roční náklady na provoz SNCR.

$$800t \times 5\,900\text{Kč}/t = 4\,720\,000\text{-Kč} \quad (10)$$

Pro instalaci na všech jednotkách K3 - K10 je cena odhadována do 50mil.Kč/ rok.

Výše provozních nákladů je silně závislá na poměru Satamin/Voda.

Tyto náklady jsou pouze převzaté dle katalogu výrobců a natolik dostačující, abychom byli schopni určit cenovou přijatelnost této metody ve srovnání s cenami a podmínkami kladenými pro realizaci katalytické metody. (10)

## 2.6.1.2 Použití technologie SCR

### 2.6.1.2.1 Nevýhody

Mezi hlavní nevýhody metody SCR patří vysoké investiční a provozní nároky. Příčinou těchto vysokých nákladů je několik. V první řadě jsou to dispoziční nároky pro výstavbu samotného reaktoru, nosné konstrukce a spalínovodů. Reaktor může zástavbovými rozsahem zabírat až 250m<sup>2</sup> a dosahovat výšek přes 20 m. Pro uspořádání Low-Dust a Tail-End, jako jediné reálně použitelné varianty v teplárně Komořany jsou zde navržena řešení zohledňující veškeré možnosti pro instalaci katalytické jednotky.

Tyto varianty jsou:

1. Nad stávající střechu hlavního výrobního bloku
2. Vedle hlavního výrobního Bloku, což by znamenalo odstranění staré administrativní budovy a dílen (z důvodu umístění katalytických jednotek)
3. Zrušení několika cca 5 kotlů v hlavním výrobním bloku a využití uvolněného prostoru pro umístění katalytických jednotek

Jak je již zřejmé, tak veškeré varianty navrhované pro instalaci katalytického reaktoru jsou velice dispozičně náročné a tudíž se dá předpokládat, i jejich vysoká pořizovací cena. Dále by již vysoká pořizovací cena byla navýšena o demoliční a demontážní práce potřebné pro uvolnění místa katalytickým jednotkám. Tyto aspekty budou nejspíše jedněmi z hlavních rozhodujících kritérií při rozhodování investora mezi katalytickou jednotkou SCR a nekatalytickou jednotkou SNCR.

Další položkou jsou provozní náklady, jako zemní plyn pro dohřev spalin pomocí hořáku na zemní plyn (varianta Tail-End) (v rádech 100 až 200tis. Kč za rok), regenerace katalyzátoru, opravy katalyzátoru, dokupování poškozených jednotek katalyzátoru, spotřeba vstříkovaného redukčního činidla a zvýšená spotřeba energie spalinového ventilátoru, které je zapříčiněna zvýšenou tlakovou ztrátou katalyzátoru. Tyto náklady výrazně převyšují investiční náklady na metodu SNCR. Náklady na jednu jednotku činí až 90mil. Kč a pro instalaci na všechny jednotky K3 - K10 by cena přesahovala až jednu miliardu Korun českých. (10) (12)

### **2.6.1.2.2 Výhody**

Mezi hlavní výhody katalytické redukce oxidů dusíku čpavkem či močovinou za použití katalyzátoru je použití pro širokou škálu paliv jako zemní plyn, procesní plyny a uhlí. Tato forma redukce NO<sub>x</sub> nevytváří žádné vedlejší znečišťující emise. Jednou z největších výhod je vzhledem k zapojení možnost odběru a redukce libovolného množství spalin a to s redukcí až 90% NO<sub>x</sub> produkovaných spalovacím zařízením.

Úsporu ve srovnání s metodou SNCR přináší taktéž fakt, že redukční činidlo nastříkované do katalyzátoru je všeobecně používáné o 25% koncentraci reagentu v celkové směsi a tudíž zde dochází u srovnatelných rozsahů instalace k úspoře reagentu.

### 3 Verifikace a posouzení vhodnosti metody SNCR pro snížení emisí NO<sub>x</sub> na TKY

#### 3.1 Emisní měření NO za použití AMS instalovaného za kotlem K5

##### 3.1.1 Vyhodnocení ověření regresivních závislostí analyzátorů plynů dle ČSN EN 14 181

Pro následující výpočty bude nezbytné využití dat z autorizovaného měřicího systému dále AMS, a tudíž je potřebné zjistit, zdali tento systém není zatížen chybou. Tato metoda porovnává koncentrace plyných znečišťujících látek (NO) ve spalinách naměřených AMS s hodnotami změřenými autorizovanou skupinou. Postup metody porovnání podléhá normě ČSN EN 14 181 Stacionární zdroje emisí - Prokazování jakosti automatizovaných měřicích systémů při běžném provozu. (13)

Účelem tohoto autorizovaného měření je roční ověření správnosti (ATS) kalibrační funkce analyzátoru instalovaného za kotlem K5

Souběžné měření plyných znečišťujících látek proběhlo ve dnech 7.-8.12.2016.

Výsledkem měření je ověření správnosti kalibrační funkce AMS (autorizovaného měřicího systému) a to výpočtem variability a provedením testu variability a zkoušky platnosti kalibrační funkce AMS. (13)

#### Základní údaje

AMS autorizovaný měřicí systém

ELV emisní limit

NRM normovaná referenční metoda

AST roční ověření správnosti

$y_{s,max}$ ,  $y_{s,min}$  největší resp. Nejmenší hodnota získaná *NRM* za standardních podmínek

$y_{prum}$  průměrná hodnota získaných výsledků *NRM*

$x_{prum}$  průměrná hodnota signálů *AMS*

$x_i$  i-tý měřená signál *AMS*

$y_i$  i-tý měřená signál *NRM*

$a$  nejlepší odhad úseku kalibrační funkce

$b$  nejlepší odhad směrnice kalibrační funkce

$N$  počet párových výsledků při souběžném měření

$Z$  rozdíl mezi nulovým čtením *AMS* a nulou

$\hat{y}_i$  nejlepší odhad "skutečné hodnoty" vypočtený za použití kalibrační funkce

- $s_D$  směrodatná odchylka rozdílů  $D_i$  výsledků souběžného měření  
 $D_i$  rozdíl mezi hodnotou  $y_i$  naměřenou NRM a  $\hat{y}_i$  naměřenou kalibrovaným AMS  
 $D_{prum}$  průměrná hodnota  $D_i$   
 $t$  Studentova rozdělení  
 $\sigma_o$  nejistota odvozená z legislativních požadavků  
 $k_v$  zkušební hodnota pro zajištění variability  
 $p$  procentuální podíl  
 $E$  hodnota emisního limitu  
 $t_{0,95, (N-1)}$  hodnota  $t$  distribuce na hladině významnosti 95% s počtem stupňů volnosti  $N-1$

### Zajištění platnosti kalibrační funkce AMS při měření NO

#### Výpočet variability

$$s_D = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2}$$

$$s_D = \sqrt{\frac{11,33}{6-1}}$$

$$s_D = 1,51 \text{ mg/m}^3 \quad (13)$$

#### Provedení testu variability - NO

Variabilita je přijata a AMS projde testem, když platí:

$$s_D \leq 1,5 \cdot \sigma_o \cdot k_v$$

$$\sigma_o = \frac{p \cdot E}{1,96} = \frac{0,2 \cdot 424}{1,96} = 43,265 \text{ mg/m}^3$$

$$\sigma_o = \frac{0,2 \cdot 424}{1,96}$$

$$\sigma_o = 43,265 \text{ mg/m}^3$$

$$1,51 \leq 1,5 \cdot 43,265 \cdot 0,9329$$

$$1,51 \leq 59,452 \quad \text{z uvedeného vyplývá, že AMS testem prošel. (13)}$$

#### Zkouška platnosti kalibrační funkce - NO

$$|D_{prum}| \leq t_{0,95(N-1)} \cdot \left(\frac{s_D}{\sqrt{N}}\right) + \sigma_o$$

$$9,6667 \leq 2,015 \cdot \left(\frac{1,51}{\sqrt{6}}\right) + 43,265$$

$$9,6667 \leq 44,507 \quad \text{z uvedeného vyplývá, že AMS testem prošel. (13)}$$

**Poznámka: Zajištění platnosti kalibrační funkce bylo prováděno na rozsahu 1300 mg/m<sup>3</sup>**



**Základní informace AMS - NO**

Charakteristika	Emise NO
Měřicí princip AMS	Měření nerozptylové infračervené absorbce
Nulový bod	4 mA
Měřicí princip NRM	Chemiluminiscenční metoda
Emisní limit (ELV)	200 mg.m <sup>-3</sup>
Přípustná nejistota měření	20%
Kalibrační funkce	$\hat{y} = 85,014x_i - 352,29$

## Platný kalibrační rozsah

Kalibrační funkce AMS je platná v rozmezí od nuly do  $\hat{y}_{i,s MAX}$  výsledků naměřených v kalibrovaném AMS přepočtených na standardní podmínky plus rozšíření o 10%  $\hat{y}_{i,s MAX}$  nebo o 20% z ELV, podle toho, která hodnota je větší. Pro daný AMS je tato maximální hodnota  $\hat{y}_{i,s MAX} = \hat{y}_{5,s MAX} = 126 \text{ mg.m}^{-3}$ . Protože  $1,10 \cdot \hat{y}_{i,s MAX}$  je větší, než  $0,2 \cdot E = 0,2 \cdot 200 = 40 \text{ mg.m}^{-3}$  (13)

$$\hat{y}_{5,s MAX} = 126 \text{ mg.m}^{-3}$$

$$0 \leq \hat{y}_{i,s MAX} \leq (1,1 \cdot \hat{y}_{5,s MAX})$$

$$0 \leq 126 \leq 138,6 \text{ mg.m}^{-3}$$

Platný kalibrační rozsah je 0,0 mg.m<sup>-3</sup> až 138,6 mg.m<sup>-3</sup> za standardních podmínek

Variabilita S <sub>D</sub>	1,51
Nejistota $\sigma_o$	43,265
Test variability	<b><math>1,51 \leq 1,5 \cdot 43,265 \cdot 0,9329</math></b>
AMS testem prošel	ANO
Zkouška platnosti kalibrační funkce	<b><math>9,6667 \leq 2,015 \cdot \left(\frac{1,51}{\sqrt{6}}\right) + 43,265</math></b>
Kalibrace AMS je přijata	ANO

### **3.1.2 Závěr**

Z uvedených výpočtů vyplývá, že měření autorizovaný měřicí systém (AMS) není zatížen žádnými chybami a prošel veškerými zkouškami bez vážnějších odchylek. Hodnoty získané v AMS budou dále použity ke zpracování v následujících kapitolách.

### 3.2 Popis stávajícího stavu a posuzování vhodnosti metody SNCR

Jak již bylo zmíněno v předchozí části, teplárna Komořany se dělí na dva provozní celky TKY-I a TKY-II. Oba tyto celky jsou vybaveny stejnou technologií uhlí spalujících kotlů s fluidním ložem. Jedním z mnoha rozdílů, ale zásadním, který tyto dva celky odlišuje, jest instalovaná recirkulace spalin na kotlích TKY II.

Posouzení možnosti aplikace selektivní nekatalytické metody na kotle K3 až K10 bude rozděleno do dvou skupin. První skupina pro kotle v celku TKY-I (kotle bez recirkulace) K3 až K5 a druhá skupina s kotly z celku TKY-II (kotle s recirkulací) K6 až K10. Jako zástupce první skupiny kotlů TKY-I byl určen kotel K5. Pro druhou skupinu kotlů TKY-II byl vybrán kotel K6. Tyto kotle byly vybrány z důvodu ideálních provozních hodin pro posuzování obou těchto skupin při naměřených emisích NO<sub>x</sub>, a teplot ve spalovací komorách.

Jako vyhodnocovací a srovnávané období pro obě skupiny, resp. oba kotle K5 a K6, byl vybrán listopad 2016. Období od 1.11.2016 do 31.11.2016 bylo vybráno, protože jako jediné splňovalo podmínku minimálního počtu odstavení kotle, poruch měřících termočlánků, provozních zkoušek či jiných nepředvídatelných stavů, které by negativně ovlivňovaly celkové vyhodnocení. Takto byly vybrány, aby naměřené hodnoty co nejpřesněji reprezentovaly chování každého z kotlů.

Pro posuzování vhodnosti selektivní nekatalytické redukce byly za vybrané období vyhodnocovány měření emisí NO<sub>x</sub> v půlhodinových průměrech suchých spalin. Tyto měřící body autorizovaného měřícího systému AMS jsou umístěny za každým z kotlů. Měření byla zpracována a s patřičnou přesností byla vyhotovena pásma s hranicemi určující rozsah redukováných NO<sub>x</sub> metodou SNCR.

Jako stěžejní byly brány pro výpočty účinnosti denitrifikace a množství potřebného reagentu vždy horní hranice pásem naměřených NO<sub>x</sub>. Tento přístup zajistí dostatečnou jistotu redukce veškerých nižších hodnot pod horní hranicí redukováného pásma.

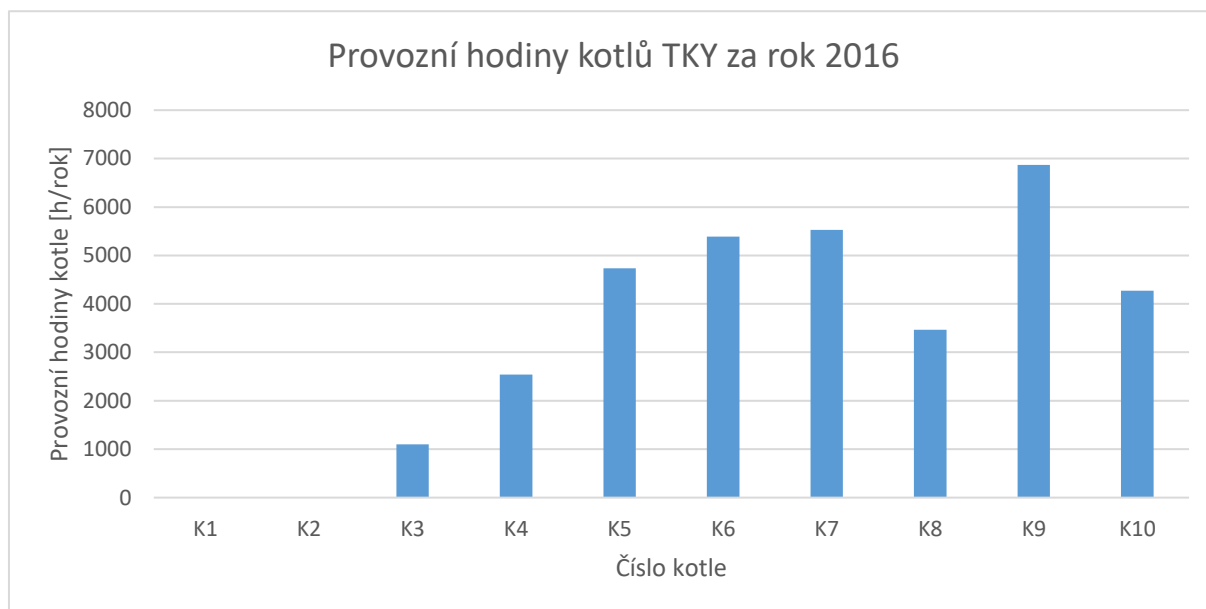
Jako hlavním kritériem pro účinnost denitrifikace metodou SNCR je uvažována teplota spalin v místě nástřiku. Z tohoto důvodu a tudíž v následující části bude podrobně rozebráno a srovnáno několik teplotních úrovní v závislosti na výkonu kotlů za účelem určení ideálního místa pro instalaci vstřikovacích zařízení.

Jako posledním krokem je určení spotřeby potřebného reagentu a směsi reagentu s vodou pro potřebnou denitrifikaci horní hranice redukováného pásma.

### 3.2.1 Provozní hodiny kotlů TKY

Provozní hodiny kotlů TKY byl vybrány za období od 1.1.2016 do 31.12.2016 viz. obr.3-1.

Z grafu je patrné, že kotle s recirkulací (K6 až K10) jsou po většinu roku s průměrnou provozní dobrou 5106h/rok, která je skoro dvojnásobná oproti kotlům bez recirkulace (K3 až K5) s průměrnou provozní dobou 2810h/rok.



Obrázek 3-1 Počet provozních hodin kotlů TKY za rok 2016 (12)

Tabulka 3-1 Provozní hodiny za rok 2016 (12)

<b>Kotel</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	<b>K5</b>
Provozní hodiny [h/rok]	0	0	1100	2593	4737
Průměr provozních hodin [h/rok]	2810				
<b>Kotel</b>	<b>K6</b>	<b>K7</b>	<b>K8</b>	<b>K9</b>	<b>K10</b>
Provozní hodiny [h/rok]	5388	5530	3468	6870	4275
Průměr provozních hodin [h/rok]	5106				

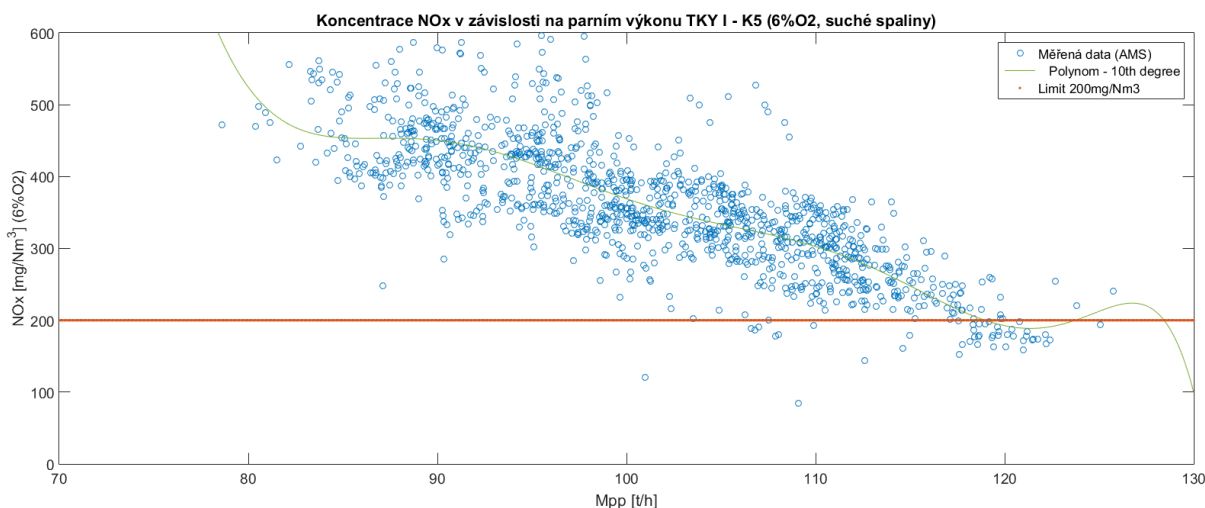
V tab.3.6 jsou zaznamenány provozní hodiny jednotlivých kotlů. Jak již bylo zmíněno, kotle K1 a K2 již byly před rokem 2016 díky poruchám odstaveny, a tudíž s nimi nebude uvažováno pro žádnou další kalkulaci (průměrné hodiny skupiny TKY I byly brány z hodin funkčních kotlů K3 až K5).

### 3.2.2 Stávající stav měřených NO<sub>x</sub>

V následující části jsou prezentována data autorizovaného měřicího systému daného kole. Dále je rozpracováno vyhotovení pásma hodnot redukovaných NO<sub>x</sub>, jako základ pro další zpracování a výpočty potřebných účinností denitrifikace v závislosti na výkonu kotle. Měření jsou dále rozdělena do skupin podle příslušných kotlů.

Stávající měření koncentrace NO<sub>x</sub> je vyobrazeno na viz. obr.3-2. pro kotle K5 a pro kotel na viz. obr.3-3. Z grafu je patrné, že kotle bez jakýchkoliv úprav pro denitrifikaci dosahují velmi zřídka koncentrací okolo 200mg/Nm<sup>3</sup> i při tak vysokých výkonových hladinách jako 115 t/h ostré páry. Tyto kotle TKY I budou, ve srovnání se skupinou TKY II, klást největší nároky na selektivní nekatalytickou denitrifikaci.

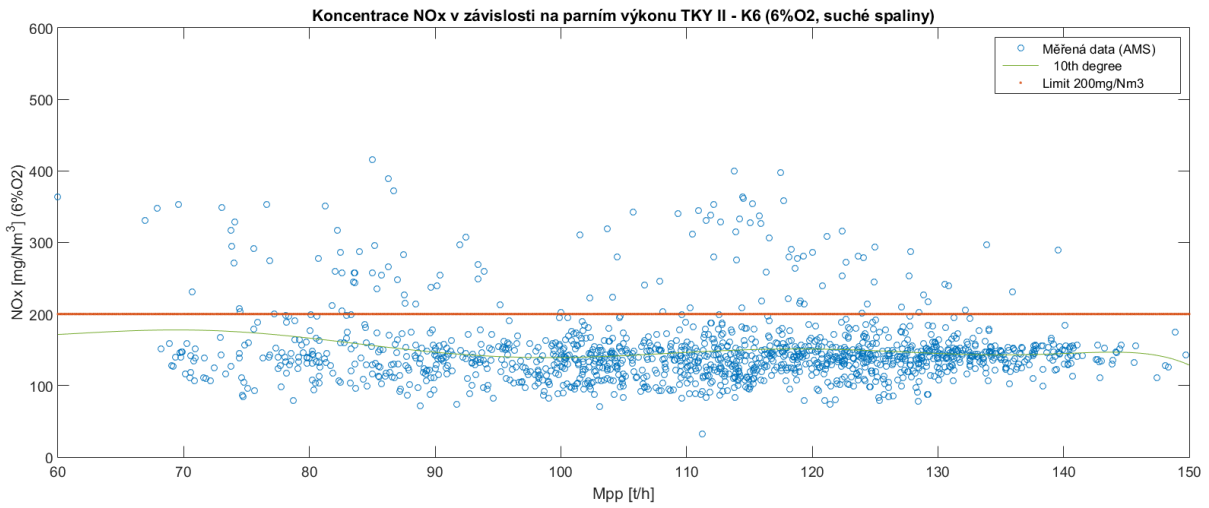
Tyto data byla poskytnuta teplárnou Komořany z autorizovaného měřicího systému, který jsou kotle TKY vybaveny. Hodnoty jsou zpracovány v půlhodinových průměrech. Hodnoty koncentrace NO<sub>x</sub> jsou vztaženy k teplotě 0°C, tlaku 101,325 kPa a ref. obsahu O<sub>2</sub> = 6 %.



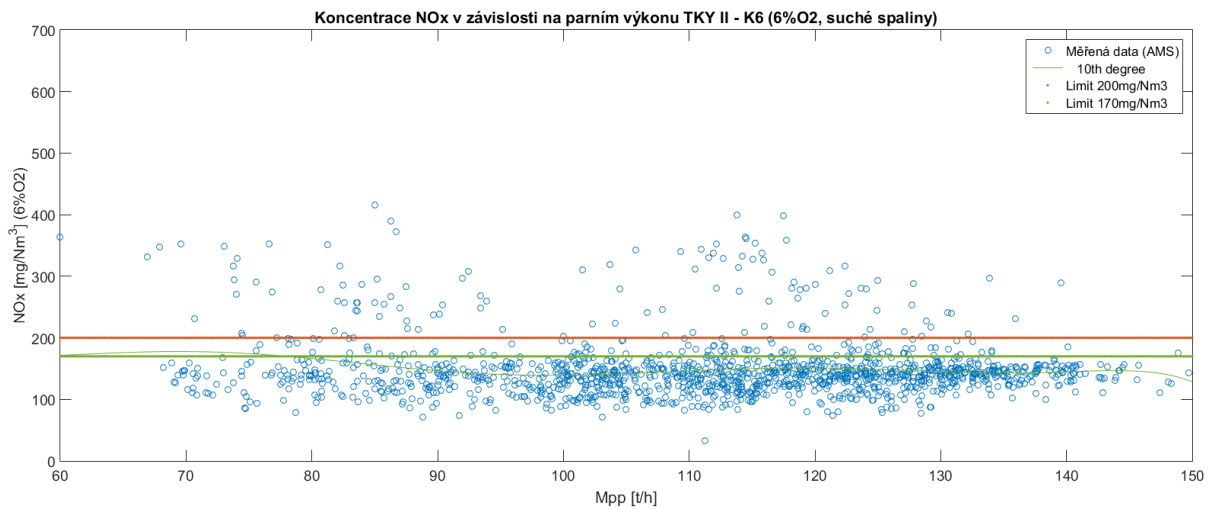
Obrázek 3-2 Koncentrace NO<sub>x</sub> v závislosti na parním výkonu pro kotel K5 s limitem 200mg.Nm<sup>-3</sup> (12)

Kotel K6 jako zástupce skupiny kotlů TKY II, tudíž kotlů s recirkulací dosáhl očekávaných uspokojivějších výsledků. Koncentrace NO<sub>x</sub> pro kotel K6 jsou vyobrazeny na viz. obr.3-3., kde můžeme vidět jednoznačný pokles NO<sub>x</sub> pod až oblast 200mg/Nm<sup>3</sup>. Jelikož ale pokles pod hranici 200 mg/Nm<sup>3</sup> není jednoznačný a stabilní, budou kotle TKY II taktéž podrobeny návrhu a zhodnocení účinku denitrifikace pomocí SNCR. U koncentrace z kotle K6 TKY II nastíněny ještě přísnějšími limity, které činí 170mg/Nm<sup>3</sup>. Tyto limity jsou pouze nastíněny na obr 3-4.

Možnosti redukce NOx teplárna Komořany



Obrázek 3-3 Koncentrace NOx v závislosti na parním výkonu pro kotel K6 s limitem 200mg.Nm<sup>-3</sup> (12)



Obrázek 3-4 Koncentrace NOx v závislosti na parním výkonu pro kotel K6 s limitem 200mg.Nm<sup>-3</sup> a 170mg.Nm<sup>-3</sup> (12)

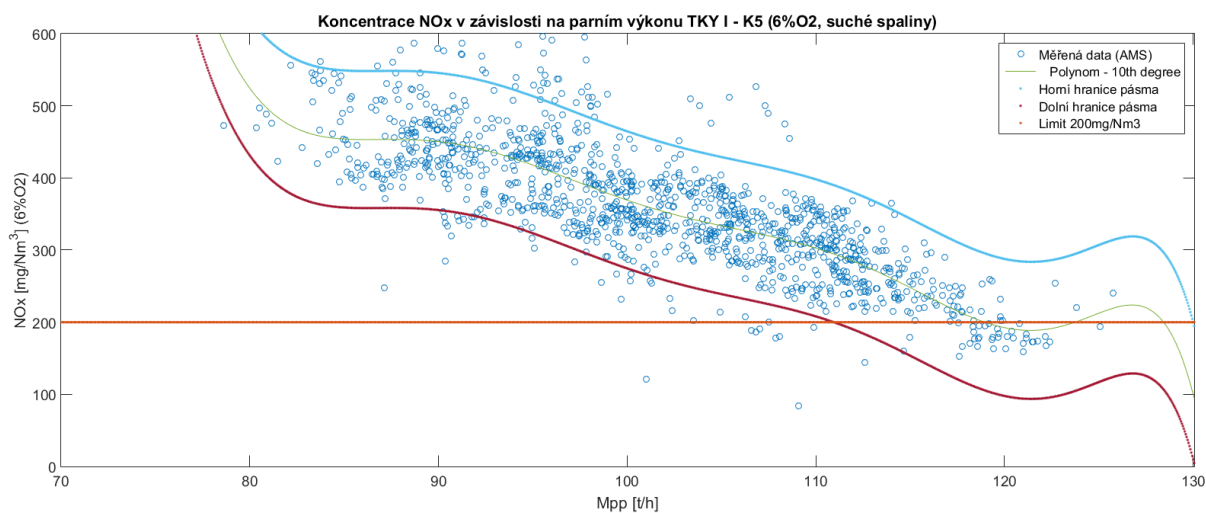
### 3.2.3 Určení hladiny NO<sub>x</sub> pro zhodnocení účinnosti SNCR

Pro následující vyhodnocování aplikovatelnosti zařízení SNCR na kotlích TKY I a TKY II bylo nutné určit hladinu NO<sub>x</sub>, pro kterou bude vyhodnocována účinnost kladená na zařízením SNCR.

#### 3.2.3.1 Pásmo redukovaných NO<sub>x</sub> pro kotel K5 – TKY I

Pásmo pro kotel K5 bylo vytvořeno interpolací pomocí polynomu desátého stupně, který byl vytvořen za pomoci programu Matlab. Jak je patrné z *obr.3-5*, polynom s vysokou přesností určuje střední hodnoty koncentrací NO<sub>x</sub> v závislosti na parním výkonu kotle. Toto pásmo bylo vyhotoveno pro oba kotle s 95% pravděpodobností zahrnutí měřených hodnot.

Jednotlivá vytvořená pásma jsou znázorněna na obrázku *obr.3-5* pro kotel K5 a na *obr.3-6* pro kotel K6.

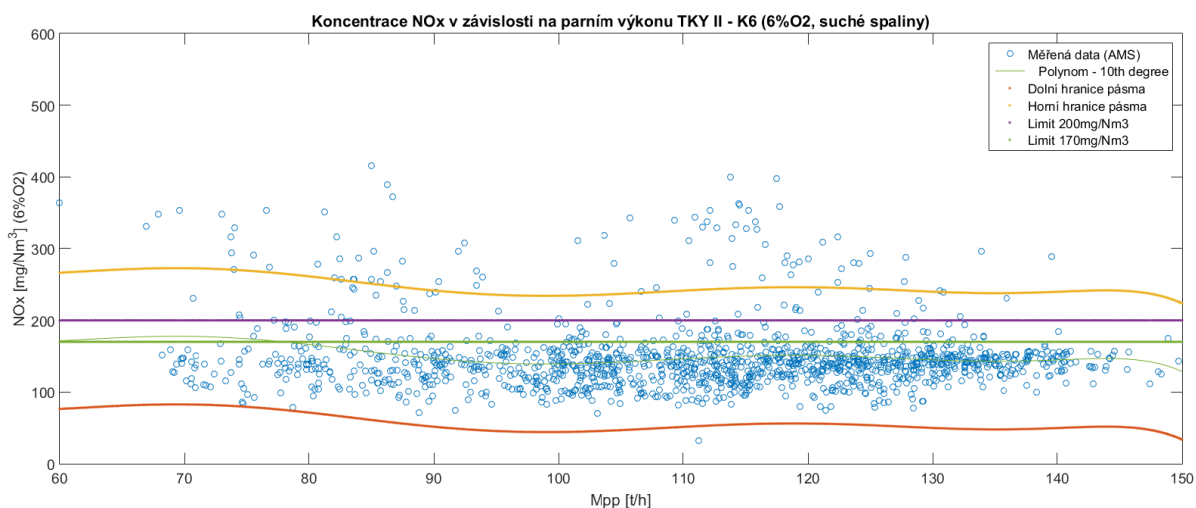


Obrázek 3-5 Pásmo redukovaných NO<sub>x</sub> s limitem 200mg.Nm<sup>-3</sup> pro kotel K5 (12)

Pásmo znázorněné na *obr.3-5* určené dolní a horní křivkou je určující hranicí od 80t/h až do 122t/h ostré páry. Tento rozsah byl vybrán z důvodů zachování přesnosti interpolace vzhledem k množství dostupných naměřených dat koncentrace NO<sub>x</sub>, a to především v krajních oblastech výkonového rozsahu.

### 3.2.3.2 Pásmo redukovaných NO<sub>x</sub> pro kotel K6 – TKY II

Pásmo pro kotel K6 bylo vytvořeno interpolací pomocí polynomu desátého stupně, který byl vytvořen za pomoci programu Matlab. Jak je patrné z viz. obr.3-6, polynom s vysokou přesností určuje střední hodnoty koncentrací NO<sub>x</sub> v závislosti na parním výkonu kotle. Toto pásmo bylo vyhotoveno s 95% pravděpodobností zahrnutí měřených hodnot.



Obrázek 3-6 Pásmo redukovaných NO<sub>x</sub> s limitem 200mg.Nm<sup>-3</sup> a 170 mg/Nm<sup>-3</sup> pro kotel K6 (12)

Pásmo znázorněné na viz. obr.3-6, je určené dolní a horní křivkou určující hranicí od 70t/h až do 148t/h ostré páry. Tento rozsah byl vybrán z důvodů zachování přesnosti interpolace vzhledem k množství dostupných naměřených dat koncentrace NO<sub>x</sub>, a to především v krajních oblastech výkonového rozsahu.



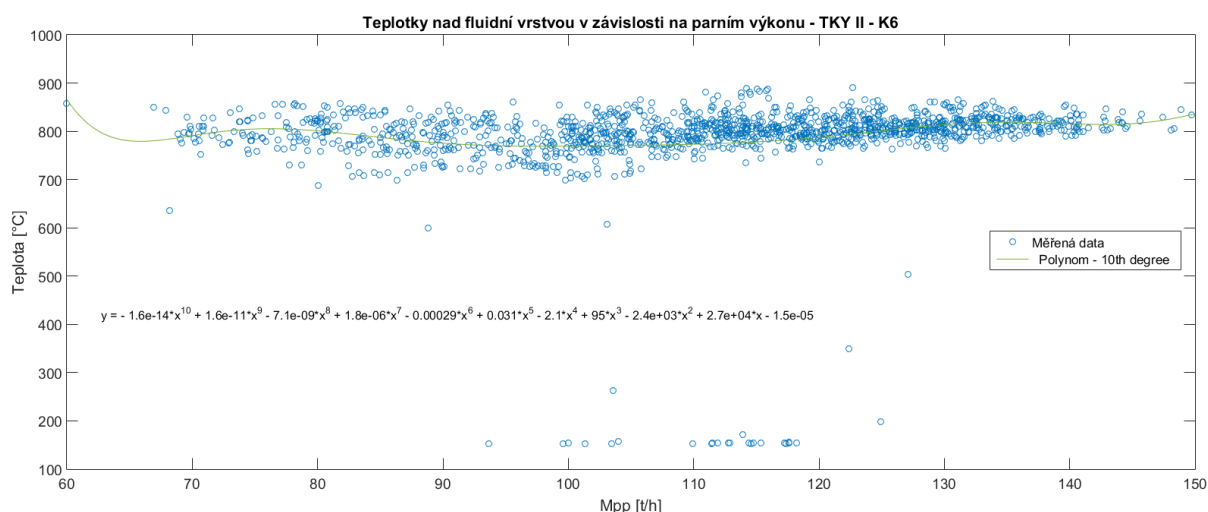
### 3.2.4 Určení vhodného místa pro umístění zařízení SNCR

Jako hlavním kritériem pro určení vhodné místa k umístění vstřikovacího zařízení je teplota spalin. V následující části budou porovnávány naměřené teploty v oblasti nad fluidní vrstvou s teplotami na konci ohniště a ve spalovací komoře. Dále budou provedeny výpočty citlivosti změn teplot na konci ohniště při změně vybraných provozních parametrů, které by mohly mít dopad na zhoršení či zlepšení teplotních podmínek v dané oblasti.

Teploty naměřené v oblasti nad fluidní vrstvou jsou měřeny skupinou termočlánků. Tyto teploty jsou dále zpracovány a pro účely této práce je používán jejich průměr. Teploty na konci ohniště budou vypočteny pomocí tepelné bilance výparníku, jelikož veškeré plochy výparníku a jenom výparníku se nacházejí ve spalovací komoře viz. kapitola 2.2 Popis kotle. Tyto teploty jsou nezbytné pro ověření možnosti instalace vstřikovacích zařízení.

#### 3.2.4.1 Teploty naměřené v oblasti nad fluidní vrstvou

V následujícím grafu na viz. obr.3-7, je vynesena průběh teplot nad fluidní vrstvou. Teploty, které budou používány dále jsou výsledkem interpolace polynomem desátého stupně. Tyto teploty jsou střední a tudíž dále budou používány pro výpočet účinností v jednotlivých výkonových úrovních. Teploty používané pro výpočty byly použity v rozsahu od 70t/h až do 148t/h. Tento rozsah byl vybrán z důvodů zachování přesnosti interpolace vzhledem k množství dostupných naměřených dat teplot nad fluidní vrstvou a to především v krajních oblastech výkonového rozsahu.



Obrázek 3-7 Teploty naměřené v nad fluidní vrstvou (12)

### 3.3 Výpočet teplot na konci ohniště

Výpočty teplot na konci ohniště jsou provedeny pomocí tepelné bilance výparníku. K vypočtení změn teplot na konci ohniště je potřeba stechiometrických výpočtů, účinnosti kotle a množství paliva. Tyto výpočty jsou demonstrovány pro kotel K6 a kotel K5. Výpočty pro veškeré výkonové hladiny, jak u kotle K5 či K6 budou zaneseny do souhrnných tabulek a grafů pro přehlednost.

#### 3.3.1.1 Výpočty pro kotel K6

##### 3.3.1.1.1 Stechiometrické výpočty (14)

Výpočet daných hodnot je vztažen na 1 kg spáleného tuhého paliva za normálních podmínek, čili při teplotě 0°C, tlaku 101,325 kPa a ref. obsahu O<sub>2</sub> = 6 %.

Tabulka 3-2 Složení paliva pro výpočet teplot na konci ohniště

Složení paliva: Hnědé uhlí; Q <sub>i</sub> <sup>r</sup> = 12 290kJ/kg							
W <sup>r</sup> [%]	A <sup>r</sup> [%]	C <sup>r</sup> [%]	H <sub>2</sub> <sup>r</sup> [%]	N <sub>2</sub> <sup>r</sup> [%]	S <sup>r</sup> [%]	O <sub>2</sub> <sup>r</sup> [%]	Σ [%]
25,27%	23,15%	36,29%	3,05%	0,39%	1,21%	10,64%	100%

#### Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1kg paliva

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

$$V_{O_2 \min} = \frac{22,39}{0,2095} \left[ \frac{0,3629}{12,011} + \frac{0,0305}{4,032} + \frac{0,0121}{32,066} - \frac{0,1064}{32,00} \right]$$

$$V_{O_2 \min} = 0,78 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### Minimální objem suchého vzduchu potřebný dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VS \min} = \frac{V_{O_2 \min}}{0,2095}$$

$$V_{VS \min} = \frac{0,78}{0,2095}$$

$$V_{VS \min} = 3,71 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

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

$$V_{vv \min} = \chi_v \cdot V_{vs \min}$$

$$V_{vv \min} = 1,016 \cdot 3,71$$

$$V_{vv \min} = 3,77 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\chi_v = 1,016$$

### Objem vodní páry v tomto objemu

$$V_{H_2O}^v = V_{vv \min} - V_{vs \min}$$

$$V_{H_2O}^v = 3,77 - 3,71$$

$$V_{H_2O}^v = 0,06 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Minimální objem suchých spalín při dokonalém spálení 1kg paliva

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

$$V_{ss \min} = 0,67 + 0,008 + 2,902 + 2,902$$

$$V_{ss \min} = 3,62 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Objemy jednotlivých složek spalín

#### Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,0363 + 0,0003 \cdot 3,71$$

$$V_{CO_2} = 0,67 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,012$$

$$V_{SO_2} = 0,008 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### Objem dusíku

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot 0,004 + 0,7805 \cdot 3,71$$

$$V_{N_2} = 2,902 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### Objem argonu

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VS \min}$$

$$V_{Ar} = 2,902 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} H^r + \frac{22,4}{18,016} W^r + V_{H_2O}^v$$

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} 0,031 + \frac{22,4}{18,016} 0,253 + 0,06$$

$$V_{H_2O}^S = 0,71 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Minimální objem vlhkých spalin

$$V_{SV \text{ min}} = V_{SS \text{ min}} + V_{H_2O}^S$$

$$V_{SV \text{ min}} = 3,62 + 0,71$$

$$V_{SV \text{ min}} = 4,33 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Objem spalin z 1kg paliva

$$V_{SV} = V_{SV \text{ min}} + (\alpha_{ok} - 1) V_{VV \text{ min}}$$

$$V_{SV} = 4,33 + (1,1 - 1)$$

$$V_{SV} = 4,71 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\alpha_{ok} = 1,1$$

### Entalpie vzduchu a spalin

Následující výpočet pro  $t=25^\circ\text{C}$  je předlohou pro výsledky v tab.3.8

$$I_{VZ \text{ min}} = O_{VS \text{ min}} \cdot i'_{VS} + V_{H_2O}^v \cdot i'_{H_2O}$$

$$I_{VZ \text{ min}} = 3,71 \cdot 32,57 + 0,06 \cdot 39,1$$

$$\underline{I_{VZ \text{ min}} = 123 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$I_{SP \text{ min}} = O_{CO_2} \cdot i'_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i'_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i'_{N_2} + O_{Ar} \cdot i'_{Ar} + Ar \cdot i'_{pop} \cdot a_{\dot{u}} + O_{H_2O} \cdot i'_{H_2O}$$

$$I_{SP \text{ min}} = 0,674 \cdot 41,62 + 0,008 \cdot 46,81 + 2,902 \cdot 32,53 + 0,034 \cdot 23,32 + 0,232 \cdot 20,20,4 + 0,71 \cdot 39,1$$

$$I_{SP \text{ min}} = \underline{153,35 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$I_{SP} = I_{SP \text{ min}} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot I_{VZ \text{ min}}$$

$$I_{SP} = 153 + (1,1 - 1) \cdot 123$$

$$\underline{I_{SP} = 165,68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Entalpie spali při přebytku vzduchu  $\alpha_{ok} = 1,1$  jsou uvedeny v tab.3.8 .

Tabulka 3-3 Výpočet entalpie spalín a suchého vzduchu v závislosti na teplotě při přebytku vzduchu  $\alpha=1,1$

$I_{sp}$ [kJ/kg]	$I_{vz\ min}$ [kJ/kg]	$I_{sp\ min}$ [kJ/kg]	T [°C]	$i_{CO_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{SO_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{N_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{Ar}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{H_2O}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{vs}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{CO}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{O_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{pop}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$a_{úlet}$ [%]
0,00	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40%
165,68	123	153	25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57	32,49	32,78	20,2	40%
659,86	500	610	100	170,0	191,2	129,5	93,1	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4	40%
1338,03	1007	1237	200	357,5	394,1	259,9	186,0	304,5	266,2	261,4	267,0	170,0	40%
2035,34	1522	1883	300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395,0	406,8	264,6	40%
2752,40	2049	2547	400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6	40%
3488,91	2588	3230	500	994,4	1070,0	664,0	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5	40%
4244,10	3139	3930	600	1225,0	1210,0	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558,0	40%
5018,65	3701	4649	700	1462,0	1554,0	947,3	650,2	1149,0	978,1	960,4	1003,0	658,3	40%
5809,55	4272	5382	800	1705,0	1801,0	1093,0	743,1	1335,0	1129,0	1109,0	1159,0	760,8	40%
6615,05	4856	6129	900	1952,0	2052,0	1241,0	835,7	1526,0	1283,0	1260,0	1218,0	868,4	40%
7437,64	5447	6893	1000	2203,0	2304,0	1392,0	928,2	1723,0	1439,0	1413,0	1477,0	982,8	40%
8289,00	6045	7684	1100	2485,0	2540,0	1544,0	1020,0	1925,0	1597,0	1567,0	1638,0	1106,0	40%
9117,08	6648	8452	1200	2716,0	2803,0	1698,0	1114,0	2132,0	1756,0	1723,0	1802,0	1240,0	40%
9972,61	7255	9247	1300	2976,0	3063,0	1853,0	1207,0	2344,0	1916,0	1881,0	1965,0	1386,0	40%
10836,61	7866	10050	1400	3239,0	3323,0	2009,0	1300,0	2559,0	2077,0	2040,0	2129,0	1543,0	40%
11709,48	8484	10861	1500	3503,0	3587,0	2166,0	1393,0	2779,0	2240,0	2199,0	2293,0	1710,0	40%
12611,69	9103	11701	1600	3769,0	3838,0	2325,0	1577,0	3002,0	2403,0	2359,0	2465,0	2061,0	40%
14385,00	10352	13350	1800	4305,0	4363,0	2643,0	1742,0	3458,0	2732,0	2682,0	2804,0	2381,0	40%
20412,31	14823	18930	2000	6204,0	6205,0	3778,0	2321,0	5132,0	3909,0	3830,0	4006,0	-	40%

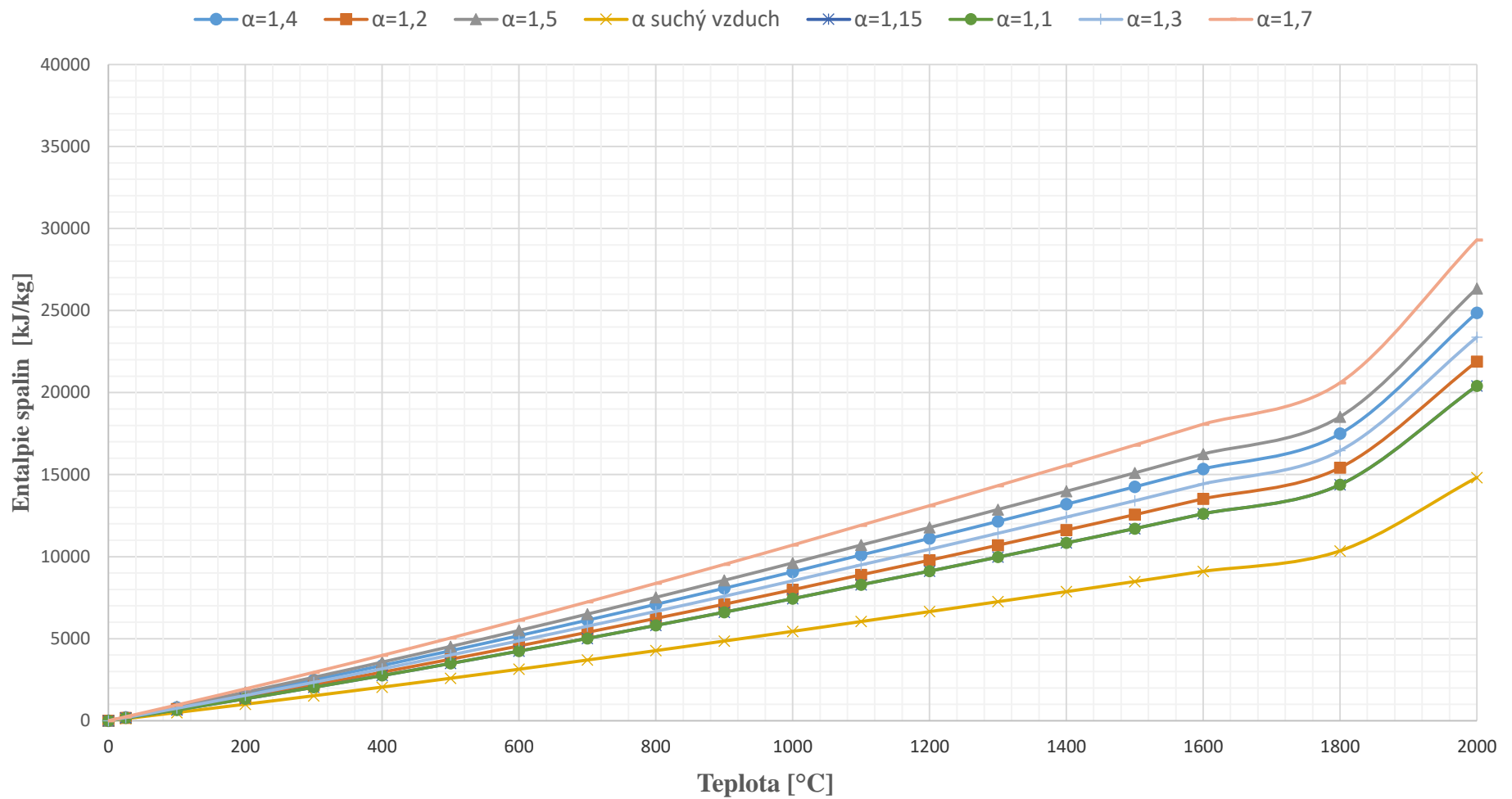
## Možnosti redukce NOx teplotna Komořany

V následující tabulce tab.3.9 jsou uvedeny hodnoty entalpií spalin v závislosti na změně přebytku vzduchu.

Tabulka 3-4 Výpočet entalpie spalin v závislosti na vybraných přebytcích vzduchu

T [°C]	I <sub>vz min</sub> [kJ/kg]	I <sub>sp min</sub> [kJ/kg]	I <sub>sp</sub> [kJ/kg]							
			$\alpha_{ok}$							
			1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	123	153	166	166	178	190	203	215	227	240
100	500	610	660	660	710	760	810	860	910	960
200	1007	1237	1338	1338	1439	1539	1640	1741	1841	1942
300	1522	1883	2035	2035	2188	2340	2492	2644	2797	2949
400	2049	2547	2752	2752	2957	3162	3367	3572	3777	3982
500	2588	3230	3489	3489	3748	4006	4265	4524	4783	5042
600	3139	3930	4244	4244	4558	4872	5186	5500	5813	6127
700	3701	4649	5019	5019	5389	5759	6129	6499	6869	7239
800	4272	5382	5810	5810	6237	6664	7091	7518	7946	8373
900	4856	6129	6615	6615	7101	7586	8072	8557	9043	9528
1000	5447	6893	7438	7438	7982	8527	9072	9616	10161	10706
1100	6045	7684	8289	8289	8894	9498	10103	10707	11312	11916
1200	6648	8452	9117	9117	9782	10447	11112	11776	12441	13106
1300	7255	9247	9973	9973	10698	11424	12149	12875	13600	14326
1400	7866	10050	10837	10837	11623	12410	13196	13983	14770	15556
1500	8484	10861	11709	11709	12558	13406	14255	15103	15952	16800
1600	9103	11701	12612	12612	13522	14432	15343	16253	17163	18073
1800	10352	13350	14385	14385	15420	16455	17491	18526	19561	20596
2000	14823	18930	20412	20412	21895	23377	24859	26341	27824	29306

### Entalpie spalin - Hnědé uhlí, $Q_i = 12\,290$ kJ/kg



Obrázek 3-8  $Q-t$  spalin pro vybrané přebytky vzduchu

### 3.3.1.1.2 Tepelná bilance kotel K6

#### 3.3.1.1.2.1 Parametry primárního, přisávaného vzduchu a spalin (12)

Teplota studeného vzduchu	$t_{vzs} = 25 \text{ °C}$
Entalpie studeného vzduchu	$I_{vzs} = 122 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota přisávaného vzduchu	$t_{vf} = 25 \text{ °C}$
Entalpie přisávaného vzduchu	$I_{vf} = 122 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota vzduchu před OVZ	$t_{vz1} = 53 \text{ °C}$
Entalpie vzduchu před OVZ	$I_{vz1} = 262 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota vzduchu za OVZ	$t_{vz2} = 188 \text{ °C}$
Entalpie vzduchu za OVZ	$I_{vz2} = 947 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota spalin na výstupu z kotle	$t_{sp} = 140 \text{ °C}$
Entalpie spalin na výstupu z kotle ( $\alpha_{ok} = 1,1$ )	$I_{sp} = 931 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Fyzické teplo paliva	
Teplota paliva	$t_{pv} = 20 \text{ °C}$

Měrné teplo paliva

$$c_{pv} = 4,19 W^r + c_{su} \cdot (I - W^r)$$

$$c_{pv} = 4,19 \cdot 0,2527 + 1,13 \cdot (1 - 0,2527)$$

$$c_{pv} = 1,903 \text{ kJ.kg}^{-1}K^{-1}$$

Měrné teplo sušiny paliva

- Hnědé uhlí  $c_{su} = 1,13 \text{ kJ.kg}^{-1}K^{-1}$

Entalpie paliva

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv}$$

$$i_{pv} = 1,903 \cdot 293,15$$

$$i_{pv} = 557,9 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

**Entalpie  $i_{pv}$  je uvažována, pokud je splněno:**

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$$W^r \geq \frac{12290}{4,19} \cdot \frac{1}{150} = 19,66\%$$

$$25,27\% \geq 19,66\%$$

Podmínka splněna, entalpie paliva bude uvažována do tepelné bilance kotle.



### Entalpie recirkulovaných spalin

Recirkulace znamená návrat části spalin zpět do ohniště. Spaliny jsou odebírány za spalinovým ventilátorem o teplotě 140 °C. Odebírané množství je 15% což se rovná koeficientu recirkulace  $r=0,15$ .

$$I_{SPrec} = I_{SP} \cdot r$$

$$I_{SPrec} = 931 \cdot 0,15$$

$$I_{SPrec} = 139,65 \text{ kJ/kg} = Q_{SPrec}$$

### Teplo přivedené ve vzduchu způsobené cizím zdrojem

$$Q_{vz} = \beta_{OVZ} \cdot I_{vz2} + (\Delta\alpha_o + \Delta\alpha_{ml}) \cdot I_{vf}$$

$$Q_{vz} = 0,96 \cdot 947 + (0,1 + 0,04) \cdot 122$$

$$Q_{vz} = \underline{\underline{926,2 \text{ kJ.kg}^{-1}}}$$

- Změna přísávání v ohniště  $\Delta\alpha_o = 0,1$
  - Změna přísávání v mlýnici  $\Delta\alpha_{ml} = 0,04$
  - Přebytek řízeného spalovacího vzduchu za OVZ
- $$\beta_{ok}'' = \alpha_{ok} - \Delta\alpha_o - \Delta\alpha_{ml} = 1,1 - 0,1 - 0,04 = 0,96$$
- $$\beta_{ok}'' = 0,96$$

### Teplo přivedené do kotle na 1kg tuhého paliva

$$Q_{i \text{ red}} = Q_r^i + i_{pv} + Q_{CZ} + Q_{SPrec}$$

$$Q_{i \text{ red}} = 12\,290 + 557,9 + 0 + 139,65$$

$$Q_{i \text{ red}} = 12\,988 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Teplo přivedené cizím zdrojem není uvažováno, jelikož na kotli K6, ani jiném z TKY, nejsou instalovány parní ohříváky vzduchu.

### 3.3.1.1.2.2 Ztráty a tepelná účinnost kotle (14)

Při spalování paliv se obvykle uvažuje pět základních ztrát:

- Ztráta mechanickým nedopalem  $Z_C$
- Ztráta chemickým nedopalem  $Z_{CO}$
- Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí  $Z_{SV}$
- Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků  $Z_f$
- Ztráta citelným teplem spalin (komínová)  $Z_K$

#### Ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{C\check{s}} + Z_{C\acute{u}} + Z_{Cr}$$

$$Z_C = 0,0035 + 0,0466 + 0,0003$$

$$\underline{Z_C = 0,472\%}$$

- Výhřevnost uhlíku  $Q_{ic} = 32\,600\text{ kJ.kg}^{-1}$

$$Z_{C\check{s}} = \frac{C_{\check{s}}}{1-C_{\check{s}}} \cdot X_{\check{s}} \cdot \frac{A^r}{Q_{i\text{red}}} \cdot Q_{ic}$$

$$Z_{C\check{s}} = \frac{0,01}{1-0,01} \cdot 0,6 \cdot \frac{0,2315}{12989} \cdot 32600$$

$$Z_{C\check{s}} = 0,0035\%$$

- Hořlavina ve škváře  $C_{\check{s}} = 1,0\%$
- Obsah popela ve škváře  $X_{\check{s}} = 60\%$

$$Z_{C\acute{u}} = \frac{C_{\acute{u}}}{1-C_{\acute{u}}} \cdot X_{\acute{u}} \cdot \frac{A^r}{Q_{i\text{red}}} \cdot Q_{ic}$$

$$Z_{C\acute{u}} = \frac{0,2}{1-0,2} \cdot 0,4 \cdot \frac{0,2315}{12989} \cdot 32600$$

$$Z_{C\acute{u}} = 0,0466\%$$

- Hořlavina ve úletu  $C_{\acute{u}} = 20\%$
- Obsah popela ve úletu  $X_{\acute{u}} = 40\%$

$$Z_{Cr} = \frac{C_r}{1-C_r} \cdot X_r \cdot \frac{A^r}{Q_{i\ red}} \cdot Q_{ic}$$

$$Z_{Cr} = \frac{0,01}{1-0,01} \cdot 0,05 \cdot \frac{0,2315}{12989} \cdot 32600$$

$$\underline{Z_{Cr} = 0,0003\%}$$

- Hořlavina v propadu  $C_r = 1,0 \%$
- Obsah popela v propadu  $X_r = 5 \%$

### Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = Z_{f\check{s}} + Z_{f\acute{u}}$$

$$Z_f = 0,0137 + 0,0028$$

$$\underline{Z_f = 0,0165\%}$$

$$Z_{f\check{s}} = \frac{X_{\check{s}}}{1-C_{\check{s}}} \cdot \frac{A^r}{Q_{i\ red}} \cdot c_{\check{s}} \cdot t_{\check{s}}$$

$$Z_{f\check{s}} = \frac{0,6}{1-0,01} \cdot \frac{0,2527}{12989} \cdot 1,14.433,15$$

$$Z_{f\check{s}} = 0,0137\%$$

- Měrné teplo škváry  $c_{\check{s}} = 1,14 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Teplota škváry  $t_{\check{s}} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Z_{f\acute{u}} = \frac{X_{\acute{u}}}{1-C_{\acute{u}}} \cdot \frac{A^r}{Q_{i\ red}} \cdot c_{\acute{u}} \cdot t_{\acute{u}}$$

$$Z_{f\acute{u}} = \frac{0,4}{1-0,2} \cdot \frac{0,2527}{12\ 989} \cdot 0,9039.1123,15$$

$$Z_{f\acute{u}} = 0,0028\%$$

- Měrné teplo úletu  $c_{\acute{u}} = 0,9039 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Teplota úletu  $t_{\acute{u}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$

**Ztráta chemickým nedopalem**

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot \dot{Q}_{SSmin}}{(21 - O_{2ref}) \cdot \dot{Q}_{ired}}$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 3,62}{(21 - 0,06) \cdot 12989}$$

$$Z_{CO} = 0,098\%$$

**Ztráta sdílením tepla do okolí**

Ztráta sáláním tepla do okolí sáláním a vedením se určuje podle závislosti výkonu kotle a druhu nátěru oplechování. Je volena na základě firemní dokumentace výrobce [22].

$$Z_{SO} = 0,8\%$$

**Ztráta citelným teplem spalin (komínová)**

$$Z_K = (1 - Z_C) \frac{I_S^{tk, \alpha ok} - I_S^{tvz, \alpha ok}}{\dot{Q}_{ired}}$$

$$Z_K = (1 - 0,00472) \frac{931 - 165,68}{12988}$$

$$Z_K = 5,865\%$$

**Tepelná účinnost kotle K6**

$$\eta_K = 100 - \sum Z = 100 - (Z_C + Z_{CO} + Z_{SO} + Z_f + Z_K)$$

$$\eta_K = 100 - (0,472 + 0,098 + 0,8 + 0,0165 + 5,865)$$

$$\eta_K = 92,847\%$$

**Teplota nechlazeného plamene**

$$Q_u = \dot{Q}_{ired} \cdot (1 - Z_C + Z_{CO} + Z_f) + Q_{VZ} - Q_{CZ} + Q_{SPrec} +$$

$$Q_u = 12988 \cdot (1 - 0,472 + 0,098 + 0,0165) + 926,2 - 0 + 139,65$$

$$Q_u = 13977,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

### Parametry páry a vody pro kotel K6

Teplota napájecí vody	$t_{nv} = 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak napájecí vody	$p_{nv} = 11,55 \text{ MPa}$
Entalpie studeného vzduchu	$i_{nv} = 725,2 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota vody z ekonomizéru	$t''_{EKO} = 193 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak vody z ekonomizéru	$p''_{EKO} = 8,5 \text{ MPa}$
Entalpie vody z ekonomizéru	$i''_{EKO} = 810,95 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota bubnové vody	$t'_w = 295 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak bubnové vody	$p'_w = 8,07 \text{ MPa}$
Entalpie bubnové vody	$i'_w = 1316,96 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota bubnové páry	$t''_p = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak bubnové páry	$p''_p = 8,07 \text{ MPa}$
Entalpie bubnové páry	$i''_p = 2831,85 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota přehřáté páry	$t_{pp} = 490 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak přehřáté páry	$p_{pp} = 7,5 \text{ MPa}$
Entalpie přehřáté páry	$i_{pp} = 3380,76 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Množství produkované ostré páry	$M_{pp} = 110 \text{ t.h}^{-1} = 30,6 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství 110 t/h bylo záměrně vybráno, aby mohlo být demonstrováno srovnání výsledků tepelné bilance obou kotlů. (12)

### Teplota nechlazeného plamene

$$Q_v = M_{pp} (i_{pp} - i_{nv}) + M_o (i'_w - i_{nv})$$

$$Q_v = 30,6 (3380,76 - 725,2) + 4 \cdot (1316,96 - 725,2)$$

$$\underline{Q_v = 83\,509,6 \text{ kJ.kg}^{-1}}$$

Množství odluhované vody z bubnu

$$M_o = 14,4 \text{ t.h}^{-1} = 4 \text{ kg.s}^{-1}$$

### Množství paliva

$$M_{\text{pal}} = \frac{Q_v}{Q_{i \text{ red}} \cdot \eta_K}$$

$$M_{\text{pal}} = \frac{83\,509,6}{12988 \cdot 0,92847}$$

$$M_{\text{pal}} = 6,925 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

#### 3.3.1.1.2.3 Množství skutečně spáleného paliva

$$M_{\text{pv}} = M_{\text{pal}} \cdot (1 - Z_C)$$

$$M_{\text{pv}} = 6,925 \cdot (1 - 0,00472)$$

$$M_{\text{pv}} = 6,893 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 3.3.1.2 Výpočty pro kotel K5

Výpočty pro kotel K5 jsou podobné a tudíž budou identické hodnoty pouze znázorněny a hlouběji nastíněny výpočtem veličiny, na které má vliv změna přebytku vzduchu na konci ohniště, či nepřítomnost recirkulace. Pro kotel K5 bylo použito shodné palivo.

Kotel K5 je bez recirkulace, tudíž přebytek vzduchu na konci ohniště činí  $\alpha_{ok} = 1,3$ .

#### 3.3.1.2.1.1 Stechiometrické výpočty

##### Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{O_2 \min} = 0,78 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

##### Minimální objem suchého vzduchu potřebný dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VS \min} = 3,71 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

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

$$V_{vv \min} = 3,77 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\chi_v = 1,016$$

##### Objem vodní páry v tomto objemu

$$V_{H_2O}^v = 0,06 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

##### Minimální objem suchých spalín při dokonalém spálení 1kg paliva

$$V_{ss \min} = 3,62 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

##### Objemy jednotlivých složek spalín

##### Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = 0,67 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

##### Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = 0,008 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

##### Objem dusíku

$$V_{N_2} = 2,902 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

##### Objem argonu

$$V_{Ar} = 2,902 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

$$V_{H_2O}^S = 0,71 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Minimální objem vlhkých spalin

$$V_{SV \min} = 4,33 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Objem spalin z 1kg paliva

$$V_{SV} = V_{SV \min} + (\alpha_{ok} - 1) V_{VV \min}$$

$$V_{SV} = 4,33 + (1,3 - 1)$$

$$V_{SV} = 5,46 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\alpha_{ok} = 1,3$$

#### 3.3.1.2.2 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Následující výpočet pro  $t=25^\circ\text{C}$  je předlohou pro výsledky v *tab.3.4*

$$\underline{I_{VZ \min} = 123 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\underline{I_{SP \min} = 153,35 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$I_{SP} = I_{SP \min} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot I_{VZ \min}$$

$$I_{SP} = 153 + (1,3 - 1) \cdot 123$$

$$\underline{I_{SP} = 190,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Entalpie spali při přebytku vzduchu  $\alpha_{ok} = 1,3$  jsou uvedeny v *tab.3.10*.



Tabulka 3-5 Výpočet entalpie spalín a suchého vzduchu v závislosti na teplotě při přebytku vzduchu  $\alpha=1,3$

$I_{sp}$ [kJ/kg]	$I_{vz\ min}$ [kJ/kg]	$I_{sp\ min}$ [kJ/kg]	T [°C]	$i_{CO_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{SO_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{N_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{Ar}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{H_2O}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{vs}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{CO}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{O_2}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$i_{pop}$ [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	$a_{úlet}$ [%]
0,00	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40%
190,34	123	153	25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57	32,49	32,78	20,2	40%
759,92	500	610	100	170,0	191,2	129,5	93,1	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4	40%
1539,37	1007	1237	200	357,5	394,1	259,9	186,0	304,5	266,2	261,4	267,0	170,0	40%
2339,81	1522	1883	300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395,0	406,8	264,6	40%
3162,20	2049	2547	400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6	40%
4006,49	2588	3230	500	994,4	1070,0	664,0	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5	40%
4871,83	3139	3930	600	1225,0	1210,0	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558,0	40%
5758,82	3701	4649	700	1462,0	1554,0	947,3	650,2	1149,0	978,1	960,4	1003,0	658,3	40%
6664,01	4272	5382	800	1705,0	1801,0	1093,0	743,1	1335,0	1129,0	1109,0	1159,0	760,8	40%
7586,17	4856	6129	900	1952,0	2052,0	1241,0	835,7	1526,0	1283,0	1260,0	1218,0	868,4	40%
8526,97	5447	6893	1000	2203,0	2304,0	1392,0	928,2	1723,0	1439,0	1413,0	1477,0	982,8	40%
9498,10	6045	7684	1100	2485,0	2540,0	1544,0	1020,0	1925,0	1597,0	1567,0	1638,0	1106,0	40%
10446,74	6648	8452	1200	2716,0	2803,0	1698,0	1114,0	2132,0	1756,0	1723,0	1802,0	1240,0	40%
11423,64	7255	9247	1300	2976,0	3063,0	1853,0	1207,0	2344,0	1916,0	1881,0	1965,0	1386,0	40%
12409,78	7866	10050	1400	3239,0	3323,0	2009,0	1300,0	2559,0	2077,0	2040,0	2129,0	1543,0	40%
13406,33	8484	10861	1500	3503,0	3587,0	2166,0	1393,0	2779,0	2240,0	2199,0	2293,0	1710,0	40%
14432,27	9103	11701	1600	3769,0	3838,0	2325,0	1577,0	3002,0	2403,0	2359,0	2465,0	2061,0	40%
16455,37	10352	13350	1800	4305,0	4363,0	2643,0	1742,0	3458,0	2732,0	2682,0	2804,0	2381,0	40%
23376,83	14823	18930	2000	6204,0	6205,0	3778,0	2321,0	5132,0	3909,0	3830,0	4006,0		40%

### 3.3.1.2.3 Tepelná bilance kotel K6

#### Parametry primárního, přísávaného vzduchu a spalin (12)

Parametry vzduchu pro kotel K5 jsou shodné s parametry pro kotel K6 a jsou uvedeny v kapitole 3.3.1.1.2.1

Teplota spalin na výstupu z kotle

$$t_{sp} = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Entalpie spalin na výstupu z kotle ( $\alpha_{ok} = 1,3$ )

$$I_{sp} = 1073 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Fyzické teplo paliva

Teplota paliva

$$t_{pv} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Měrné teplo paliva

$$c_{pv} = 1,903 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Entalpie paliva

$$i_{pv} = 557,9 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Entalpie  $i_{pv}$  je uvažována, pokud je splněno:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$$W^r \geq \frac{12290}{4,19} \cdot \frac{1}{150} = 19,66\%$$

$$25,27\% \geq 19,66\%$$

Podmínka splněna, entalpie paliva bude uvažována do tepelné bilance kotle.

### Teplo přivedené ve vzduchu způsobené cizím zdrojem

$$Q_{vz} = \beta_{OVZ} \cdot I_{vz2} + (\Delta\alpha_o + \Delta\alpha_{ml}) \cdot I_{vf}$$

$$Q_{vz} = 1,16 \cdot 947 + (0,1 + 0,04) \cdot 122$$

$$\underline{Q_{vz} = 1115,6 \text{ kJ.kg}^{-1}}$$

- Změna přisávání v ohniště  $\Delta\alpha_o = 0,1$
- Změna přisávání v mlýnici  $\Delta\alpha_{ml} = 0,04$
- Přebytek řízeného spalovacího vzduchu za OVZ  
 $\beta_{ok}'' = \alpha_{ok} - \Delta\alpha_o - \Delta\alpha_{ml} = 1,3 - 0,1 - 0,04 = 0,96$   
 $\beta_{ok}'' = 1,16$

### Teplo přivedené do kotle na 1kg tuhého paliva

$$Q_{i \text{ red}} = Q_r^i + i_{pv} + Q_{CZ} + Q_{SPrec}$$

$$Q_{i \text{ red}} = 12\,290 + 557,9$$

$$Q_{i \text{ red}} = 12\,848 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

### Ztráty a tepelná účinnost kotle

#### Ztráta mechanickým nedopalem

$$\underline{Z_C = 0,472\%}$$

#### Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$\underline{Z_f = 0,0167\%}$$

#### Ztráta chemickým nedopalem

$$Z_{CO} = 0,098\%$$

#### Ztráta sdílením tepla do okolí

Ztráta sáláním tepla do okolí sáláním a vedením se určuje podle závislosti výkonu kotle a druhu nátěru oplechování. Je volena na základě firemní dokumentace výrobce [22].

$$Z_{SO} = 0,8\%$$

#### Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

$$Z_K = (1 - Z_C) \frac{I_S^{tk, \alpha_{ok}} - I_S^{tvz, \alpha_{ok}}}{Q_{i red}}$$
$$Z_K = (1 - 0,00472) \frac{1073 - 190,34}{12\,988}$$
$$Z_K = 6,839\%$$

### Tepelná účinnost kotle K6

$$\eta_K = 100 - \sum Z = 100 - (Z_C + Z_{CO} + Z_{SO} + Z_f + Z_K)$$
$$\eta_K = 100 - (0,472 + 0,098 + 0,8 + 0,0167 + 6,839)$$
$$\eta_K = 91,872\%$$

#### 3.3.1.2.3.1 Teplota nechlazeného plamene

$$Q_u = Q_{i red} \cdot (1 - Z_C + Z_{CO} + Z_f) + Q_{VZ} - Q_{CZ} + Q_{SPrec} +$$
$$Q_u = 12\,988 \cdot (1 - 0,472 + 0,098 + 0,0167) + 1115,6$$
$$\underline{Q_u = 13\,888 \text{ kJ.kg}^{-1}}$$

### Parametry páry a vody pro kotel K6

Teplota napájecí vody	$t_{nv} = 170 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak napájecí vody	$p_{nv} = 11,55 \text{ MPa}$
Entalpie studeného vzduchu	$i_{nv} = 725,2 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota vody z ekonomizéru	$t''_{EKO} = 193 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak vody z ekonomizéru	$p''_{EKO} = 8,5 \text{ MPa}$
Entalpie vody z ekonomizéru	$i''_{EKO} = 810,95 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota bubnové vody	$t'_w = 295 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak bubnové vody	$p'_w = 8,07 \text{ MPa}$
Entalpie bubnové vody	$i'_w = 1316,96 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota bubnové páry	$t''_p = 310 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak bubnové páry	$p''_p = 8,07 \text{ MPa}$
Entalpie bubnové páry	$i''_p = 2831,85 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Teplota přehřáté páry	$t_{pp} = 490 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak přehřáté páry	$p_{pp} = 7,5 \text{ MPa}$
Entalpie přehřáté páry	$i_{pp} = 3380,76 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Množství produkované ostré páry	$M_{pp} = 110 \text{ t.h}^{-1} = 30,6 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství 110 t/h bylo záměrně vybráno, aby mohlo být demonstrováno srovnání výsledků tepelné bilance obou kotlů. (12)

### Teplota nechlazeného plamene

$$Q_v = M_{pp} (i_{pp} - i_{nv}) + M_o (i'_w - i_{nv})$$

$$Q_v = 30,6 (3380,76 - 725,2) + 4 \cdot (1316,96 - 725,2)$$

$$\underline{Q_v = 83\,509,6 \text{ kJ.kg}^{-1}}$$

Množství odluhované vody z bubnu

$$M_o = 14,4 \text{ t.h}^{-1} = 4 \text{ kg.s}^{-1}$$

### Množství paliva

$$M_{\text{pal}} = \frac{Q_v}{Q_{i \text{ red}} \cdot \eta_K}$$

$$M_{\text{pal}} = \frac{83\,509,6}{12848 \cdot 0,91872}$$

$$M_{\text{pal}} = 7,075 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Množství skutečně spáleného paliva

$$M_{\text{pv}} = M_{\text{pal}} \cdot (1 - Z_C)$$

$$M_{\text{pv}} = 7,075 \cdot (1 - 0,00472)$$

$$M_{\text{pv}} = 7,042 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 3.3.1.2.4 Výpočet středních teplot na konci ohniště

Výpočet teplot na konci ohniště budeme počítat z bilance výparníku. Tento stav je možno počítat, jelikož veškeré plochy výparníku se nacházejí výhradně. Tyto teploty jsou počítány za předpokladu neměnicí se hladiny fluidní vrstvy v závislosti na výkonu.

#### Rovnice pro bilanci výparníku

$$M_{pv} \cdot \Delta I_s = (M_{pp} - M_v) \cdot (i''_p - i''_{EKO}) + M_o \cdot (i'_w - i''_{EKO}) + Q_{ods} - Q_{vk} + Q_p + M_{pv} \cdot Q_{ired} \cdot Z_{osv} \quad (14)$$

Pro naše potřeby bude klíčové získat  $\Delta I_s$  pro všechny vybrané výkonové hladiny, za účelem zjištění entalpie spalin na konci ohniště. Jelikož není v ohništi nainstalovaný žádný sálavý přehřívák, tak můžeme přebytek tepla  $Q_p$  zanedbat. Dále není žádná část výparníku nainstalována nikde mimo ohniště, tudíž můžeme teplo  $Q_{vk}$  zanedbat. Dále zanedbáváme teplo odsávané z ohniště výstupním průřezem z důvodu již tak nízkých teplot ve fluidní vrstvě, které dle očekávání směrem k místu výstupu z ohniště klesají.

Ztráta sáláním výparníku do okolí výparníku je uvedena výrobcem kotle a to v plném výkonovém rozsahu, ve kterém byly počítány teploty na konci ohniště. Potom výsledná rovnice pro výpočet změny entalpie spalin je následující.

#### 3.3.1.2.4.1 Rovnice pro výpočet změny entalpie spalin ve výparníku por kotel K6

$$\Delta I_s = (M_{pv})^{-1} \cdot [(M_{pp} - M_v) \cdot (i''_p - i''_{EKO}) + M_o \cdot (i'_w - i''_{EKO}) + M_{pv} \cdot Q_{ired} \cdot Z_{so}]$$

$$\text{Výpočet pro parní výkon } M_{pp} = 110 \text{ t.h}^{-1} = 30,6 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\text{Množství vstříku při výkonu } 110 \text{ t.h}^{-1} - M_v = 2,77 \text{ t.h}^{-1} = 0,77 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\text{Množství vstříku při výkonu } 110 \text{ t.h}^{-1} - M_o = 4 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\Delta I_{sK6} = (6,893)^{-1} \cdot [(30,6 - 0,77) \cdot (2831,9 - 824,2) + 4 \cdot (1316,96 - 824,2) + 6,893 \cdot 12988 \cdot 0,00563]$$

$$\Delta I_{sK6} = 9034,6 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Delta I_{okK6} = Q_{uK6} - \Delta I_{sK6}$$

$$\Delta I_{okK6} = 13\,977 - 9034,6$$

$$\Delta I_{okK6} = 4942,4 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Teplotu na konci ohniště lze odečíst z I-t diagramu pro  $\alpha_{ok} = 1,15 \gg t_{ok} = 691^\circ\text{C}$

**3.3.1.2.4.2 Rovnice pro výpočet změny entalpie spalin ve výparníku por kotel K5**

$$\Delta I_s = (M_{pv})^{-1} \cdot [(M_{pp} - M_v) \cdot (i''_p - i''_{EKO}) + M_o \cdot (i'_w - i''_{EKO}) + M_{pv} \cdot Q_{ired} \cdot Z'_{so}]$$

$$\text{Výpočet pro parní výkon } M_{pp} = 110 \text{ t.h}^{-1} = 30,6 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\text{Množství vstříku při výkonu } 110 \text{ t.h}^{-1} - M_v = 1,33 \text{ t.h}^{-1} = 0,37 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\text{Množství vstříku při výkonu } 110 \text{ t.h}^{-1} - M_o = 4 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\Delta I_{sK5} = (7,156)^{-1} \cdot [(30,6 - 0,37) \cdot (2831,9 - 824,2) + 4 \cdot (1316,96 - 824,2) + 7,156 \cdot 12848 \cdot 0,00563]$$

$$\Delta I_{sK5} = 8799 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Delta I_{okK5} = Q_{uK5} - \Delta I_{sK5}$$

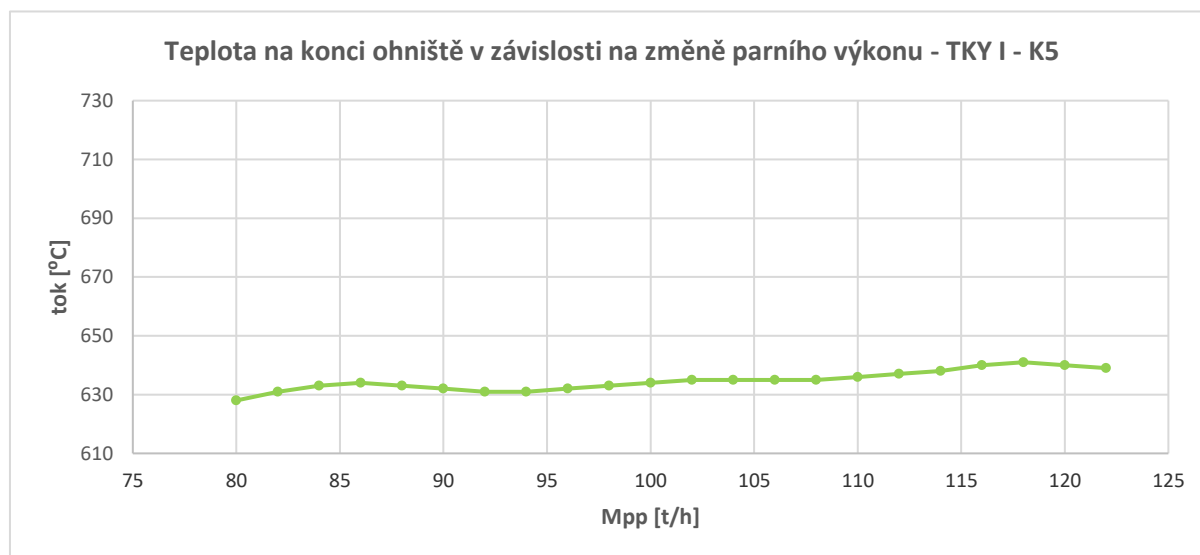
$$\Delta I_{okK5} = 13\,888 - 8798,6$$

$$\Delta I_{okK5} = 5089,4 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Teplotu na konci ohniště lze odečíst z I-t diagramu pro  $\alpha_{ok} = 1,3 \gg t_{ok} = 636 \text{ }^\circ\text{C}$

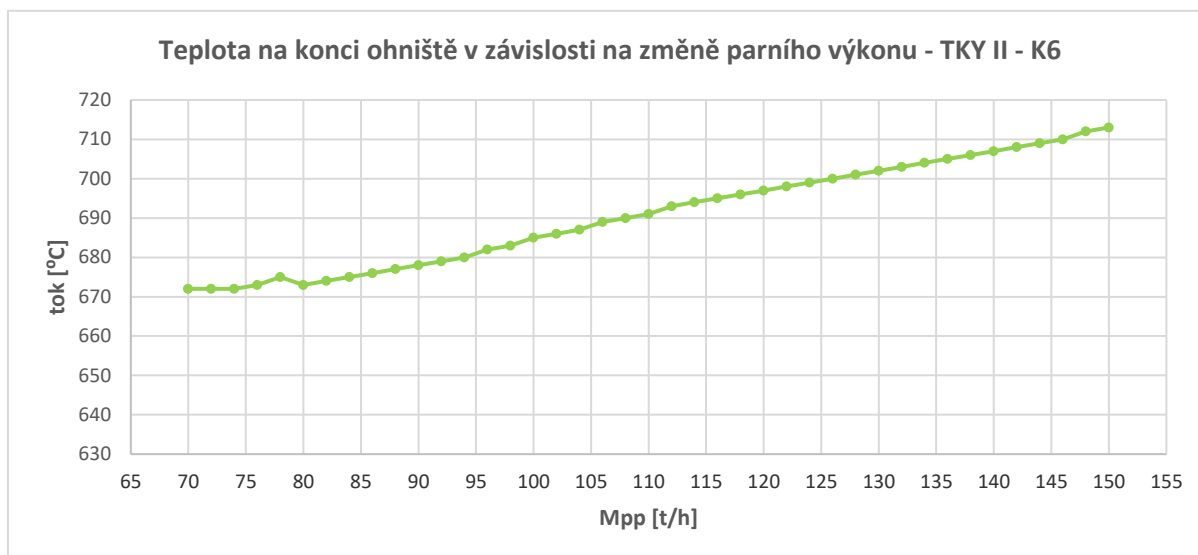
Tyto výpočty teploty byly provedeny pro oba kotle a to v plném rozsahu výkonu každého kotle. Pro kotel K5 tento rozsah byl vybrán od  $80 \text{ t.h}^{-1}$  po  $2 \text{ t.h}^{-1}$  až do  $122 \text{ t.h}^{-1}$ . Pro kotel K6 tento rozsah byl vybrán od  $70 \text{ t.h}^{-1}$  po  $2 \text{ t.h}^{-1}$  až do  $150 \text{ t.h}^{-1}$ . Množství vstříku je závislé na parním výkonu, což je znázorněno na *obr.5-1* pro kotel K5 a na *obr.5-2* pro kotel K6.

Veškeré výsledky byly zpracovány a znázorněny na *obr.3-9* pro kotel K5 a na *obr.3-10* pro kotel K6.



Obrázek 3-9 Vypočtené teploty na konci ohniště v závislosti na parním výkonu pro kotel K5





Obrázek 3-10 Vypočtené teploty na konci ohniště v závislosti na parním výkonu pro kotel K6

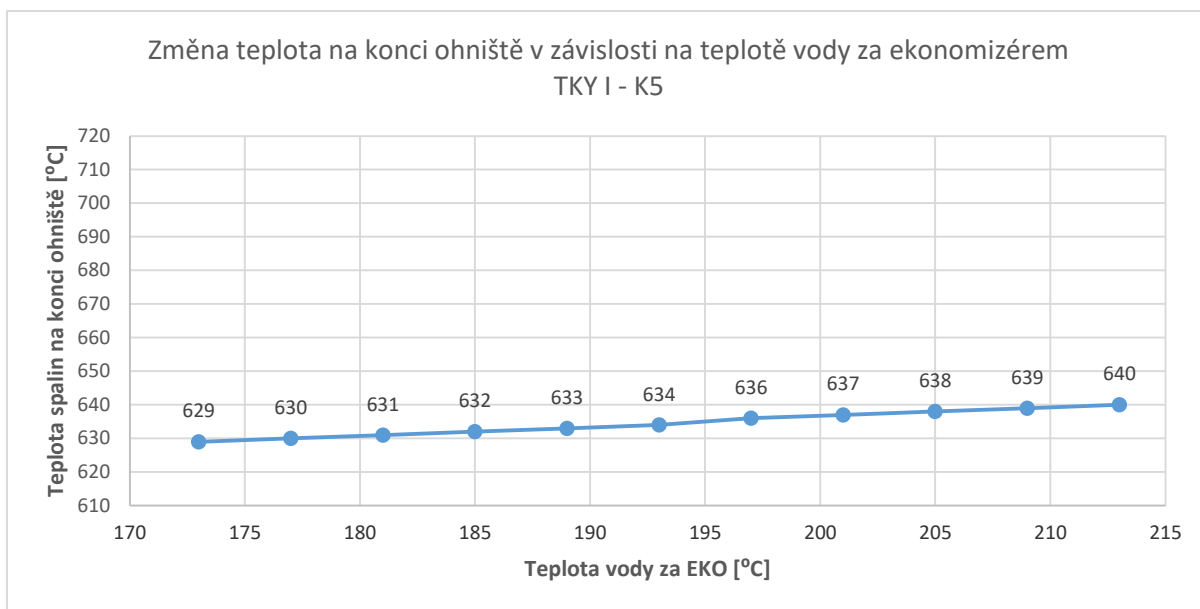
Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.5.1.1.1 pro funkční metodu SNCR jsme silně limitováni teplotním oknem, které je nutné dodržet pro správný chod a dostatečnou účinnost tohoto zařízení. Z grafů je na první pohled zřejmé, že teploty na konci ohniště se drží po celém výkonovém rozsahu výrazně pod 900°C i 875°C což je nevyhovující z hlediska instalace zařízení pro nástřik reagentu.

### 3.3.2 Citlivost teplot spalin

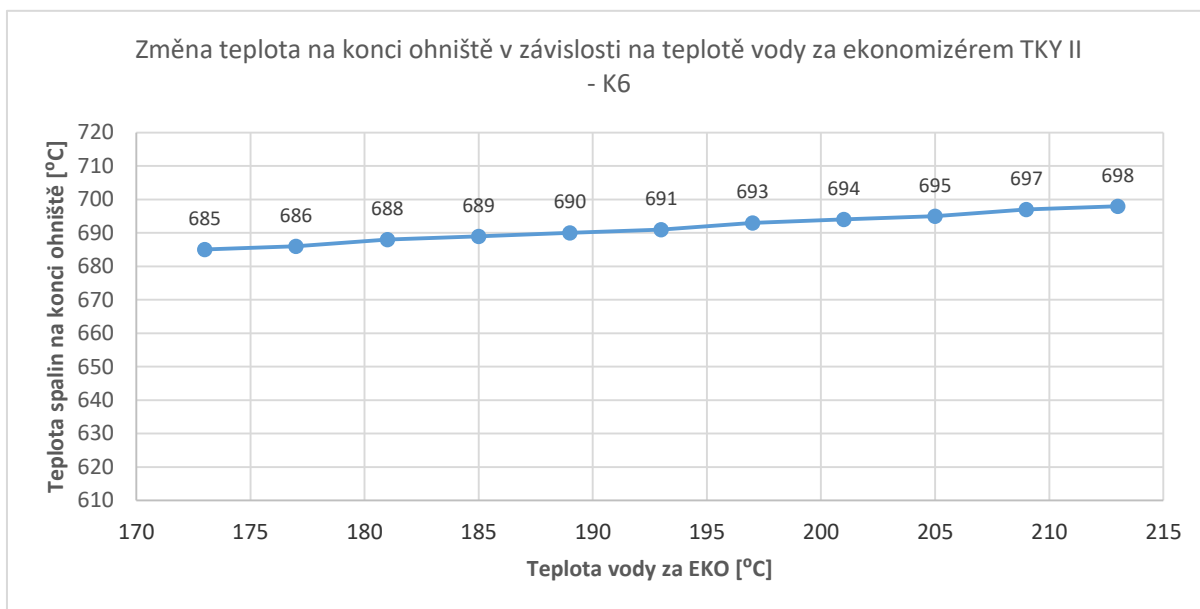
#### 3.3.2.1 Citlivost teplot spalin na změnu teploty na výstupu z ekonomizéru

Jelikož teploty vyskytující se na konci ohniště jsou pro aplikaci SNCR nedostačující a jejich hodnoty nejsou konstantní, lze se domnívat, že jejich hodnota se bude měnit např. se změnou vlastností vstupních médií, jako je například teploty vody přicházející do bubnu z ekonomizéru. Výpočet této citlivosti byl proveden pro rozsah teplot vody za EKO od 173 až do 213°C. Tento rozsah byl vybrán s rozptylem 20°C od standardní vody za ekonomizérem, která činí 193°C. Veškeré výsledky jsou zaneseny v grafech na *obr.3-11a* pro kotle K5 a na *obr.3-11b* pro kotel K6.

Možnosti redukce NOx teplárna Komořany



Obrázek 3-11a Citlivost teploty na konci ohniště v závislosti na změně teploty vody na EKO pro kotel K5



Tabulka 3-11b Citlivost teploty na konci ohniště v závislosti na změně teploty vody na EKO pro kotel K6

Jak vychází z grafů na obr.3-11a pro K5 a z obr.3-11b pro K6, je jasné, na teplotu na konci ohniště má i značná změna teploty vody za EKO minimální vliv. A tudíž nepředstavuje reálnou možnost pro zlepšení situace na konci ohniště, která by spěla k zlepšení teplotních podmínek a zpřístupnění konce ohniště pro aplikaci metody SNCR (výsledky výpočtu jsou zaneseny v tab. 9-1 a tab. 9-2).

**3.3.2.1.2 Citlivost teplot spalín na změnu složení paliva**

Další z citlivostních analýz byla provedena citlivost teploty na konci ohniště v závislosti na složení paliva, které má výrazný dopad na množství tepla přivedeného do ohniště a tudíž je třeba zjistit, zda by lepší palivo nemělo výraznější vliv na teploty na konci ohniště a nevedlo by k řešení situace. Citlivost byla provedena na čtyřech palivech, kde každé má jinou výhřevnost. Tato paliva byla vybrána z katalogu paliv dodaných TKY v měsíci listopadu 2016 a tudíž reprezentují reálně dostupné položky.

Tabulka 3-6 Složení paliva P1

Složení paliva P1 : Hnědé uhlí; $Q_i^r = 10\,494\text{kJ/kg}$							
$W^r$ [%]	$A^r$ [%]	$C^r$ [%]	$H_2^r$ [%]	$N_2^r$ [%]	$S^r$ [%]	$O_2^r$ [%]	$\Sigma$ [%]
24,34%	26,71%	28,38%	4,13%	2,2%	0,6%	13,64%	100%

Tabulka 3-7 Složení paliva P2

Složení paliva P2 : Hnědé uhlí; $Q_i^r = 11\,471\text{kJ/kg}$							
$W^r$ [%]	$A^r$ [%]	$C^r$ [%]	$H_2^r$ [%]	$N_2^r$ [%]	$S^r$ [%]	$O_2^r$ [%]	$\Sigma$ [%]
25,34%	29,83%	31,22%	3,03%	0,41%	0,66%	9,51%	100%

Tabulka 3-8 Složení paliva P3

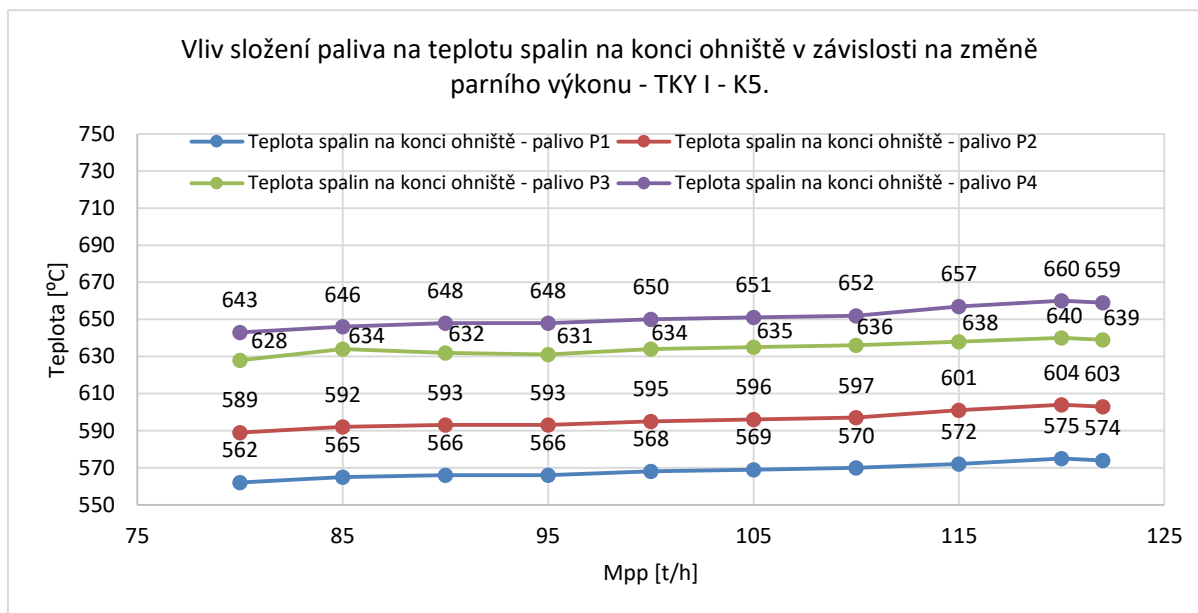
Složení paliva P3 : Hnědé uhlí; $Q_i^r = 12\,290\text{kJ/kg}$							
$W^r$ [%]	$A^r$ [%]	$C^r$ [%]	$H_2^r$ [%]	$N_2^r$ [%]	$S^r$ [%]	$O_2^r$ [%]	$\Sigma$ [%]
25,27%	23,15%	36,29%	3,05%	0,39%	1,21%	10,64%	100%

Tabulka 3-9 Složení paliva P4

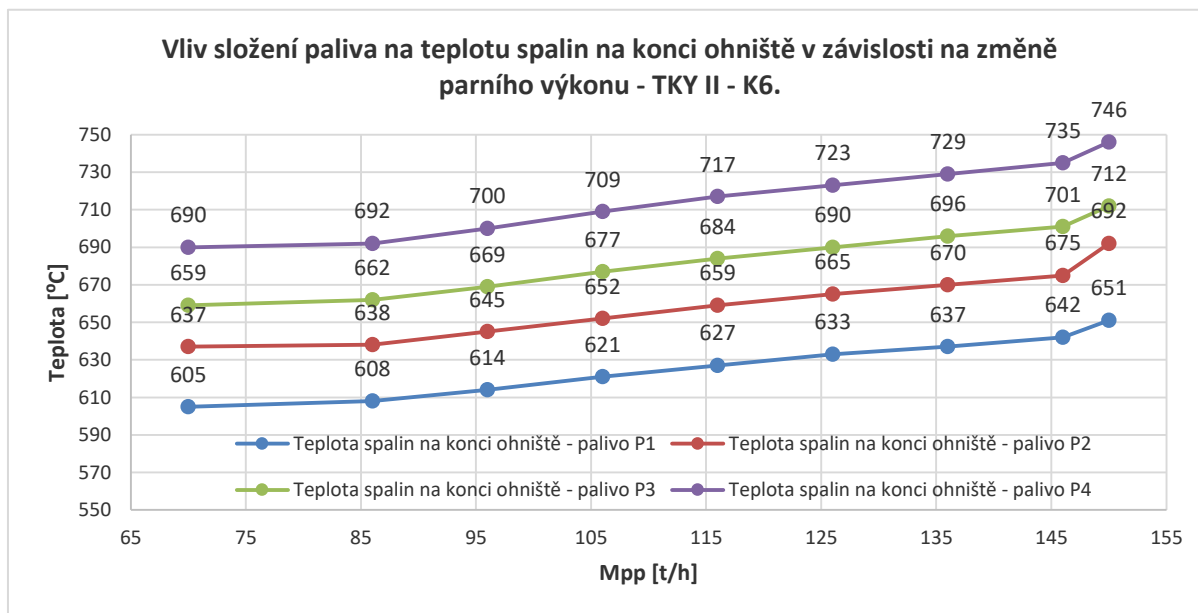
Složení paliva P4 : Hnědé uhlí; $Q_i^r = 13\,261\text{kJ/kg}$							
$W^r$ [%]	$A^r$ [%]	$C^r$ [%]	$H_2^r$ [%]	$N_2^r$ [%]	$S^r$ [%]	$O_2^r$ [%]	$\Sigma$ [%]
24,61%	26,58%	36,09%	1,25%	0,49%	0,79%	10,28%	100%

Výsledky citlivosti teploty na konci ohniště na složení paliva jsou vyobrazeny v grafech na obr.3-12 pro kotel K5 a na obr.3-13 kotel K6.

Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplotna Komořany



Obrázek 3-12 Citlivost teplot na konci ohniště na změnu paliva pro kotel K5

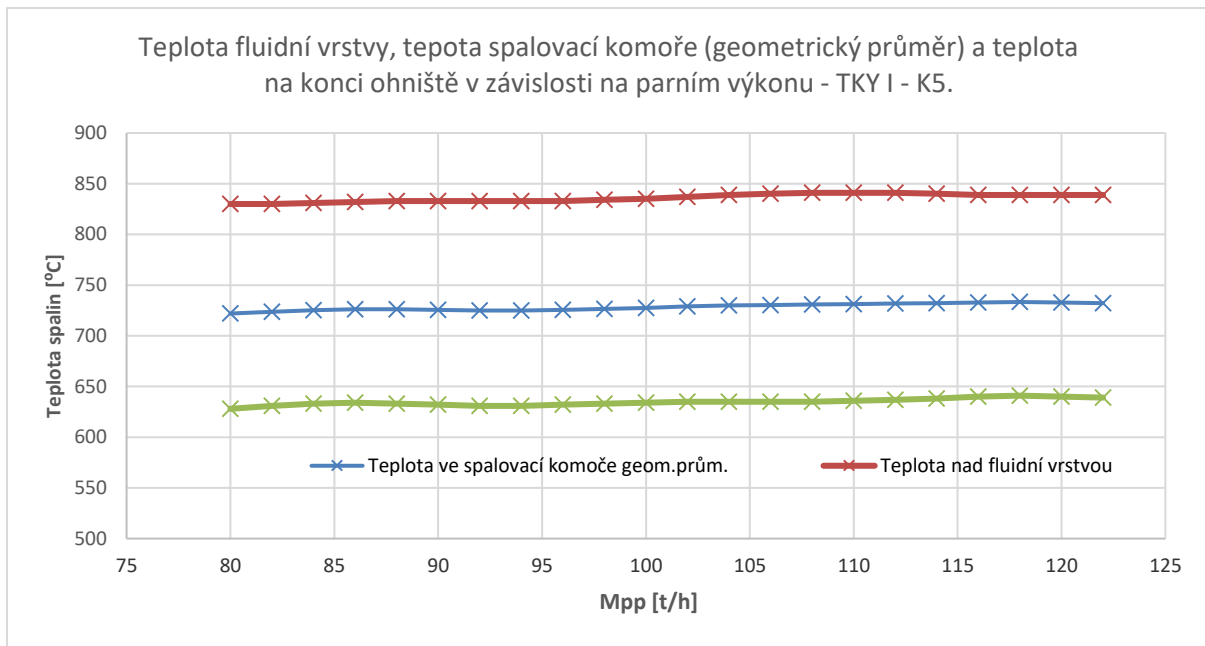


Obrázek 3-13 Citlivost teplot na konci ohniště na změnu paliva pro kotel K6

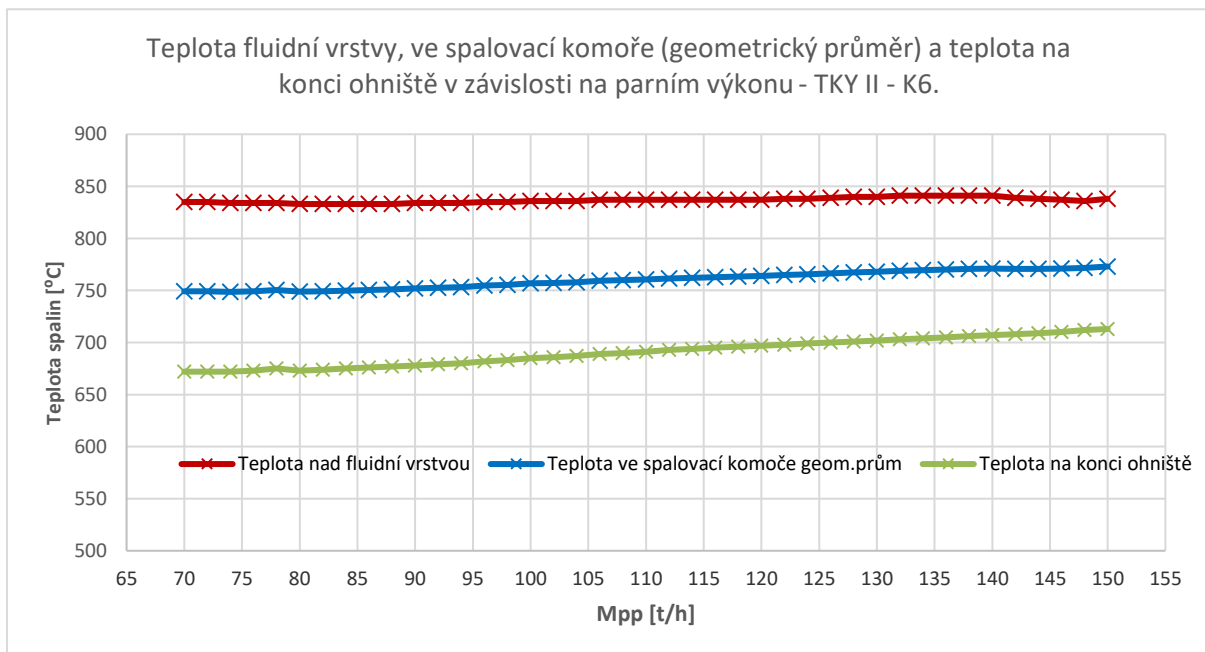
Jak je z grafů patrné, na teplotní pole na konci ohniště má složení paliva vliv, ale i při použití paliva P4 s nejvyšší výhřevností, nedosahují teploty v žádném bodě výkonového rozsahu ani k hranici 875°C. Jelikož je zřejmé, že v místech na konci ohniště, které je vyobrazené na obr. 5-8 (v obrázkové příloze) nebude možno instalovat technologii SNCR, je nutné zjistit, zda existuje místo mezi fluidní vrstvou a koncem, ohniště které by splňovalo teplotní podmínky a mohlo být použito jako reakční prostor.

Možnosti redukce NOx teplárna Komořany

Z tohoto důvodu bylo mezi teplotami nad fluidní vrstvou a teplotami na konci ohniště vytvořeno další pásmo teplot, jako jejich geometrický průměr. Toto pásmo je zaneseno pro každý kotel zvlášť do grafu na obrázku *obr.3-15* pro K5 a na *obr.3-14* pro K6.



Obrázek 3-15 Srovnání jednotlivých teplotních úrovní v ohništi pro kotel K5



Obrázek 3-14 Srovnání jednotlivých teplotních úrovní v ohništi pro kotel K6

Jak z vypočtených teplot vychází, tak teploty na koci ohniště, ani geometrické průměry teplot nepřinesly uspokojivé výsledky, a proto budou pro další řešení použity teploty naměřené

termočláanky přímo nad fluidní vrstvou (výsledky výpočtu jsou zaneseny v *tab. 9-3 a tab. 9-4*).. Jelikož teploty naměřené nad fluidní vrstvou se pohybují pod hranicí 875°C není vyloučeno, že by zde technologie nemohla fungovat.

V místě nad fluidní vrstvou je možné, že hodnoty měřené termočláanky nedosahují takových hodnot, které by bylo možné naměřit např. prosávacími pyrometry. Tudíž v následující kapitole bude určena teoretická střední dosažitelná účinnost denitrifikace při různých vybraných normalizovaných stechiometrických poměrech nastříkovaného reagentu a dále z jejich výsledků vypočítána spotřeba reagentu.

### 3.3.2.1.3 Určení maximální potřebné účinnosti denitrifikace pomocí SNCR

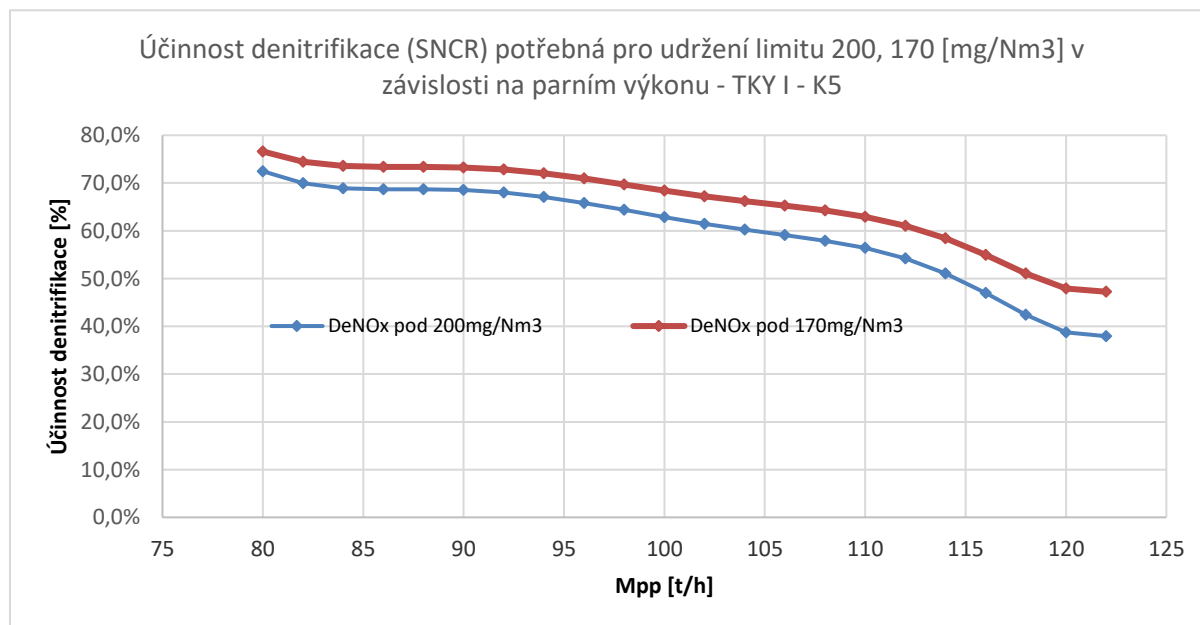
Potřebnou maximální účinnosti  $\eta_{SNCRpmax}$  lze vypočítat jednoduše pomocí koncentrace NO<sub>xIN</sub> aktuální (vstupující do systému SNCR) a koncentrace potřebné (žádaná) NO<sub>xOUT</sub>, která je dána 200mg/Nm<sup>3</sup> a 170mg/Nm<sup>3</sup>.

$$\eta_{SNCRpmax} = \frac{NO_{xIN} - NO_{xOUT}}{NO_{xIN}} \quad (8)$$

Výpočet je demonstrován na koncentracích NO<sub>x</sub> při výkonu 110 t.h<sup>-1</sup> kotle K5.

$$\eta_{SNCRpmax} = \frac{258,3 - 200}{258,3} = 0,2255 \gg 22,55\%$$

Aplikace tohoto vzorce proběhla na naměřených koncentracích z grafu na *obr.3-5* pro kotel K5 a z *obr.3-6* pro kotel K6 při použití dat z horní hranice vytvořeného pásma naměřených NO<sub>x</sub> pro oba kotle. Tyto výsledky jsou zaneseny na *obr.3-16* pro kotle K5 a na *obr.3-17* pro kotle K6.

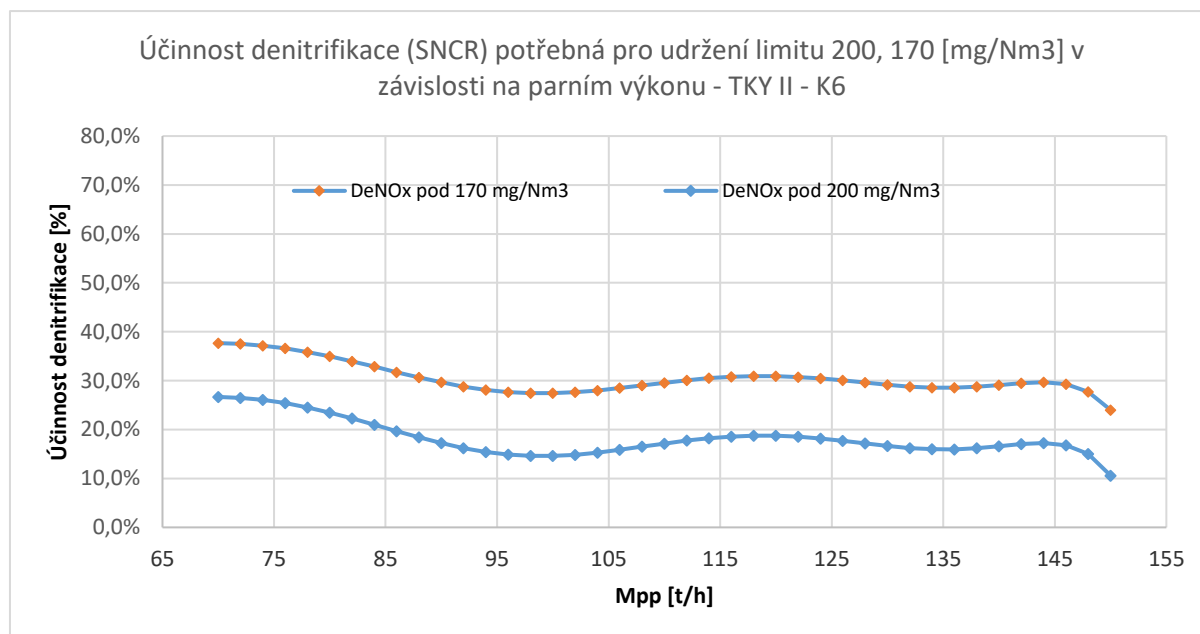


Obrázek 3-16 Potřebná maximální účinnost denitrifikace pod limity 200mg.Nm<sup>-3</sup> a 170 mg.Nm<sup>-3</sup> pro kotel K5

Jak je patrné z *obr.3-16* potřebná maximální účinnosti pro denitrifikaci na kotli K5 jako zástupci TKY I je příliš vysoká a dosahuje i při výkonech přes 100 t.h<sup>-1</sup> hodnot až 40% pro denitrifikaci pod limit 200mg/Nm<sup>3</sup>. Jako další křivka s logicky ještě vyššími nároky je

denitrifikaci je vyobrazena maximální požadovaná účinnost denitrifikace pod limit 170mg/Nm<sup>3</sup>.

Pro názornější představu aplikovatelnosti a použití SNCR na kotlích TKY I za panujících podmínek bude v další části proveden odhad dosažitelné účinnosti technologie SNCR



Obrázek 3-17 Potřebná maximální účinnost denitrifikace pod limity 200mg.Nm<sup>-3</sup> a 170 mg.Nm<sup>-3</sup> pro kotel K6

Jak je patrné na *obr.3-17* maximální potřebná denitrifikace NO<sub>x</sub> na kotli K6 (jako zástupci kotlů TKY II s aplikovanou recirkulací spalin) je nižší a je možné vidět rozdíl v celkovém poklesu nároků kladených jak na denitrifikaci pod 200mg/Nm<sup>3</sup> (kde při výkonech nad 100 t.h<sup>-1</sup> se dostáváme až pod hranici 20%), tak i na denitrifikace pod limit 170mg/Nm<sup>3</sup>. Při denitrifikace pod limit 170mg/Nm<sup>3</sup> je možno se dostat při výkonech nad 100 t.h<sup>-1</sup> až pod hranici 30%, což značně zvyšuje možnost použití metody SNCR na kotlích TKY II k dosažení tohoto limitu.

Pro názornější představu aplikovatelnosti a použití SNCR na kotlích TKY II za panujících podmínek bude v další části proveden odhad dosažitelné účinnosti technologie SNCR

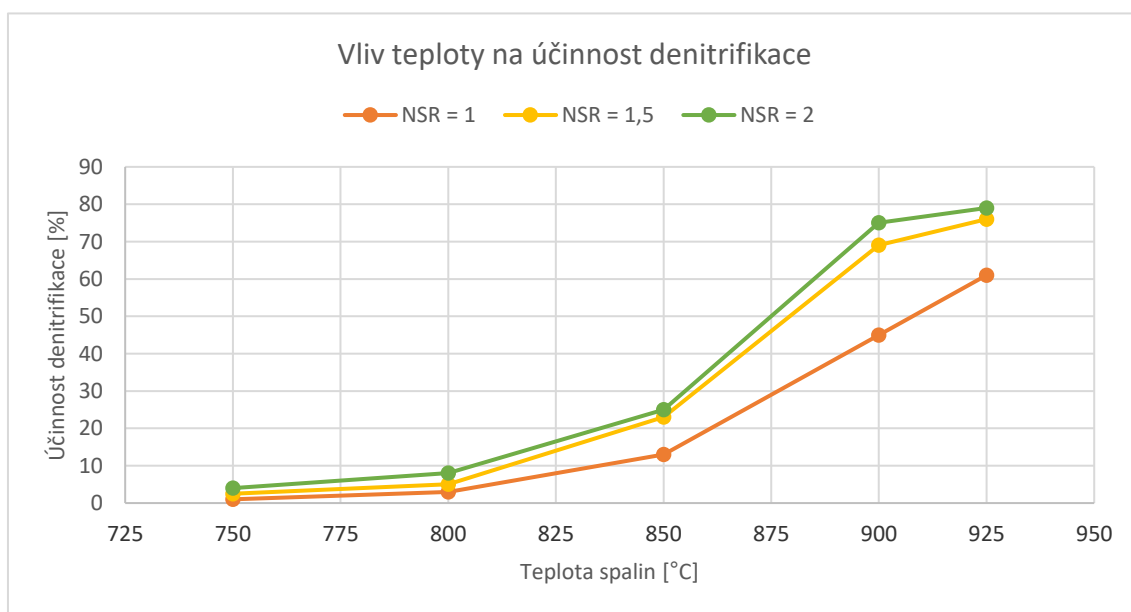


### 3.3.2.2 Určení střední dosažitelné účinnosti denitrifikace pomocí SNCR

Jako všeobecně uváděným parametrem pro stanovení akceptovatelné účinnosti metody SNCR jsou takřka veškerými zdroji uváděny teploty v místě použití technologie SNCR. Tyto teploty jsou často uváděny se spodní hranicí minimálně 850°C až 900°C. Jelikož účinnost SNCR závisí také na době setrvání reagentu v prostoru s ideálním teplotním oknem a na rovnoměrnosti promíchání reagentu ve spalinách je tato část pouze snahou o nastínění teoreticky dosažitelné střední účinnosti SNCR, a to v závislosti pouze a jenom na teplotě.

Důvodem, proč je zde uváděn jako vliv doba setrvání v ohništi a rovnoměrnost nástřiku, je ten, že jsme se rozhodli posuzovat aplikovatelnost do teplotních míst, která jsou přímo nad fluidním ložem, kde může například docházet k silnému poklesu rychlosti spalin při snížení výkonu, tím pádem k zvýšení časové prodlevy reagentu v ideálním teplotním okně a výsledně lepší účinnosti SNCR.

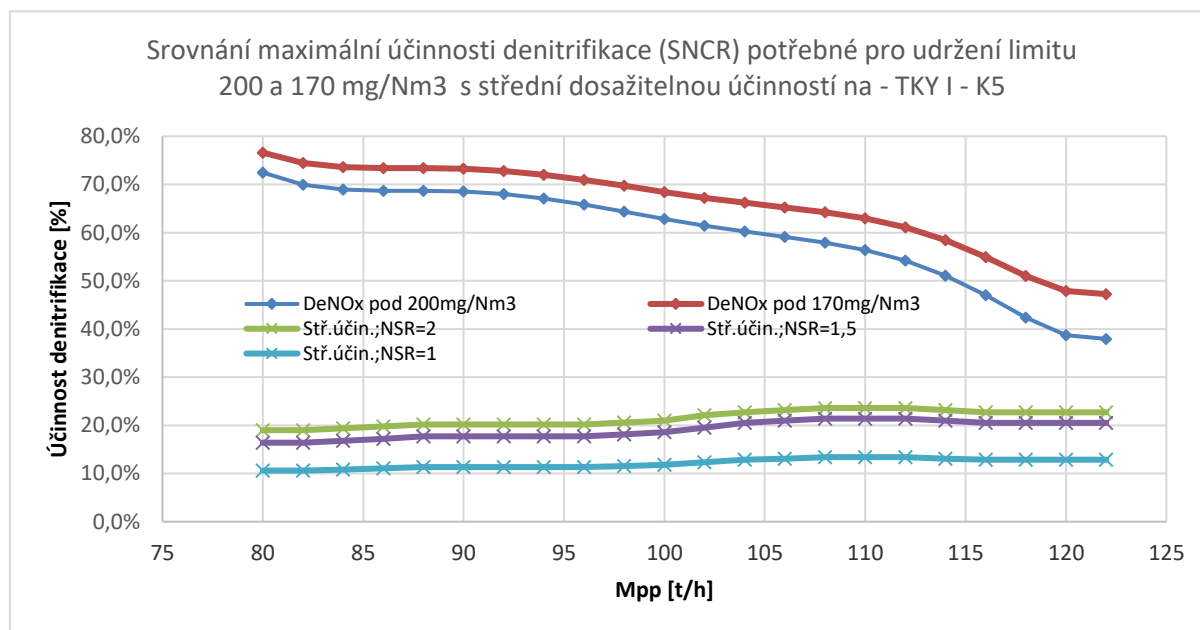
Za pomoci využití informací a dat z měření provedených na TKY a odborné literatury byl na obr.3-18 sestaven graf vývoje účinnosti SNCR v závislosti na teplotě při různých normalizovaných stechiometrických poměrech nastříkovaného reagentu. Tento graf je vyhotoven v užším rozsahu, který při panujících teplotních podmínkách na kotlích TKY naprosto vyhovuje a je dostačující.



Obrázek 3-18 Vliv teplot na účinnost denitrifikace (12) (16) (11)

Jako následující krok byly v závislosti na dostupných datech vybrány tři normalizované stechiometrické poměry (NSR=2, NSR=1,5 s NSR = 1), pro které byly vyhotoveny pomocí grafu na *obr.3-18* a určeny průběhy účinností. Tyto účinnosti jsou vyhotoveny do grafu na *obr.3-19* pro kotel K5. Výše hodnot středních dosažitelných účinností vychází z jejich závislosti na středních teplotách naměřených nad vrstvou, které byly pomocí interpolace polynomem odečteny z grafu na *obr.3-7*.

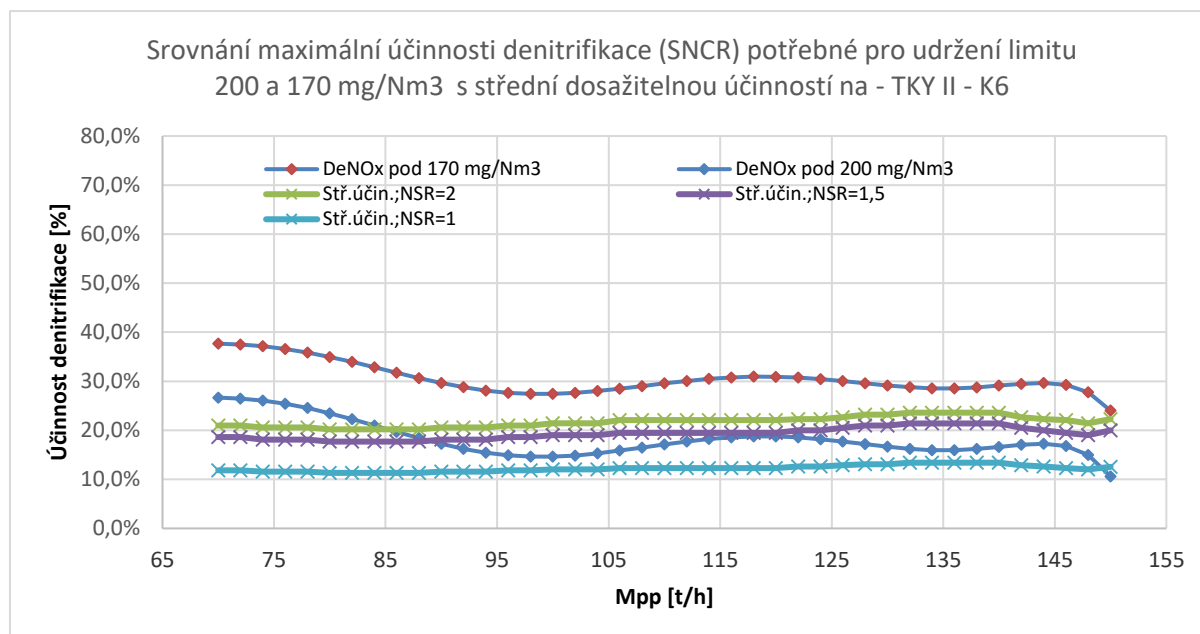
Vývoj středních dosažitelných účinností je srovnán s maximálními požadovanými účinnostmi a to z důvodu nastínění celkového obrazu situace. Tyto grafy, které jsou na *obr.3-19* pro podmínky panující v kotli K5 a na *obr.3-20* pro podmínky panující v kotli K6.



Obrázek 3-19 Porovnání maximální potřebné denitrifikace se střední dosažitelnou denitrifikací při teplotách nad fluidní vrstvou v závislosti na parním výkonu pro kotel K5

recirkulace, není možné dosažení uspokojivých výsledků, ani při nástřiku s normalizovaným stechiometrickým přebytkem vzduchu NSR = 2. Vzhledem k nedostatku dat nemohly být provedeny další srovnávací úrovně středních dosažitelných účinností pro ještě vyšší NSR. Tyto hodnoty by přinesly jistě uspokojivější výsledky, ale za značnou cenu, kterou je naprosto extrémní zvýšení čpavkového skluzu, které můžeme názorně pozorovat na *obr.2-21*. Tento graf je sice v závislosti na teplotě, ale jelikož každá úroveň denitrifikace je sestavována pro daný NSR, tak i hodnoty čpavkového skluzu rostou se zvyšujícím se NSR.

Jelikož v praxi dochází (ve snaze o co nejvyšší výkon denitrifikace) k použití NSR = 4 až 5, lze očekávat, že účinnosti zároveň se čpavkovým skluzem.

Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplárna Komořany

Obrázek 3-20 Porovnání maximální potřebné denitrifikace se střední dosažitelnou denitrifikací při teplotách nad fluidní vrstvou v závislosti na parním výkonu pro kotlík K6

Výsledky z grafu na obr.3-20 hovoří jasně a jako jedinou schůdnou variantou je kombinace metody SNCR s recirkulací spalin. Jak můžeme vidět, nejdůležitějším momentem je situace v oblasti  $86 \text{ t.h}^{-1}$ , kde dochází k překrytí křivky maximální potřebné denitrifikace křivkou střední dosažitelné denitrifikace pro  $\text{NSR} = 2$ . Tento bod je též vidět při použití  $\text{NSR} = 1,5$  a to s menším odstupem na výkonové hladině  $90 \text{ t.h}^{-1}$ . Pro provoz při nižším normalizovaném stechiometrickém poměru než je  $\text{NSR} = 1,5$  - je SNCR neefektivní. Tuto domněnku potvrzuje průběh střední dosažitelné denitrifikace při použití  $\text{NSR} = 1$ .

Jak je patrné z grafu na obr.3-20, střední dosažitelná účinnost je efektivní až od výkonové hladiny  $86 \text{ t.h}^{-1}$  pro  $\text{NSR} = 2$  a  $90 \text{ t.h}^{-1}$  pro  $\text{NSR} = 1,5$ . Toto pásmo, které není schopno pokrýt technologie SNCR je možno zanedbat a to díky nedávno provedeným provozním zkouškám, na kotli K10 z ledna 2017 (15), zpracovaným ve výzkumné práci. Tyto zkoušky byly zaměřené na ověření minimálních výkonů kotlů TKY II a jejich výsledkem při plném využití recirkulace jsou hodnoty NO<sub>x</sub> až na  $173 \text{ mg/Nm}^3$  při  $60 \text{ t.h}^{-1}$ .

Díky těmto překvapivým provozním výsledkům, které nebylo možno ověřit v rámci této práce na kotli K6 jako zástupci TKY II, je možné se domnívat, že při správné kombinaci metody SNCR a recirkulace spalin bude pokryto celé výkonové pásmo každého kotle a dokonce nebude třeba použití SNCR při nižších výkonových hladinách tzn  $90 \text{ t.h}^{-1}$  a nižší.

Závěrem této části je rozhodnutí na základě srovnání maximálních potřebných denitrifikací se středními dosažitelnými denitrifikacemi. Jako navrhovaný model pro dosažení limitů pod 200 mg/Nm<sup>3</sup> na TKYII je použití metody SNCR v kombinaci s recirkulací spalin.

Jako navrhovaný model pro kotle z celku TKY I je návrh založen na použití metody SNCR s podmíněnou instalací recirkulace spalin, jako je tomu v případě kotlů TKYII.

Vzhledem k výsledkům střední dosažitelné účinnosti na kotli TKY I - K5 a na kotli TKY II - K6, budou veškeré další výpočty uvažovány pro každý vybraný kotel podle vzoru K6(kotle s již aplikovanou recirkulací spalin).

### 3.4 Určení předpokládané spotřeby aditiva

Pro výpočet předpokládané spotřeby byl použit jako zdroj střední dosažitelné účinnosti dle grafu na *obr.3-20* v ověřeném rozsahu každého uvažovaného kotle.

Rozsahy jsou brány pro kotle z celku TKY II – při NSR = 2 od 86 t.h<sup>-1</sup> do 150 t.h<sup>-1</sup> a pro NSR = 1,5 od 90 t.h<sup>-1</sup> do 150 t.h<sup>-1</sup>.

Pokud bude akceptovaný návrh na instalaci recirkulace ke zbývajícím kotlům (K3, K4 a K5), bude jejich spotřeba reagentu určena pro výkonové rozsahy – při NSR = 2 od 86 t.h<sup>-1</sup> do 136 t.h<sup>-1</sup> a pro NSR = 1,5 od 90 t.h<sup>-1</sup> do 136 t.h<sup>-1</sup>.

#### 3.4.1.1.1 Určení předpokládané spotřeby aditiva z maximální potřebné účinnosti

Následující výpočet slouží k určení spotřeby reagentu při střední dosažitelné účinnosti, (která vychází z teoreticky dosažitelné účinnosti v závislosti na teplotách *viz kapitola 3.3.2.2.*). Tento výpočet dále vychází z NSR = 2 a NSR = 1,5, pro které byla ověřena funkčnost této metody *viz obr.3-20*. Tento výpočet je proveden prostřednictvím metod a vzorců ověřených společností EPA (United States Environmental Protection Agency) (8) pro výpočet spotřeby reagentu při návrhu technologie SNCR. Tyto výpočty vychází z vstupních koncentrací NO<sub>xIN</sub> a koncentrací žádaných NO<sub>xOUT</sub>. Dále množství paliva  $M_{pal}$ , spalného tepla paliva  $Q_s$  [ $Btu \cdot lb^{-1}$ ](*HHV – high heat value*) a z molárních hmotností močoviny a použitého reagentu, v našem případě močoviny.

Pro tento výpočet bylo ovšem nezbytné převést veškeré koncentrace NO<sub>x</sub> ze stavu 6%O<sub>2</sub> na obsah kyslíku 3%O<sub>2</sub>, dále na koncentraci vyjádřenou v *ppm* a posléze na jednotky, které jsou nezbytné pro výpočet  $lb \cdot MMBtu^{-1}$ . (8)

Výpočet byl proveden pro plný výkon kotle K6 - 150 t.h<sup>-1</sup>.

- $NO_{xOUT} = 200 \text{ mg} \cdot Nm^3 \gg 0,222 \text{ lb} \cdot MMBtu^{-1}$
- $NO_{xIN} = 223,7 \text{ mg} \cdot Nm^3 \gg 0,248 \text{ lb} \cdot MMBtu^{-1}$
- $M_{pal} = 9,328 \text{ kg} \cdot s^{-1} \gg 74 \text{ 033 lb} \cdot h^{-1}$

### Spalné teplo paliva

$$Q_S = Q'_{i.} - 2453.(W' + 9.H')$$

$$Q_S = 12\,290. - 2453.(0,2527 + 9 \cdot 0,031)$$

$$Q_S = 13\,583 \text{ kJ.kg}^{-1} \gg 5839,7 \text{ Btu.lb}^{-1}$$

### Tepelný příkon kotle

$$Q_B = Q_S \cdot M_{pal}$$

$$Q_B = \frac{5839,7 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \cdot 74\,033 \frac{\text{lb}}{\text{h}}}{1\,000\,000 \frac{\text{Btu}}{\text{MMBtu}}}$$

$$Q_B = 432,33 \text{ MMBtu.h}^{-1}$$

Pro korekci jednotek byl použit násobek  $1 \cdot 10^{-6} \text{ MMBtu.Btu}^{-1}$

### Maximální požadovaná účinnost denitrifikace

$$\eta = 0,223 \gg 22,3 \%$$

### Normalizovaný stechiometrický poměr

$$NSR = 2 \text{ mol.mol}^{-1}$$

### Výpočet spotřeby reagentu

$$M_{reag} = \frac{NO_{xIN} \cdot Q_B \cdot \eta \cdot NSR \cdot M_{reag}}{M_{NO} \cdot SR_T}$$

$$M_{reag} = \frac{2 \cdot 0,248 \frac{\text{lb}}{\text{MMBtu}} \cdot 432,33 \frac{\text{MMBtu}}{\text{h}} \cdot 0,106 \cdot 0,51 \cdot 60,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{30,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 2}$$

$$M_{reag} = 44,77 \text{ lb.h}^{-1} \gg 21,63 \text{ kg.h}^{-1}$$

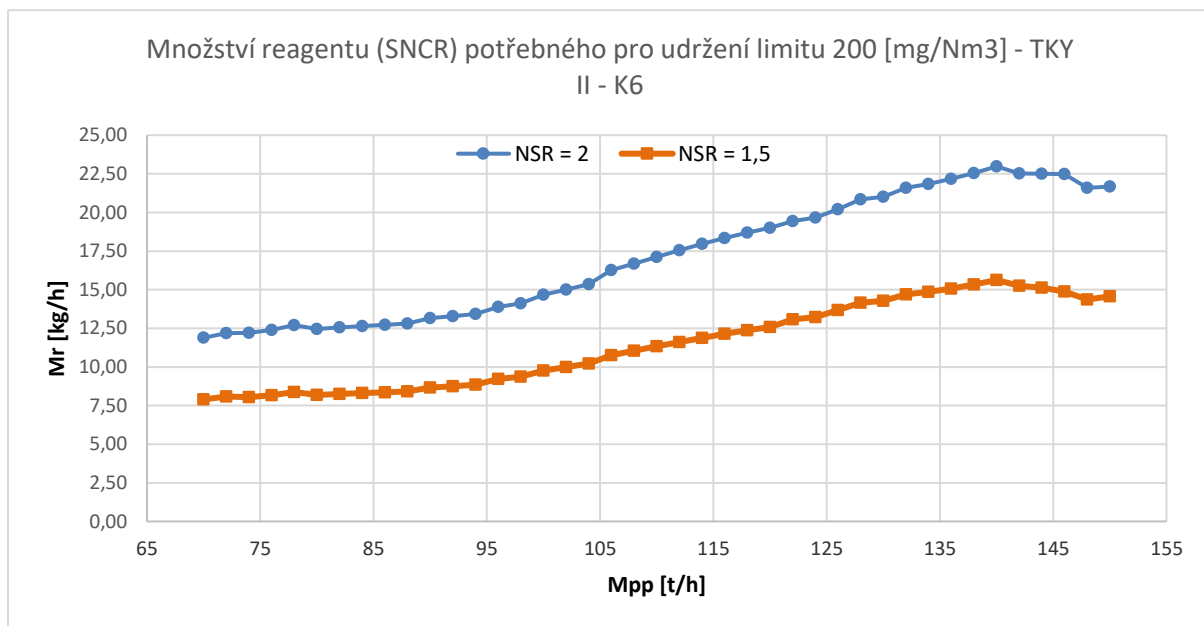
- Molární hmotnost reagentu  $M_{reag} = 60,06 \text{ g.mol}^{-1}$
- Molární hmotnost NO  $M_{NO} = 30,06 \text{ g.mol}^{-1}$

Pro účely určení spotřeby reagentu bude v našem případě klíčová molární hmotnost oxidu dusnatého NO jako hlavního zástupce redukovaných oxidů dusíku.

- $SR_T$  je poměr vyjadřující množství molů NH<sub>3</sub> nastříkovaných v každém molu reagentu. Pro močovinu (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) jest  $SR_T = 2$ . (8)

- **Maximální požadovaná účinnost denitrifikace**
- $\eta = 0,2 \gg 20 \%$
- **Normalizovaný stechiometrický poměr**
- $NSR = 1,5 \text{ mol.mol}^{-1}$
- **Výpočet spotřeby reagentu**
- $$M_{reag} = \frac{NO_{xIN} \cdot Q_B \cdot \eta \cdot NSR \cdot M_{reag}}{M_{NO} \cdot SRT}$$
- $$M_{reag} = \frac{2 \cdot 0,248 \frac{lb}{MMBtu} \cdot 432,33 \frac{MMBtu}{h} \cdot 0,106 \cdot 1,5 \cdot 60,06 \frac{g}{mol}}{30,06 \frac{g}{mol} \cdot 2}$$
- $M_{reag} = 32,13 \text{ lb.h}^{-1} \gg 14,58 \text{ kg.h}^{-1}$

Veškeré výpočty pro vybrané výkonové rozsahy jsou vyobrazeny pomocí grafů na obr.3-21. a (výsledky výpočtu jsou zaneseny v tab. 9-5 a tab. 9-6).



Obrázek 3-21 Předpokládaná spotřeba reagentu při NSR=2 a NSR=1,5 pro maximální potřebnou denitrifikaci.

Jako další byla vypočítána průměrná spotřeba reagentu na jednom kotli, při použití NSR=1,5 a NSR=2 při provozních hodinách každého z kotlů.

Jak vyplývá z výpočtů, spotřeba reagentu je silně závislá na účinnosti, normalizovaném stechiometrickém poměru a tepelném příkonu kotle. Výrazný pokles spotřeby reagentu spojený s poklesem parního výkonu je v souvislosti s použitým výpočtem silně ovlivněn množstvím paliva a účinností, která prudce klesá i při mírném poklesu teploty spalin v místě nástřiku.

Spotřeba reagentu při NSR =2 dosahuje svého maxima při parním výkonu 140t.h<sup>-1</sup>, 22,98kg.h<sup>-1</sup>. Průměrná spotřeba činí 18,41kg.h<sup>-1</sup> a minimální spotřeba při výkonu 86t.h<sup>-1</sup> činí 12,72kg.h<sup>-1</sup>.

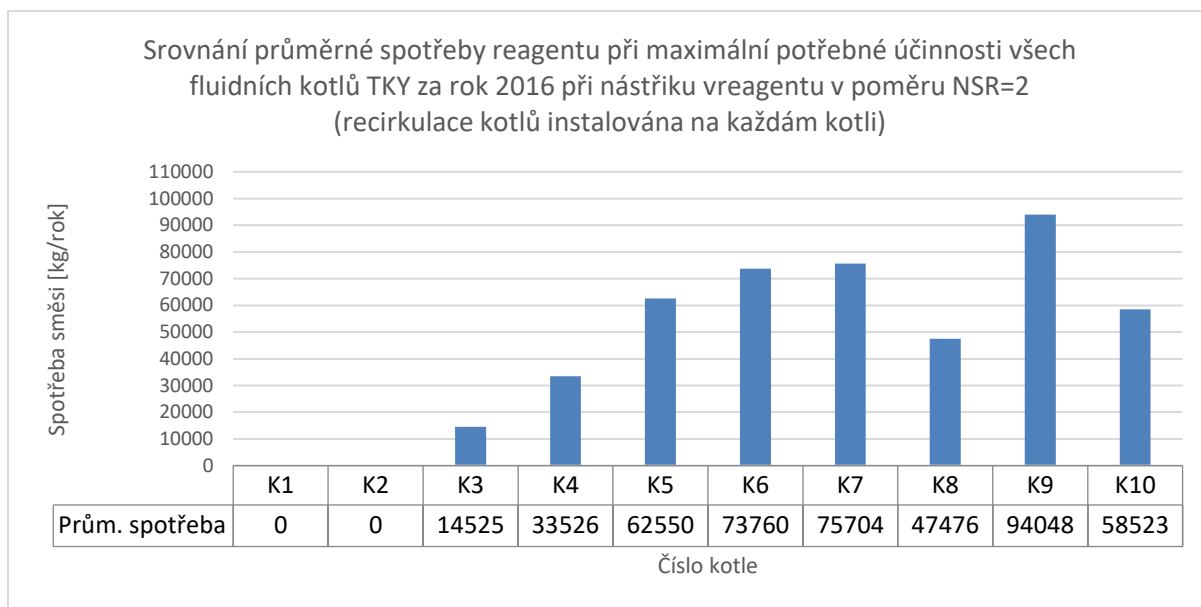
Nižší spotřeby a zároveň dostačující účinnosti denitrifikace je možné dosáhnout při provozu SNCR s NSR =1,5. Při tomto poměru spotřeba dosahuje svého maxima při parním výkonu 140t.h<sup>-1</sup>, 15,63kg.h<sup>-1</sup>. Průměrná spotřeba činí 12,48kg.h<sup>-1</sup> a minimální spotřeba připadá na výkon 90t.h<sup>-1</sup> a činí 8,67kg.h<sup>-1</sup>.

Jelikož spotřeba reagentu v závislosti na výkonu není konstantní, byly vytvořeny průměrné spotřeby pro tři výkonová pásma. Tyto pásma jsou pro nízký, střední a vysoký výkon kotle K6. Jak se dalo předpokládat, tak největší spotřebu zastává varianta s nástřikem reagentu v poměru NSR =2 kdy při maximálních výkonech se pohybuje spotřeba okolo 78 524 kg/rok reagentu na kotli K6 viz *obr.5-3*.

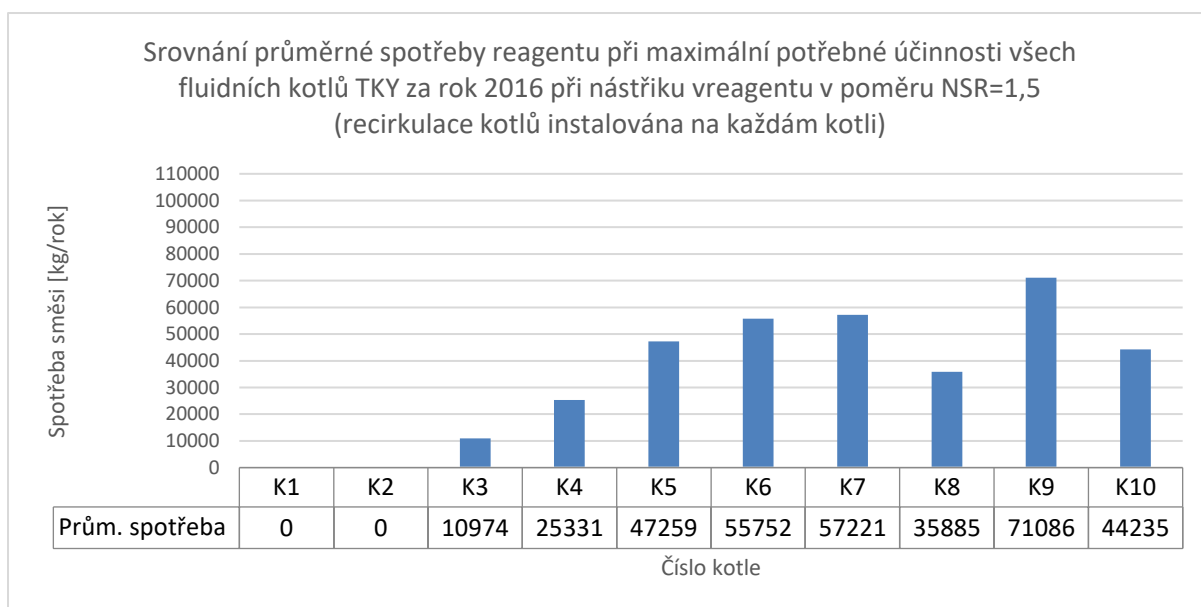
Dále byla určena roční spotřeba reagentu pro každý kotel, a to při ročních provozních hodinách každého z kotlů za rok 2016. Spotřeby jsou určeny podle průměrné hodinové spotřeby reagentu vypočtené pro jeden kotel TKY. Pro kotle TKY I bylo využito stejných výsledků, kterých bylo dosaženo na kotli K6, jelikož aplikace systému SNCR je podmíněna rozšířením recirkulace na všechny kotle TKY I.



Možnosti redukce NOx teplárna Komořany



Obrázek 3-22 Předpokládaná průměrná spotřeba aditiva pro všechny funkční kotle TKY dle provozních hodin za rok 2016 a NSR=2



Obrázek 3-23 Předpokládaná průměrná spotřeba aditiva pro všechny funkční kotle TKY dle provozních hodin za rok 2016 a NSR=1,5

Dále byly vyhotoveny grafy na obr. 5-4 až obr. 5-7, které zahrnují tři výkonová pásma pro všechny kotle. Tyto pásma jsou tři a jsou určena rozdělením celkového výkonu na třetiny. Tento způsob vyobrazení je předkládán z důvodu jasnějšího a detailnějšího přehledu spotřeby reagentu při roční provozní době z roku 2016 po různé výkonové rozsahy. Tímto způsobem byla vypočtena spotřeba pro každý kotel z celku TKY I za použití NSR=2 a NSR=1,5 viz obr.5-4 a obr. 5-6. Pro kotle z celku TKY II výsledky výpočtu zaneseny v grafech na obr.5-5 a pro NSR = 1,5 a na obr.5-7 pro kotel K6.

### 3.5 Závěr

Pro redukci NO<sub>x</sub> na teplárně Komořany jsem navrhl několik řešení, kde ovšem každé z nich přináší určité výhody, možnosti, ale také rizika, kterými se tato práce zabývá a nabízí tím podklady pro objektivní posouzení vhodnosti každé z metod.

Prvním cílem bylo zhodnocení a objektivní posouzení zvažovaných variant selektivní katalytické redukce NO<sub>x</sub> (SCR) a selektivní nekatalytické redukce NO<sub>x</sub> (SNCR).

Obě tyto metody byly důsledně prostudovány z pohledu technicko ekonomické rozvahy, kdy jako nejvhodnější a reálně použitelný systém byla vybrána technologie SNCR. Na základě poskytnutých dat teplárnou hodnotím možnosti aplikace nástřiku aditiva (reagentu) do proudu spalin.

V prvním kroku řešení jsem provedl výpočty určené pro plný výkonový rozsah závislosti teplot na konci ohniště pro kotle K5 a K6. Každý z těchto kotlů byl vybrán z důvodu reprezentativního posouzení technologických celků TKY I a TKY II, kde hlavním rozdílem, na který je kladen důraz je instalovaná recirkulace spalin pouze u kotlů v celku TKY II.

Jak z výpočtů vyplynulo, tak teploty na konci ohniště každého z posuzovaných kotlů v místě přechodu do mezitahu viz obr. 5-8 jsou hluboko pod minimální hranicí použitelného teplotního okna pro aplikaci SNCR a tudíž toto místo bylo vyhodnoceno jako nevhodné pro nástřik reagentu. I přes tento fakt byla na pro každý kotel provedena citlivostní analýza teplot na změnu teploty vody za ekonomizérem a na změnu složení paliva.

Citlivost teplot na konci ohniště v závislosti na teplotě vody z ekonomizéru je velmi nízká a tudíž případné zvýšení teploty vody za ekonomizérem by neznamena výraznější zlepšení situace a není řešením, viz obr. 3-11a a obr. 3-11b.

Citlivost na změnu složení paliva přinesla značně lepší výsledky s navýšením teplot v průměru o cca 15 až 30°C maximálně. Jako maximální teploty byly výpočtem určeny teploty 660°C pro konec ohniště K5 a 746°C pro konec ohniště K6, ale pouze při maximálních výkonech daného kotle. I přesto, že došlo k celkovému posunu teplot na konci ohniště každého kotle při použití paliva P4, tak samotná změna paliva nepřináší dostatečný nárůst teplot na konci ohniště a tudíž také není řešením pro zlepšení podmínek pro aplikaci SNCR v těchto místech.

Z těchto důvodů byla jako dalším krokem změřena a interpolována teplota nad fluidní vrstvou, aby bylo možné určit středních teplot spalin nad fluidní vrstvou v závislosti na parním výkonu viz obr. 3-7. Z interpolace vyplynulo, že teploty nad fluidní vrstvou nedosahují požadované minimální teplotní hranice 875°C (850°C), ale drží se s hodnotami cca 838°C pod

ní. I přes tento fakt byly pro veškeré výpočty použity jako výchozí teploty naměřené nad fluidní vrstvou.

Jako další krok byla zpracována data z autorizovaného měřicího systému AMS a podrobena testům dle normy ČSN EN 14181, za účelem zjištění chybovosti měření tohoto systému. Autorizovaný měřicí systém prošel bez problému veškerými testy a data jím naměřená byla použita jako podklady pro další výpočty.

V dalším kroku byla data naměřených NO<sub>x</sub> na kotli K5 a K6 zpracována s výstupem ve formě pásma, ze kterého byla použita horní hranice pásma pro výpočet maximální potřebné účinnosti denitrifikace viz obr. 3-16 a viz obr. 3-17.

Díky určeným potřebným účinnostem denitrifikace bylo možné zjistit potřebný účinek SNCR v závislosti na parním výkonu kotle.

Dále byly díky použitým zdrojům určeny střední dosažitelné účinnosti denitrifikace při nástřiku reagentu s normalizovaným stechiometrickým poměrem NSR=2 a NSR=1,5 a následně srovnány s dílčími maximálními potřebnými účinnostmi viz obr. 3-19 a viz obr. 3-20. Z tohoto srovnání jasně vyplývá, že při zhoršených teplotních podmínkách panujících nad fluidní vrstvou není možné v případě kotle K5 dosáhnout či překročit maximální požadované účinnosti při limitech 200mg/Nm<sup>3</sup> či dokonce 170mg/Nm<sup>3</sup>, které jsou v grafech zaneseny pouze pro názornou ukázkou. V případě kotle K6 je ovšem situace pozitivnější a celkové možnosti pro nástřik s poměrem NSR= 2 jsou realizovatelné již od výkonu 86t.h<sup>-1</sup> a pro nástřik v poměru NSR=1,5 od 90t.h<sup>-1</sup>.

Pro pásmo, které nelze pokrýt metodou SNCR existuje řešení ve formě zlepšení řídicího systému kotle a recirkulace s úspěšným dodržením produkce NO<sub>x</sub> pod limit 200 mg.Nm<sup>-3</sup>. Toto řešení je potvrzeno ve výzkumné práci při prokazování minimálního výkonu na kotli K10 s recirkulací spalin. Výsledky tohoto testu potvrdili, že při výkonu 60t.h<sup>-1</sup> je schopna recirkulace spalin snížit emise NO<sub>x</sub> až na hladinu 173mg.Nm<sup>-3</sup>, při plném výkonu recirkulace 23t.h<sup>-1</sup> spalin. Z tohoto důvodu není nezbytně nutné zavrhnout tuto variantu z důvodu nepokrytí produkovaných NO<sub>x</sub> v plném výkonovém rozsahu.

Jako posledním krokem této práce je výpočet spotřeby reagentu v závislosti na parním výkonu kotle viz obr. 3-21. Tato spotřeba je počítána pouze pro pásmo, kde nabývá metoda SNCR potřebné účinnosti, jak již bylo zmíněno výše. Její stoupající průběh je výsledkem rostoucího množství tepelného příkonu kotle, tudíž značného nárůstu potřeby paliva s nárůstem výkonu. Jako dalším z vlivů působících na rostoucí tendenci spotřeby reagentu je mírně stoupající účinnost denitrifikace, která má značný dopad na spotřebu při vysokých výkonech.

Spotřeba reagentu při NSR =2 dosahuje svého maxima při parním výkonu 140t.h<sup>-1</sup>, 22,98kg.h<sup>-1</sup>. Průměrná spotřeba činí 18,41kg.h<sup>-1</sup> a minimální spotřeba při výkonu 86t.h<sup>-1</sup> činí 12,72kg.h<sup>-1</sup>.

Nižší spotřeby a zároveň dostačující účinnosti denitrifikace je možné dosáhnout při provozu SNCR s NSR =1,5. Při tomto poměru spotřeba dosahuje svého maxima při parním výkonu 140t.h<sup>-1</sup>, 15,63kg.h<sup>-1</sup>. Průměrná spotřeba činí 12,48kg.h<sup>-1</sup> a minimální spotřeba připadá na výkon 90t.h<sup>-1</sup> a činí 8,67kg.h<sup>-1</sup>.

Jak plyne z výpočtu nejvyšší spotřeba reagentu nastává při výkonu 140t.h<sup>-1</sup> u obou poměrů NSR. Následný pokles spotřeby při stále rostoucím výkonu je zapříčiněn kolísáním teplot nad fluidní vrstvou.

Spotřeba byla dále počítána pro všechny kotle včetně kotlů z TKY I, ale s podmínkami shodnými s kotly TKY II (tudíž s instalovanou recirkulací spalin). Nejdříve byla vyhotovena spotřeba pro jediný kotel ve třech průměrech uvažovaných pro nízký, střední a vysoký výkonový rozsah viz obr. 5-3. Průměrná spotřeba pro vysoký výkon od 124-150t.h<sup>-1</sup> pro kotel K6 je 78 524 kg.rok<sup>-1</sup>.

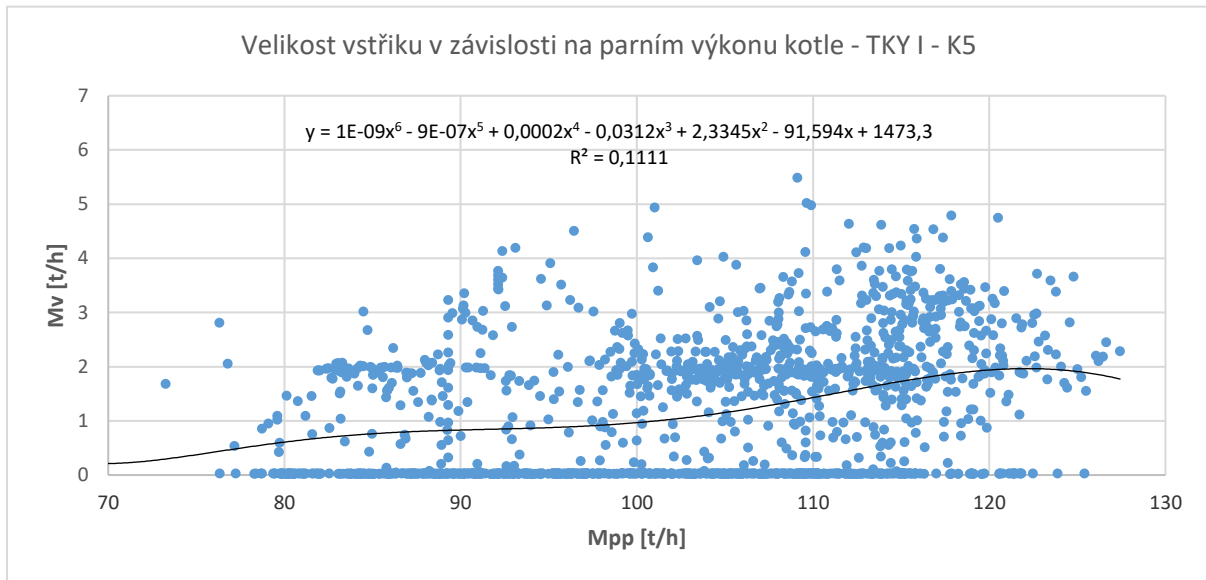
Dále byl proveden výpočet pro každý z kotlů TKY dle jeho provozních hodin z roku 2016 a byl zanesen do grafu. Jak můžeme vidět na grafech z obr. 5-4 až obr. 5-7, je vidět značný rozdíl mezi variantou NSR=2 a NSR=1,5. Varianta s NSR=2 nám zajišťuje bezpečný průběh denitrifikace již od výkonu 86t.h<sup>-1</sup> a poskytuje tím širší rozsah pro použití SNCR. Při variantě NSR=1,5 je možné SNCR použít až od výkonu 90t.h<sup>-1</sup>, ale poskytuje úsporu cca 15 000 kg.rok<sup>-1</sup> (při nižších výkonech) až 30 000 kg.rok<sup>-1</sup> (při vyšších výkonech) reagentu pro jeden průměrně používaný kotel TKY.

Na základě provedených úvah, výpočtů a vyhodnocení provozních parametrů jsem dospěl k závěru, že technologie SNCR je vhodná a zároveň použitelná pro kotle TKY pouze za podmínek, které musí být respektovány a v každém případě dodrženy.

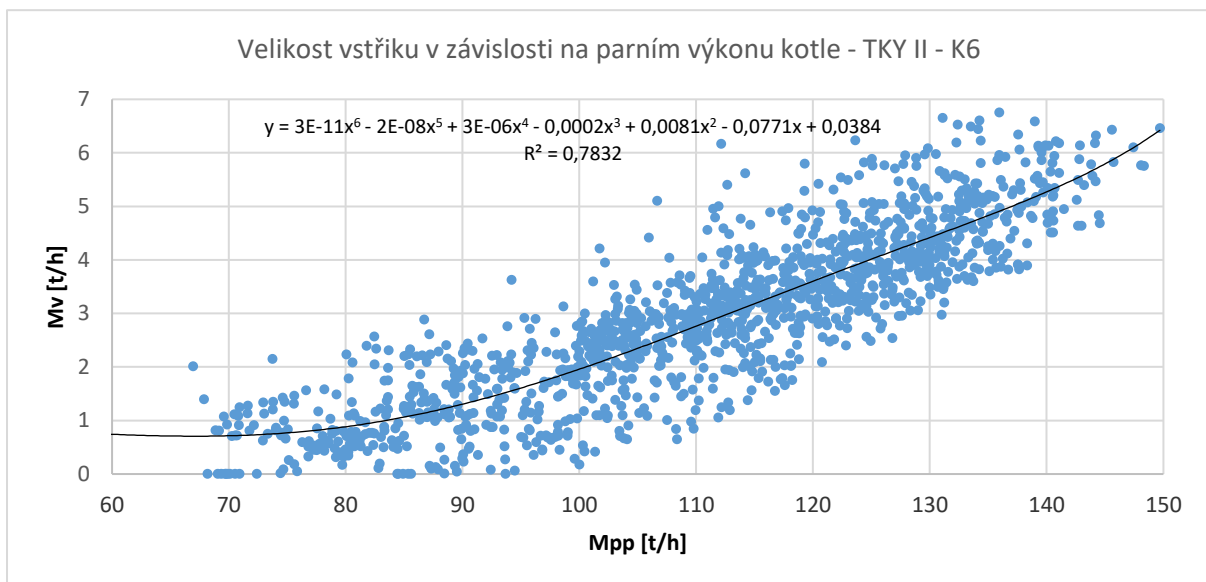
## 4 Seznam příloh

- Obrázková příloha
- Tabulková příloha
- Seznam tabulek
- Seznam obrázků
- Tabulková příloha Vyhodnocení ověření regresivních závislostí analyzátorů plynů dle ČSN EN 14 181
- Seznam citací

## 5 Obrázková příloha

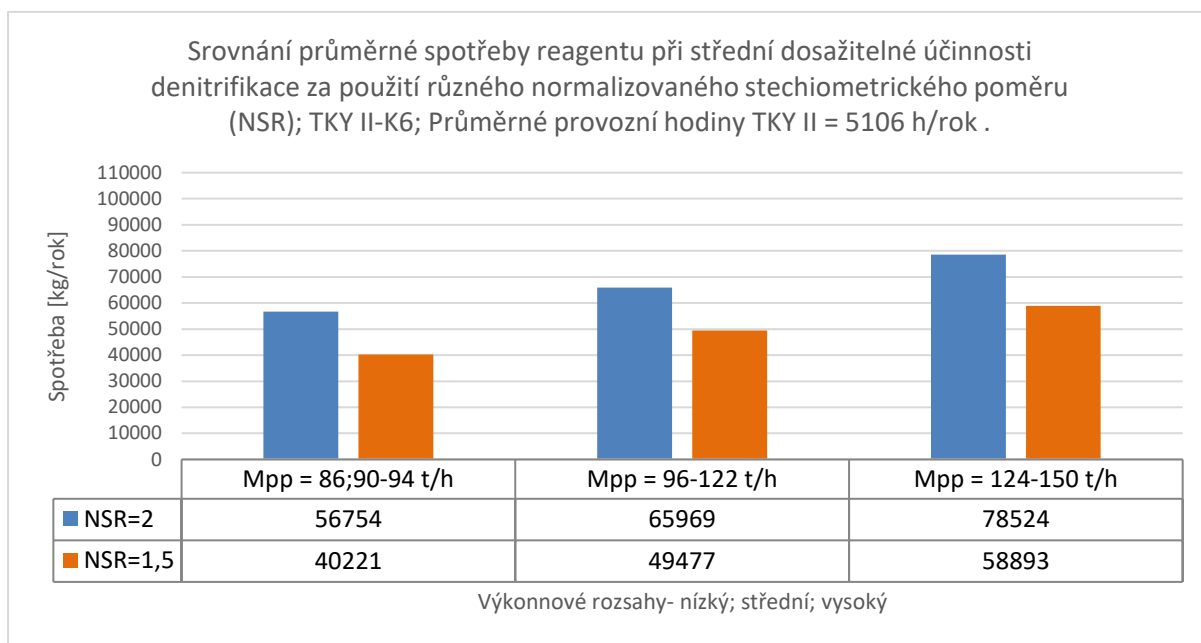


Obrázek 5-1 Vývoj množství vstřiku v závislosti na parním výkonu pro kotel K5

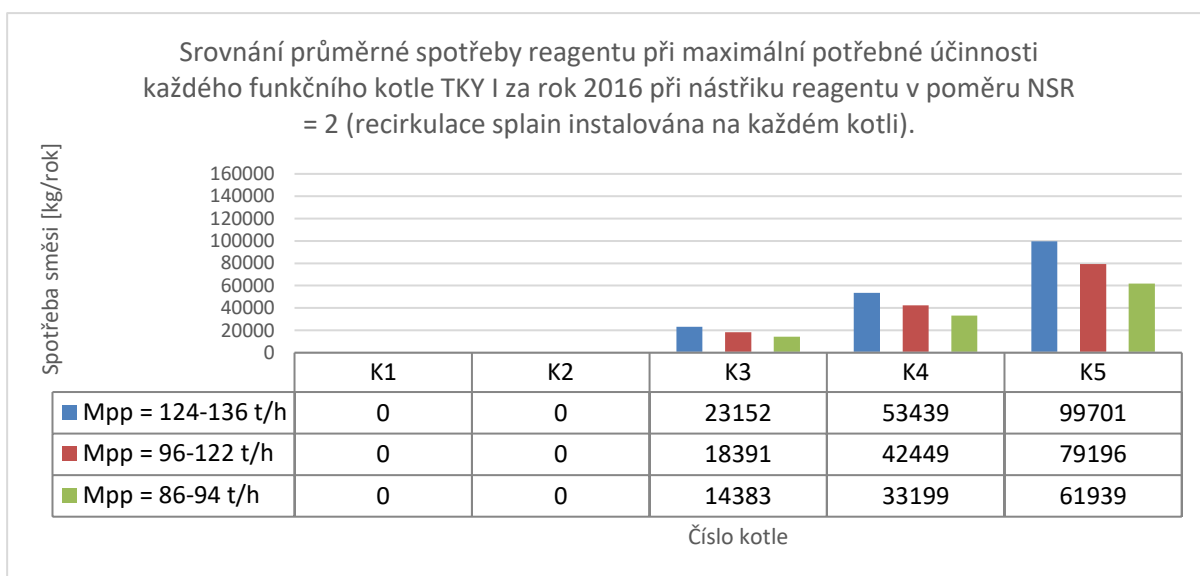


Obrázek 5-2 Vývoj množství vstřiku v závislosti na parním výkonu pro kotel K6

Možnosti redukce NOx teplárna Komořany

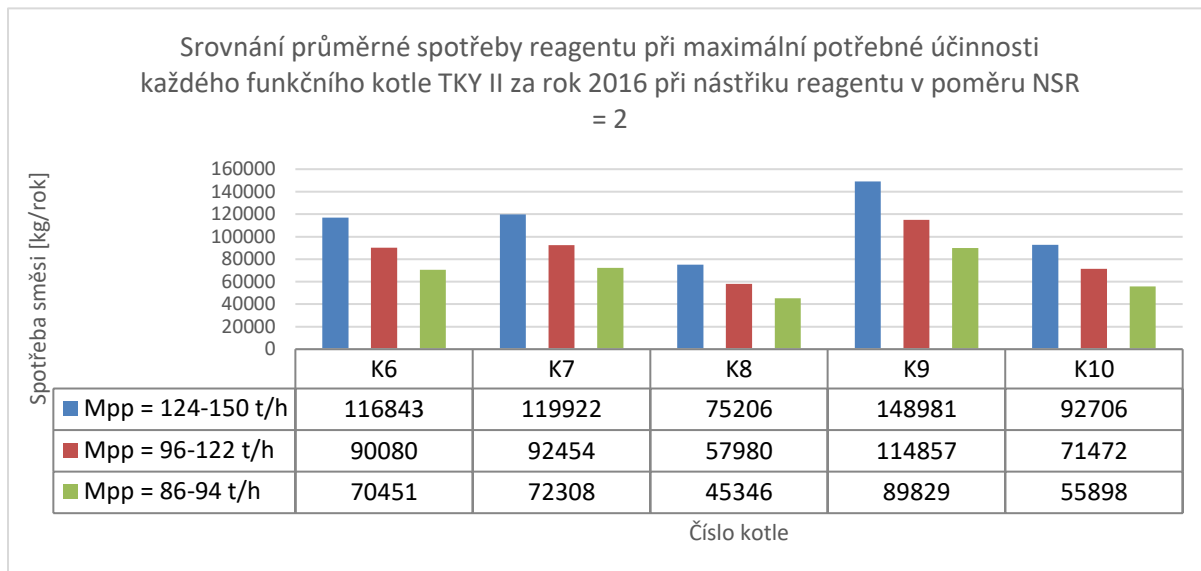


Obrázek 5-3 Spotřeba reagentu pro dílčí výkonové úrovně

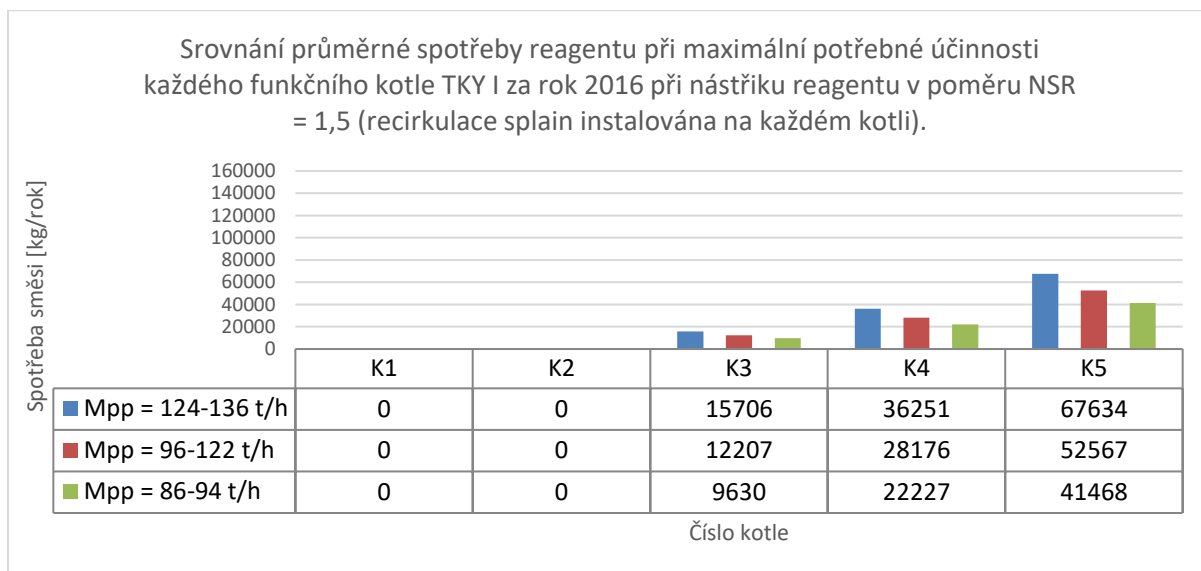


Obrázek 5-4 Spotřeba reagentu při NSR=2 na kotlích TKYI pro provozní hodiny kotlů za rok 2016

Možnosti redukce NOx teplárna Komořany



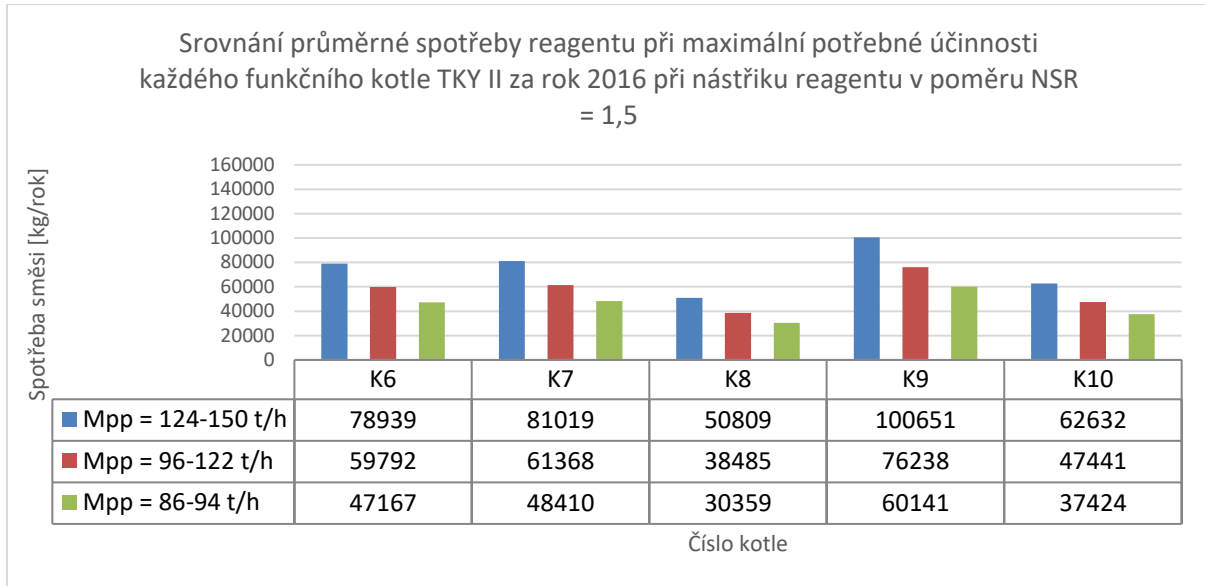
Obrázek 5-5 Spotřeba reagentu při NSR=2 na kotlích TKY II pro provozní hodiny kotlů za rok 2016



Obrázek 5-6 Spotřeba reagentu při NSR=1,5 na kotlích TKY I pro provozní hodiny kotlů za rok 2016



Možnosti redukce NOx teplárna Komořany



Obrázek 5-7 Spotřeba reagentu při NSR=1,5 na kotlích TKYII pro provozní hodiny kotlů za rok 2016

## 6 Seznam Tabulek

Tabulka 3-1 Provozní hodiny za rok 2016 (12) .....	55
Tabulka 3-2 Složení paliva pro výpočet teplot na konci ohniště .....	61
Tabulka 3-3 Výpočet entalpie spalin a suchého vzduchu v závislosti na teplotě při přebytku vzduchu $\alpha=1,1$ .....	64
Tabulka 3-4 Výpočet entalpie spalin v závislosti na vybraných přebytcích vzduchu .....	65
Tabulka 3-5 Výpočet entalpie spalin a suchého vzduchu v závislosti na teplotě při přebytku vzduchu $\alpha=1,3$ .....	76
Tabulka 3-7 Složení paliva P1 .....	86
Tabulka 3-8 Složení paliva P2 .....	86
Tabulka 3-9 Složení paliva P3 .....	86
Tabulka 3-10 Složení paliva P4 .....	86
Tabulka 8-1 Výsledky měření pro test AST (NO) .....	112
Tabulka 8-2 Výsledky NRM .....	112
Tabulka 8-3 Výsledky ročního ověření AMS (NO) .....	113
Tabulka 8-4 Výsledky měření AMS .....	114
Tabulka 8-5 Výsledky přepočtené na normální stav .....	114
Tabulka 9-1 Výsledky citlivosti teploty na konci ohniště na změnu teploty vody za ekonomizérem K6 .....	115
Tabulka 9-2 Výsledky citlivosti teploty na konci ohniště na změnu teploty vody za ekonomizérem K5 .....	115
Tabulka 9-3 Výpočet teplot na konci ohniště v závislosti na parním výkonu, teplota ve spalovací komoře a teplota nad fluidní vrstvou K5 .....	116
Tabulka 9-4 Výpočet teplot na konci ohniště v závislosti na parním výkonu, teplota ve spalovací komoře a teplota nad fluidní vrstvou K6 .....	117
Tabulka 9-5 Spotřeba reagentu při použití NSR=2 .....	118
Tabulka 9-6 Spotřeba reagentu při použití NSR=1,5 .....	119

## 7 Seznam Obrázků

Obrázek 2-1 - Průběhy reakcí v katalyzátoru (6).....	18
Obrázek 2-2 - Druhy katalytických náplní (6).....	20
Obrázek 2-3 - Uspořádání katalyzátoru High dust (6).....	22
Obrázek 2-4 Uspořádání katalyzátoru Low dust .....	23
Obrázek 2-5 Uspořádání katalyzátoru Tail end .....	24
Obrázek 2-6 Schéma aplikace zařízení SNCR (8).....	26
Obrázek 2-7 Význam funkce teplotního okna při aplikaci SNCR (7).....	28
Obrázek 2-8 Teplotní úrovně v závislosti na změně výkonu (7).....	29
Obrázek 2-9 Měřicí systém agam v kombinaci s SNCR (7).....	30
Obrázek 2-10 Měřicí systém AGAM (7).....	30
Obrázek 2-11 Tok spalin.....	32
Obrázek 2-12 Teplotní modely spalovací komory.....	33
Obrázek 2-13 Průběh nástřiku močoviny a čpavkové vody (9).....	35
Obrázek 2-14 Nádrže a stáček stanice pro čpavkovou vodu (9).....	37
Obrázek 2-15 Zásobní nádrž pro močovinu (9).....	37
Obrázek 2-16 Aplikace SNCR s použitím čpavkové vody (9).....	38
Obrázek 2-17 Aplikace SNCR s použitím močoviny (9).....	38
Obrázek 2-18 Aplikace technologie TWIN NO <sub>x</sub> (7).....	39
Obrázek 2-19 Aplikace SNCR plus dochlazování spalin vodou (7).....	40
Obrázek 2-20 Schéma experimentálního zařízení (11).....	42
Obrázek 2-21 Vliv teploty spalin na množství čpavkového skluzu při dílčích NSR (11).....	44
Obrázek 2-22 Vliv teploty na účinnost denitrifikace SNCR při dílčích NSR (11).....	44
Obrázek 2-23 Vliv NSR na účinnost denitrifikace SNCR při dílčích teplotách spalin (11).....	45
Obrázek 3-1 Počet provozních hodin kotlů TKY za rok 2016 (12).....	55
Obrázek 3-2 Koncentrace NO <sub>x</sub> v závislosti na parním výkonu pro kotel K5 s limitem 200mg.Nm <sup>-3</sup> (12).....	56
Obrázek 3-3 Koncentrace NO <sub>x</sub> v závislosti na parním výkonu pro kotel K6 s limitem 200mg.Nm <sup>-3</sup> (12).....	57
Obrázek 3-4 Koncentrace NO <sub>x</sub> v závislosti na parním výkonu pro kotel K6 s limitem 200mg.Nm <sup>-3</sup> a 170mg.Nm <sup>-3</sup> (12).....	57
Obrázek 3-5 Pásmo redukováných NO <sub>x</sub> s limitem 200mg.Nm <sup>-3</sup> pro kotel K5 (12).....	58
Obrázek 3-6 Pásmo redukováných NO <sub>x</sub> s limitem 200mg.Nm <sup>-3</sup> a 170 mg/Nm <sup>-3</sup> pro kotel K6 (12).....	59
Obrázek 3-7 Teploty naměřené v nad fluidní vrstvou (12).....	60
Obrázek 3-8 Q-t spalin pro vybrané přebytky vzduchu.....	66
Obrázek 3-9 Vypočtené teploty na konci ohniště v závislosti na parním výkonu pro kotel K5 .....	83
Obrázek 3-10 Vypočtené teploty na konci ohniště v závislosti na parním výkonu pro kotel K6 .....	84
Obrázek 3-11a Citlivost teploty na konci ohniště v závislosti na změně teploty vody na EKO pro kotel K5 .....	85
Obrázek 3-12 Citlivost teplot na konci ohniště na změnu paliva pro kotel K5 .....	87

Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplárna Komořany

---

Obrázek 3-13 Citlivost teplot na konci ohniště na změnu paliva pro kotel K6 .....	87
Obrázek 3-15 Srovnání jednotlivých teplotních úrovní v ohništi pro kotel K5.....	88
Obrázek 3-14 Srovnání jednotlivých teplotních úrovní v ohništi pro kotel K6.....	88
Obrázek 3-16 Potřebná maximální účinnost denitrifikace pod limity 200mg.Nm <sup>-3</sup> a 170 mg.Nm <sup>-3</sup> pro kotel K5 .....	90
Obrázek 3-17 Potřebná maximální účinnost denitrifikace pod limity 200mg.Nm <sup>-3</sup> a 170 mg.Nm <sup>-3</sup> pro kotel K6 .....	91
Obrázek 3-18 Vliv teplot na účinnost denitrifikace (16) (11).....	92
Obrázek 3-19 Porovnání maximální potřebně denitrifikace se střední dosažitelnou denitrifikací při teplotách nad fluidní vrstvou v závislosti na parním výkonu pro kotel K5.....	93
Obrázek 3-20 Porovnání maximální potřebně denitrifikace se střední dosažitelnou denitrifikací při teplotách nad fluidní vrstvou v závislosti na parním výkonu pro kotel K6.....	94
Obrázek 3-21 Předpokládaná spotřeba reagentu při NSR=2 a NSR=1,5 pro maximální potřebnou denitrifikaci. ....	98
Obrázek 3-22 Předpokládaná průměrná spotřeba aditiva pro všechny funkční kotle TKY dle provozních hodin za rok 2016 a NSR=2.....	100
Obrázek 3-23 Předpokládaná průměrná spotřeba aditiva pro všechny funkční kotle TKY dle provozních hodin za rok 2016 a NSR=1,5.....	100
Obrázek 5-1 Vývoj množství vstřiku v závislosti na parním výkonu pro kotel K5 .....	105
Obrázek 5-2 Vývoj množství vstřiku v závislosti na parním výkonu pro kotel K6 .....	105
Obrázek 5-3 Spotřeba reagentu pro dílčí výkonové úrovně .....	106
Obrázek 5-4 Spotřeba reagentu při NSR=2 na kotlích TKYI pro provozní hodiny kotlů za rok 2016.....	106
Obrázek 5-5 Spotřeba reagentu při NSR=2 na kotlích TKY II pro provozní hodiny kotlů za rok 2016.....	107
Obrázek 5-6 Spotřeba reagentu při NSR=1,5 na kotlích TKYI pro provozní hodiny kotlů za rok 2016.....	107
Obrázek 5-7 Spotřeba reagentu při NSR=1,5 na kotlích TKYII pro provozní hodiny kotlů za rok 2016 .....	108

## 8 Tabulková příloha k vyhodnocení ověření regresivních závislostí analyzátorů plynů dle ČSN EN 14 181

### Výsledky měření pro test AST (NO)

Tabulka 8-1 Výsledky měření pro test AST (NO)

Pořadové číslo měření [i]	Doba měření	Výsledky NRM	Signál AMS
	h.d.m.r.	$y_i$ [mg/m <sup>3</sup> ]	$x_i$ [mA]
1	16:00, 7.12.2016	112	5,45
2	17:00, 7.12.2016	93	5,22
3	18:00, 7.12.2016	92	5,23
4	6:00, 8.12.2016	95	5,27
5	7:00, 8.12.2016	115	5,50
6	8:00, 8.12.2016	98	5,31

### Výsledky NRM v průběhu AST přepočítané na normální stav (NO)

Tabulka 8-2 Výsledky NRM

Pořadové číslo měření [i]	Výsledky NRM	Obsah O <sub>2</sub> v suchém plynu	Výsledky NRM za normálního stavu
	$y_i$ [mg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>i</sub> [%]	$y_{i,s}$ [mg/m <sup>3</sup> ]*
1	112	5,8	110
2	93	5,6	91
3	92	5,7	90
4	95	6,2	96
5	115	6,1	116
6	98	5,7	96

\*) Koncentrace škodliviny ve spalinách vztažená na suché spaliny při teplotě 0°C a tlaku 101,325 kPa a ref. Obsahu O<sub>2</sub> = 6 %.

$$y_{i,s} = y_i \cdot \frac{(21 - O_s)}{(21 - O)}$$

o obsah kyslíku v suchém plynu (objemový zlomek)

$O_s$  referenční obsah kyslíku

Z tabulky 3.2 vyplývá, že maximální a minimální hodnota přepočtená na normální podmínky činí:

$$y_{i,sMIN} = 90 \text{ mg/m}^3$$

$$y_{i,sMAX} = 116 \text{ mg/m}^3$$

Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou za standardních podmínek je dán vztahem:

$$\Delta y_{sMAX} = (y_{i,sMAX} - y_{i,sMIN})$$

$$= 116 \text{ mg/m}^3 - 90 \text{ mg/m}^3$$

$$= 26 \text{ mg/m}^3$$

### Výsledky ročního ověření AMS (NO)

Tabulka 8-3 Výsledky ročního ověření AMS (NO)

Pořadové číslo měření [i]	Signál AMS	Výsledky NRM	Výsledky AMS
	$x_i$ [mA]	$y_i$ [mg/m <sup>3</sup> ]	$\hat{y}_{i,s}$ [mg/m <sup>3</sup> ]
1	5,45	112	121
2	5,22	93	101
3	5,23	92	+02
4	5,27	95	106
5	5,50	115	125
6	5,31	98	109

### Výsledky měření AMS v průběhu AST přepočtené na normální stav (NO)

Tabulka 8-4 Výsledky měření AMS

Pořadové číslo měření [i]	Výsledky NRM	Obsah O <sub>2</sub> v suchém plynu	Výsledky AMS za normálního stavu
	$\hat{y}_i$ [mg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>i</sub> [%]	$\hat{y}_{i,s}$ [mg/m <sup>3</sup> ]*
1	121	5,8	119
2	101	5,6	98
3	102	5,7	100
4	106	6,2	107
5	125	6,1	126
6	109	5,7	107

\*) Koncentrace škodliviny ve spalínách vztažená na suché spaliny při teplotě 0°C a tlaku 101,325 kPa a ref. obsahu O<sub>2</sub> = 6 %.

$$\hat{y}_{i,s} = \hat{y}_i \cdot \frac{(21 - O_s)}{(21 - O)}$$

o obsah kyslíku v suchém plynu (objemový zlomek)

o<sub>s</sub> referenční obsah kyslíku

### Výsledky přepočtené na normální stav použité pro test variability (NO)

Tabulka 8-5 Výsledky přepočtené na normální stav

Pořadové číslo měření [i]	Výsledky AMS za n.s.	Výsledky NRM za n.s.	Rozdíl	Rozdíl	Čtverec rozdílů
	$\hat{y}_{i,s}$ [mg/m <sup>3</sup> ]*	$y_{i,s}$ [mg/m <sup>3</sup> ]*	$D_i = y_{i,s} - \hat{y}_{i,s}$	$D_i - D_{prum}$	$(D_i - D_{prum})^2$
1	119	110	-9	0,67	0,44
2	98	91	-7	2,67	7,11
3	100	90	-10	-0,33	0,11
4	107	96	-11	-1,33	1,78
5	126	116	-10	-0,33	0,11
6	107	96	-11	-1,33	1,78
Průměr			-9,6667		
Součet					11,33

## 9 Tabulková příloha

Tabulka 9-1 Výsledky citlivosti teploty na konci ohniště na změnu teploty vody za ekonomizérem K6

Mpp = 110t/h				
$t_{nv-eko}$	$I_{nv-eko}$	$\Delta I_s$	$I_{ok}$	$t_{ok}$
[°C]	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	[°C]
213,0	913,5	8694,3	5193,7	640
209,0	895,4	8704,3	5183,7	639
205,0	877,4	8714,4	5173,6	638
201,0	859,6	8724,4	5163,6	637
197,0	841,7	8734,3	5153,7	636
193,0	824,0	8744,3	5143,7	634
189,0	806,3	8754,1	5133,9	633
185,0	788,7	8764,0	5124,0	632
181,0	771,2	8773,8	5114,2	631
177,0	753,7	8783,6	5104,4	630
173,0	736,3	8793,3	5094,7	629

Tabulka 9-2 Výsledky citlivosti teploty na konci ohniště na změnu teploty vody za ekonomizérem K5

Mpp = 110t/h				
$t_{nv-eko}$	$I_{nv-eko}$	$\Delta I_s$	$I_{ok}$	$t_{ok}$
[°C]	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	[°C]
213	913,5	8982,6	4994,7	698
209	895,4	8993,1	4984,2	697
205	877,4	9003,5	4973,8	695
201	859,6	9013,9	4963,4	694
197	841,7	9024,2	4953,1	693
193	824,0	9034,5	4942,8	691
189	806,3	9044,8	4932,5	690
185	788,7	9055,0	4922,3	689
181	771,2	9065,2	4912,1	688
177	753,7	9075,3	4902,0	686
173	736,3	9085,4	4891,9	685



## Možnosti redukce NOx teplárna Komořany

Tabulka 9-3 Výpočet teplot na konci ohniště v závislosti na parním výkonu, teplota ve spalovací komoře a teplota nad fluidní vrstvou K5

$M_{pp}$ [t.h <sup>-1</sup> ]	$M_v$ [t.h <sup>-1</sup> ]	$M_{pal}$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	$M_o$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	$\Delta I_s$ [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	$I_{ok}$ [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	$t_{ok}$ [°C]	$t_{sk}$ [°C]	$t_{nadFV}$ [°C]
122	1,79	7,915	4,00	8773	5114,87	639	732	839
120	1,95	7,788	4,00	8761	5127,36	640	733	839
118	1,99	7,662	4,00	8755	5132,67	641	733	839
116	1,88	7,535	4,00	8762	5125,90	640	733	839
114	1,68	7,409	4,00	8775	5113,30	638	732	840
112	1,48	7,283	4,00	8788	5100,26	637	732	841
110	1,33	7,156	4,00	8799	5089,44	636	731	841
108	1,24	7,03	4,00	8804	5084,23	635	731	841
106	1,21	6,903	4,00	8806	5082,41	635	730	840
104	1,18	6,777	4,00	8806	5081,82	635	730	839
102	1,13	6,651	4,00	8808	5079,52	635	729	837
100	1,04	6,524	4,00	8816	5072,38	634	728	835
98	0,92	6,398	4,00	8824	5063,79	633	727	834
96	0,80	6,271	4,00	8834	5053,55	632	726	833
94	0,73	6,145	4,00	8840	5048,04	631	725	833
92	0,72	6,018	4,00	8841	5047,13	631	725	833
90	0,78	5,892	4,00	8834	5054,02	632	726	833
88	0,86	5,766	4,00	8824	5064,02	633	726	833
86	0,91	5,639	4,00	8819	5068,95	634	726	832
84	0,85	5,513	4,00	8823	5064,57	633	725	831
82	0,65	5,386	4,00	8844	5044,38	631	724	830
80	0,39	5,26	4,00	8870	5018,32	628	722	830

Možnosti redukce NO<sub>x</sub> teplárna Komořany

Tabulka 9-4 Výpočet teplot na konci ohniště v závislosti na parním výkonu, teplota ve spalovací komoře a teplota nad fluidní vrstvou K6

M <sub>pp</sub> [t.h <sup>-1</sup> ]	M <sub>v</sub> [t.h <sup>-1</sup> ]	M <sub>pal</sub> [kg.s <sup>-1</sup> ]	M <sub>o</sub> [kg.s <sup>-1</sup> ]	ΔI <sub>s</sub> [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	I <sub>ok</sub> [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	t <sub>ok</sub> [°C]	t <sub>sk</sub> [°C]	t <sub>nadFV</sub> [°C]
150	6,48	9,328	4,00	8864,87	5112,13	713	773	838
148	6,17	9,206	5,00	8879,01	5097,99	712	772	836
146	5,91	9,084	6,00	8890,45	5086,55	710	771	837
144	5,68	8,963	7,00	8899,35	5077,65	709	771	838
142	5,47	8,841	8,00	8908,24	5068,76	708	771	839
140	5,28	8,719	9,00	8916,09	5060,91	707	771	841
138	5,09	8,597	10,00	8924,17	5052,83	706	771	841
136	4,92	8,476	11,00	8930,12	5046,88	705	770	841
134	4,75	8,354	12,00	8937,30	5039,70	704	769	841
132	4,58	8,232	13,00	8944,69	5032,31	703	769	841
130	4,42	8,11	14,00	8951,62	5025,38	702	768	840
128	4,25	7,989	15,00	8958,35	5018,65	701	767	840
126	4,09	7,867	16,00	8965,71	5011,29	700	766	839
124	3,93	7,745	17,00	8973,29	5003,71	699	765	838
122	3,76	7,623	18,00	8981,85	4995,15	698	765	838
120	3,60	7,501	19,00	8989,95	4987,05	697	764	837
118	3,43	7,38	20,00	8997,86	4979,14	696	763	837
116	3,27	7,258	21,00	9006,50	4970,50	695	763	837
114	3,10	7,136	22,00	9016,21	4960,79	694	762	837
112	2,94	7,014	23,00	9025,47	4951,53	693	762	837
110	2,77	6,893	24,00	9034,56	4942,44	691	761	837
108	2,60	6,771	25,00	9045,30	4931,70	690	760	837
106	2,44	6,649	26,00	9055,60	4921,40	689	759	837
104	2,28	6,527	27,00	9066,29	4910,71	687	758	836
102	2,12	6,406	28,00	9075,97	4901,03	686	757	836
100	1,96	6,284	29,00	9087,46	4889,54	685	757	836
98	1,81	6,162	30,00	9098,50	4878,50	683	755	835
96	1,67	6,04	31,00	9109,07	4867,93	682	755	835
94	1,53	5,918	32,00	9120,07	4856,93	680	753	834
92	1,40	5,797	33,00	9129,01	4847,99	679	753	834
90	1,29	5,675	34,00	9137,96	4839,04	678	752	834
88	1,18	5,553	35,00	9147,30	4829,70	677	751	833
86	1,08	5,431	36,00	9156,04	4820,96	676	750	833
84	1,00	5,31	37,00	9161,37	4815,63	675	750	833
82	0,93	5,188	38,00	9167,19	4809,81	674	749	833
80	0,88	5,066	39,00	9172,30	4804,70	673	749	833
78	0,83	4,994	40,00	9084,95	4892,05	675	750	834
76	0,80	4,823	41,00	9176,91	4800,09	673	749	834
74	0,78	4,701	42,00	9178,40	4798,60	672	749	834
72	0,77	4,579	43,00	9178,63	4798,37	672	749	835
70	0,77	4,457	44,00	9177,75	4799,25	672	749	835

## Možnosti redukce NOx teplárna Komořany

Tabulka 9-5 Spotřeba reagentu při použití NSR=2

NSR=2					
NOX_IN (3% O2)	M <sub>pp</sub>	M <sub>pal</sub>	Q <sub>B</sub>	η <sub>DENOX_SNCR</sub>	M <sub>reag</sub>
[Mg.Nm <sup>-3</sup> ]	[t.h <sup>-1</sup> ]	[kg.s <sup>-1</sup> ]	[MMBtu.h <sup>-1</sup> ]	[-]	[kg.h <sup>-1</sup> ]
223,71	150,00	9,33	432,33	0,22	21,67
235,27	148,00	9,21	426,68	0,21	21,58
240,40	146,00	9,08	421,02	0,22	22,47
241,71	144,00	8,96	415,42	0,22	22,50
241,09	142,00	8,84	409,76	0,23	22,53
239,79	140,00	8,72	404,11	0,24	22,98
238,60	138,00	8,60	398,45	0,24	22,54
237,95	136,00	8,48	392,84	0,24	22,16
238,00	134,00	8,35	387,19	0,24	21,85
238,70	132,00	8,23	381,54	0,24	21,59
239,92	130,00	8,11	375,88	0,23	21,02
241,44	128,00	7,99	370,27	0,23	20,84
243,01	126,00	7,87	364,62	0,23	20,21
244,43	124,00	7,75	358,96	0,22	19,66
245,50	122,00	7,62	353,31	0,22	19,43
246,09	120,00	7,50	347,66	0,22	19,00
246,14	118,00	7,38	342,05	0,22	18,69
245,62	116,00	7,26	336,39	0,22	18,35
244,59	114,00	7,14	330,74	0,22	17,96
243,12	112,00	7,01	325,08	0,22	17,55
241,38	110,00	6,89	319,48	0,22	17,12
239,50	108,00	6,77	313,82	0,22	16,69
237,67	106,00	6,65	308,17	0,22	16,26
236,08	104,00	6,53	302,51	0,21	15,35
234,89	102,00	6,41	296,90	0,21	14,99
234,24	100,00	6,28	291,25	0,21	14,67
234,24	98,00	6,16	285,60	0,21	14,11
234,98	96,00	6,04	279,94	0,21	13,88
236,48	94,00	5,92	274,29	0,21	13,42
238,72	92,00	5,80	268,68	0,21	13,27
241,64	90,00	5,68	263,02	0,21	13,15
245,12	88,00	5,55	257,37	0,20	12,80
249,03	86,00	5,43	251,72	0,20	12,72

## Možnosti redukce NOx teplotna Komořany

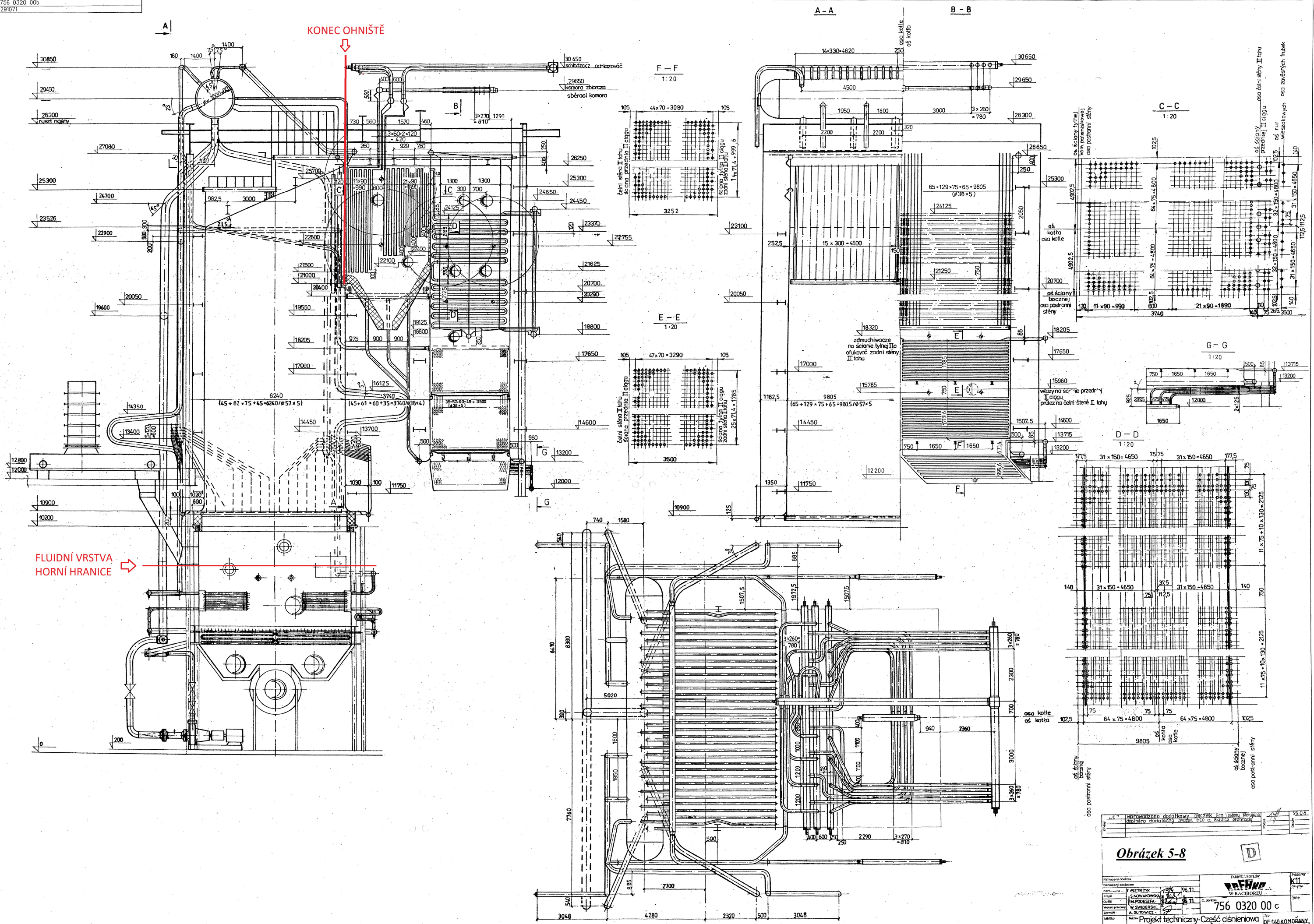
Tabulka 9-6 Spotřeba reagentu při použití NSR=1,5

NSR=1,5					
NOX_IN (3% O2)	M <sub>pp</sub>	M <sub>pal</sub>	Q <sub>B</sub>	η <sub>DENOX_SNCR</sub>	M <sub>reag</sub>
[Mg.Nm <sup>-3</sup> ]	[t.h <sup>-1</sup> ]	[kg.s <sup>-1</sup> ]	[MMBtu.h <sup>-1</sup> ]	[-]	[kg.h <sup>-1</sup> ]
223,71	150,00	9,33	432,33	0,20	14,58
235,27	148,00	9,21	426,68	0,19	14,37
240,40	146,00	9,08	421,02	0,20	14,87
241,71	144,00	8,96	415,42	0,20	15,13
241,09	142,00	8,84	409,76	0,21	15,26
239,79	140,00	8,72	404,11	0,21	15,63
238,60	138,00	8,60	398,45	0,21	15,33
237,95	136,00	8,48	392,84	0,21	15,07
238,00	134,00	8,35	387,19	0,21	14,86
238,70	132,00	8,23	381,54	0,21	14,69
239,92	130,00	8,11	375,88	0,21	14,27
241,44	128,00	7,99	370,27	0,21	14,15
243,01	126,00	7,87	364,62	0,21	13,69
244,43	124,00	7,75	358,96	0,20	13,22
245,50	122,00	7,62	353,31	0,20	13,07
246,09	120,00	7,50	347,66	0,20	12,57
246,14	118,00	7,38	342,05	0,20	12,37
245,62	116,00	7,26	336,39	0,20	12,14
244,59	114,00	7,14	330,74	0,20	11,89
243,12	112,00	7,01	325,08	0,20	11,61
241,38	110,00	6,89	319,48	0,20	11,33
239,50	108,00	6,77	313,82	0,20	11,04
237,67	106,00	6,65	308,17	0,20	10,76
236,08	104,00	6,53	302,51	0,19	10,22
234,89	102,00	6,41	296,90	0,19	9,98
234,24	100,00	6,28	291,25	0,19	9,77
234,24	98,00	6,16	285,60	0,19	9,38
234,98	96,00	6,04	279,94	0,19	9,22
236,48	94,00	5,92	274,29	0,18	8,85
238,72	92,00	5,80	268,68	0,18	8,75
241,64	90,00	5,68	263,02	0,18	8,67

## 10 Citovaná literatura

1. **prostředí, Ministerstvo životního.** Vyhláška č. 415/2012 Sb. *Vyhláška o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.* Praha : autor neznámý, 2012.
2. **mgr inž. Ryszard Gorlach, mgr inž. Marek Mikolajewski, Andrzej Rusicki, mgr inž. Jacek Walawski.** PROVOZNÍ INSTRUKCE. 44-107 Gliwice, ul. Kozielska 18, Skr. poczt. 15 : Energotechnika\*Energorozruch S.A., 2002.
3. **Vilímc, Ladislav.** *Stavba kotlů. 1.* Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1997-1999. ISBN 80-7078-681-72..
4. **Mareš, Bc. Petr.** <https://dspace.cvut.cz/>. [Online] červen 2015. [Citace: 15. 4 2017.] [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63366/F2-BP-2015-Mares-Petr-BP-Mares-FINE\\_No.2O2.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63366/F2-BP-2015-Mares-Petr-BP-Mares-FINE_No.2O2.pdf?sequence=-1).
5. **Švachula, Jiří.** *Množnosti snížení produkce NOx.* Pardubice : EKONOX, 2012.
6. *Teil end SCR plants for coal fired powewr plants: transforming challanges to opportunities.* **Orehovsky, Kurt.** místo neznámé : IBIDEN, 2016.
7. **J., Bernd.** *pennwell.com.* [Online] 2013. [Citace: 27. 12 2016.] <http://pennwell.sds06.websds.net/2013/vienna/pge/papers/T4S6O4-paper.pdf>.
8. **Mussatti, Daniel C.** *epa.gov.* [Online] October 2000. [Cited: 1 20, 2017.] [https://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/c\\_allchs.pdf](https://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/c_allchs.pdf). EPA/452/B-02-001 .
9. **Mehldau & Steinfath Umwelttechnik GmbH.** *ms-umwelt.de.* [Online] [Citace: 15. 4 2017.] [http://www.ms-umwelt.de/downloads/Das\\_SNCR-Verfahren\\_-\\_Verfahrenstechnische\\_Grundlagen.pdf](http://www.ms-umwelt.de/downloads/Das_SNCR-Verfahren_-_Verfahrenstechnische_Grundlagen.pdf).
10. **Malý, Ing. Rostislav.** *Konzultace diplomové práce.* Brno : Orgrez a.s., 2017.
11. **Quan Wang, Qingcheng Wang, Jianjun Cai.** *jocpr.com.* [Online] 2014. [Cited: 4 3, 2017.] <http://www.jocpr.com/articles/experimental-study-of-urea-on-sncr-removal-of-nox.pdf>. ISSN : 0975-7384 .
12. **Mareš, Ing. Petr.** *Provozní a technické podklady teplárna UE Komořany a.s. . Komořany : teplárna UE Komořany a.s., 2017.*
13. **ČSN EN 14181 (834780).** *Stacionární zdroje emisí – Prokazování kvality automatizovaných měřicích systémů. 1. 7 2016. 500286.*
14. **DLOUHÝ, Tomáš.** *Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3.* Praha : Nakladatelství ČVUT,, 1999. ISBN 978-80-0103757-7.
15. *Rozbor současného stavu – najíždění/ stabilní provoz/ trend a dynamika změny/ dosažitelnost výkonu/provozuschopnost výkonu.* Doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc., Prof. Ing. František Hrdlička, CSc., Doc. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D. Praha : Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2017.
16. **Marek Pronobis, Robert Wejkowski, Katarzyna Jagodzińska, Tomasz Kress.** *e3s-conferences.org.* [Online][Citace:20.52017.][https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/02/e3sconf\\_ef2017\\_02003.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/02/e3sconf_ef2017_02003.pdf).





**Obrázek 5-8**

Wprowadzono dodatkowy pasek frazowym kampanie reklamowej - oddzielny arkusz, prosze o sklonienie przy odbiorze.		92 UB
Nazwa obiektu: <b>PRACZNA KOTLOWA</b>		Pracownia: <b>K11</b>
Nazwa wykonawcy: <b>PIETRZYK</b>		Grupa: <b>W RACIBORZU</b>
Data: <b>19.11.11</b>		Skala: <b>1:50</b>
Człowiek: <b>MLPODESKA</b>		Projekt: <b>756 0320 00 c</b>
Miejscowość: <b>W RACIBORZU</b>		Opis: <b>Pracownia kotlowa - Tłakowa część</b>
Lp. rysunku: <b>1</b>		Opis: <b>Pracownia kotlowa - Tłakowa część</b>

306308



# FLUIDNÍ KOTEL SE STACIONÁRNÍM LOŽEM OF-140

Teplárna Komořany – Česká republika

BUBBLING FLUIDIZED BED BOILER OF-140

Komořany CHP Plant – Czech Republic

GENERÁLNÍ ZHOTOVITEL INVESTICE  
• GENERAL CONTRACTOR

**Elektrim**  
Energetyka

Elektrim – Energetyka SA, 00-950 Warszawa, ul. Chałubińskiego 8, Poland  
tel. (+48/22) 830 21 42, fax (+48/22) 830 05 70, <http://www.elektrim.pl>

PROJEKT A VÝROBA KOTLE  
• BOILER DESIGN AND MANUFACTURE

**RAFAKO**

Fabryka Kotłów RAFAKO SA, 47-400 Racibórz, ul. Łąkowa 33, Poland  
tel. (+48/32) 410 10 00, fax (+48/32) 415 34 27, <http://www.rafako.com.pl>

INWESTOR • CUSTOMER



První Severozápadní Teplárenská a.s.,  
Komořany u Mostu, 434-03 Most 3, Czech Republic  
tel. (+420/35) 317 111, fax (+420/35) 22 759, <http://www.ps2.cz>

## TECHNICKÉ ÚDAJE KOTLE • BOILER TECHNICAL DATA

– jmenovitý výkon • rated output	103.4 MWt
– maximální výkon kotle trvalý • max. continuous rating	39.0 kg/s
– min. výkon kotle trvalý (se základním palivem) • min. continuous rating (without oil support)	19.5 kg/s
– teplota přehřáté páry • outlet steam temperature	490 °C
– maximální teplota přehřáté páry • max. outlet steam temperature	500 °C
– tlak přehřáté páry • outlet steam pressure	7.5 MPa
– maximální rychlost změny výkonu kotle • max rate of output change	2% menovitého výkonu 2% of rated output
– účinnost kotle brutto při jmenovitém výkonu • gross boiler efficiency at rated output	91.5 %
– počet kotlů • number of units	5

## ZARUČENÉ MAXIMÁLNÍ EMISE\* • GUARANTEED MAX EMISSION LEVELS\*

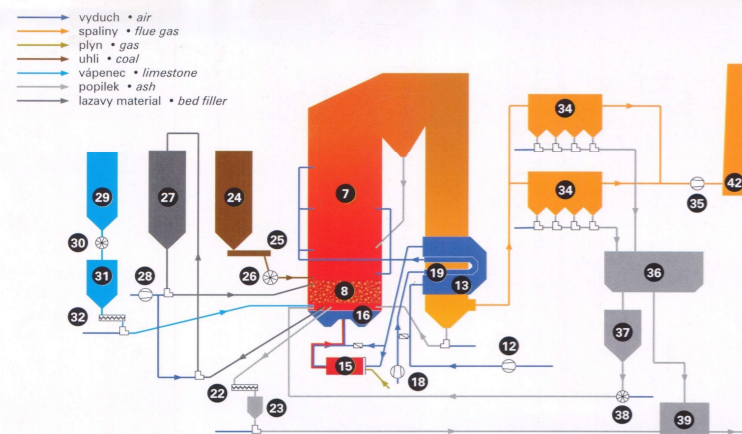
– oxid siřičitý (SO <sub>2</sub> ) • sulfur oxide	500 mg/Nm <sup>3</sup>
– oxidy dusíku (NO <sub>x</sub> ) • nitrogen oxides	400 mg/Nm <sup>3</sup>
– oxid uhelnatý (CO) • carbon monoxide	250 mg/Nm <sup>3</sup>
– tuhé emise (polévatý popílek) • solid emission (fly-ash)	50 mg/Nm <sup>3</sup>

\*) přepočteno na suché spaliny pro obsah kyslíku 6%  
• calculated per 6% oxygen content in dry flue gases

## CHARAKTERISTIKA UHLÍ PODLE KONTRAKTU • CONTRACT COAL DATA

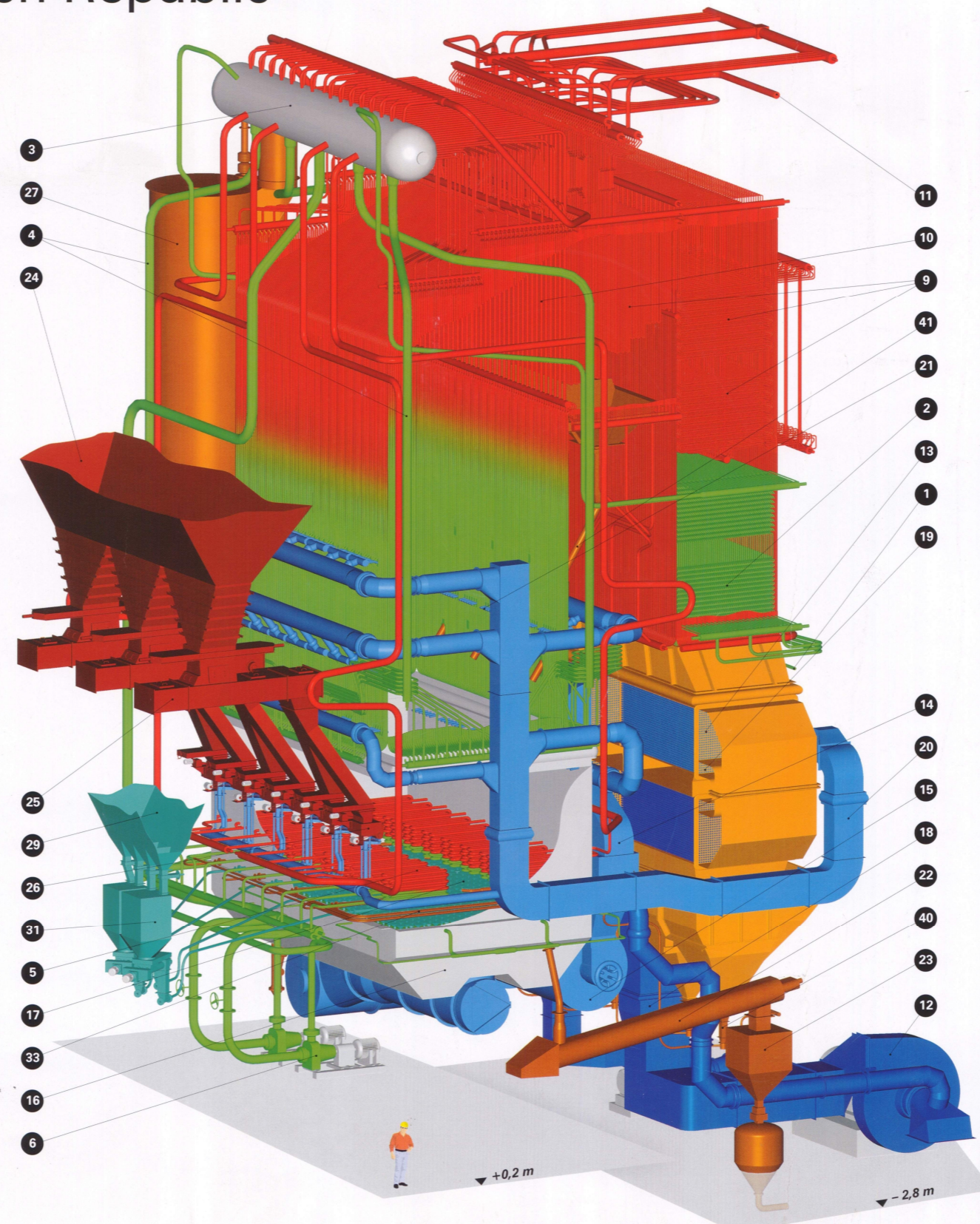
druh – uhlí hnědé • brown coal	
– výhřevnost • net calorific value	9,5 – 15 MJ/kg
– obsah popelovin • ash content	19 – 30 %
– obsah vody • water content	25 – 33 %
– obsah celkové síry v sušině • sulfur content in dry condition	1,1 – 2,7 %

## SCHÉMA SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ • FIRING SYSTEM DIAGRAM



## LEGENDA • DESCRIPTION

1. vstup napájecí vody • feed water inlet
2. ohřívák vody • economizer
3. buben • drum
4. spádové trubky • downcomers
5. cirkulační okruh • circulation bundle
6. čerpadla cirkulačního okruhu • circulation bundle pumps
7. spalovací komora • furnace (afterburning) chamber
8. komora fluidního lože • fluidizing chamber
9. přehřívák páry I. a II. stupeň • convection 1st and 2nd stage superheater
10. přehřívák páry III. stupeň • outlet superheater
11. kolektor výstupní páry z kotle • live steam collector
12. ventilátor primárního vzduchu • primary air fan
13. trubkový ohřívák primárního vzduchu • primary air tubular-type heater
14. kanál primárního vyduchu • primary air duct
15. plynový hořák se spalovací komorou • gas burner with combustion chamber
16. dolní část základny lože • air box
17. fluidizační trysky • fluidizing nozzles
18. ventilátor sekundárního vzduchu • secondary air fan
19. ohřívák sekundárního vzduchu • tubular-type air heater
20. kanály sekundárního vzduchu • secondary air duct
21. trysky sekundárního vzduchu (dýzy OFA) • OFA nozzles
22. šnekový dopravník popele ze dna fluidního lože • bottom ash feeding screw
23. mezzásobník popele ze dna fluidního lože • bottom ash intermediate tank
24. uhelný zásobník • coal bunker
25. hřeblový podavač uhlí • coal scraper belt conveyor
26. pohazovače uhlí • coal pushers
27. zásobník ložového materiálu • bed filler silo
28. dmýchadlo vzduchu pro dopravu ložového materiálu • bed filler transportation blower
29. zásobník vápence • limestone storage silo
30. komůrkové dávkovače vápence • batch feeders
31. mezzásobník vápence • limestone interstage storage silo
32. šnekový podavač vápencové moučky • limestone feeding screws
33. prodlužovací trubky vápence a popílku • limestone and ash lances
34. látkový filtr • bag filter
35. kourův ventilátor • flue gas fan
36. zásobník popílku z látkového filtru • bag filter ash silo
37. mezzásobník popílku z látkového filtru • bag filter ash interstage silo
38. komůrkový podavač popílku z látkového filtru • bag filter ash batch feeder
39. retenční zásobník popele • ash storage silo
40. zařízení pro návrat popílku z II. tahu • boiler 2nd pass ash transportation system
41. zařízení pro návrat popílku z mezzitahu • ash reversal system from interstage hoppers
42. komín • stack



Obrázek 5-9