

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2017

**LENKA
ŠINDELÁŘOVÁ**



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: Bc. Lenka ŠINDELÁŘOVÁ

program: Strojní inženýrství

obor: Energetika

Název tématu: Studie vlivu recirkulace spalin na tepelnou bilanci ohniště a plynné emise při spalování biomasy

Title: Investigation of flue gas recirculation effect on thermal balance and gaseous emissions in biomass combustion

Práce bude obsahovat:

- 1) zpracování literární rešerše zaměřené na spalování biomasy a tvorbu emisí
- 2) tvorba kódu pro výpočet tepelné bilance ohniště v prostředí Matlab
- 3) návrh postupu experimentálního ověření
- 4) realizace experimentů
- 5) vyhodnocení a zpracování dat, formulace závěrů

Rozsah grafických prací: ---

Rozsah průvodní zprávy: ---

Seznam odborné literatury:

van Loo-Koppejan: Handbook of biomass combustion and co-firi

Lackner-Winter-Agarwal: Handbook of combustion

Dlouhý: Výpočty kotlů a spalinových výměníků

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.

Konzultant/i:

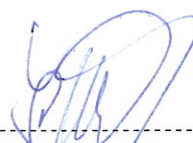
Datum zadání diplomové práce: 27. 10. 2016

Datum odevzdání diplomové práce: 11. 1. 2017

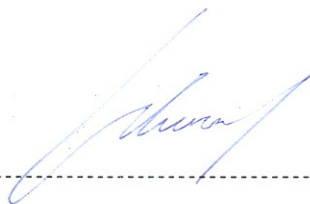
Neodevzdá-li student/ka bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student/ka zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Posluchač/ka bere na vědomí, že je povinen/povinna vypracovat bakalářskou nebo diplomovou práci samostatně bez cizí pomoci s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské nebo diplomové práci.

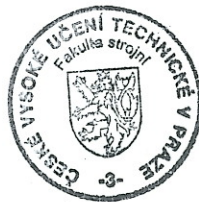
Zadání diplomové práce převzal dne:



student/ka



doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
vedoucí Ú 12115



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 27. 10. 2016

Anotační list

Jméno autora	Lenka Šindelářová
Název DP	Výzkum vlivu recirkulace spalin na emise plynných znečišťujících látek při spalování biomasy
Anglický název:	Investigation of flue gas recirculation effect on emission of pollutants in biomass combustion
Akademický rok:	2016/2017
Ústav:	Energetika
Vedoucí DP:	Doc. Ing. Jan Hrdlička Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 74 Počet obrázků: 42 Počet tabulek: 24 Počet příloh: 1x CD, 9xA4
Klíčová slova:	biomasa, spalování, emise, recirkulace spalin, tepelná bilance ohniště
Keyword:	biomass, combustion, emissions, flue gas recirculation, energy balance

Anotace:

Diplomová práce se zabývá problematikou spalování biomasy v roštovém kotli o výkonu 100 kW. Cílem práce je studium recirkulace spalin odebíraných za kotlem a jejím přidání do primárního a sekundárního vzduchu kotle, a její vliv na změnu emisí hlavních znečišťujících látek CO a NO_x, tepelnou účinnost kotle, a na tepelnou bilanci spalovací komory. V práci byly provedeny experimenty, během kterých byly testovány různé recirkulační poměry při konstantním tepelném příkonu kotle. Byl rovněž vytvořen numerický model pro výpočet teploty na konci ohniště, výsledky tohoto modelu jsou porovnány s reálně měřenými hodnotami. Vliv recirkulace spalin na emise znečišťujících látek je vyhodnocen ve vztahu k platným emisním limitům v ČR a minimálním emisním požadavkům.

Abstract:

This diploma thesis deals with a combustion of biomass in the boiler with an output of 100 kW. The aim of this work is the study of flue gas recirculation into primary and secondary air and its impact on emissions of CO and NO_x, thermal efficiency, and heat balance of the combustion chamber. In this work, experiments were performed in order to test different recirculation ratios at constant heat input of the boiler. The numerical model was developed and the temperature at the end of the combustion chamber was calculated. The results of this model were compared to the real measured values. The influence of flue gas recirculation on the emissions of pollutants was assessed against the emission limits and minimum emissions requirements valid in the Czech Republic.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „VÝZKUM VLIVU RECIRKULACE SPALIN NA EMISE PLYNNÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK PŘI SPALOVÁNÍ BIOMASY“ vypracovala samostatně pod vedením Doc. Ing. Jan Hrdličky Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použitých zdrojů.

V Praze

Lenka Šindelářová

Poděkování

Ráda bych poděkovala Doc. Ing. Hrdličkovi Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

Obsah

1.	Úvod.....	8
2.	Rešeršní část.....	9
2.1	Definice biomasy dle české legislativy.....	9
2.2	Rozdělení biomasy.....	9
2.2.1	Fytomasa – zemědělská biomasa.....	9
2.2.2	Dendromasa – lesní biomasa.....	9
2.2.3	Sekundární biomasa – zbytková biomasa.....	9
2.3	Složení biomasy.....	10
2.3.1	Složení prvkové.....	10
2.3.2	Hrubý rozbor paliva.....	10
2.4	Spalovací proces.....	14
2.4.1	Obecné spalování.....	14
2.4.2	Přebytek vzduchu.....	14
2.5	Emise ze spalování biomasy.....	15
2.5.1	Oxid uhličitý.....	16
2.5.2	Oxid uhelnatý.....	16
2.5.3	Oxidy dusíku.....	16
2.5.4	Druhy oxidů dusíku.....	20
2.6	Opatření pro snížení emisí NO _x	24
2.6.1	Primární opatření.....	24
2.6.2	Sekundární opatření.....	25
3.	Výpočtová část.....	27
3.1	Výhřevnost paliva.....	27
3.2	Stechiometrické výpočty.....	27
3.3	Tepelná účinnost kotle.....	32
3.4	Zjednodušený tepelný výpočet ohniště.....	33
3.5	Teplota spalin na výstupu z ohniště.....	36
4.	Praktická část.....	37
4.1	Popis experimentu.....	37
4.1.1	Popis kotle.....	37
4.1.2	Palivo.....	40

4.1.3	Metodika experimentů.....	41
4.2	Naměřené hodnoty.....	43
4.3	Výsledky.....	47
5.	Diskuze.....	54
6.	Závěr.....	60
7.	Použitá literatura.....	61
8.	Seznam použitých zkratk.....	63
9.	Přílohy.....	66

1. Úvod

Biomasa je pro Českou republiku v současnosti nejdůležitějším obnovitelným zdrojem energie, jehož potenciál je široce využíván, a to především v oblasti vytápění domácností, menších sídelních celků, provozních areálů, a do určité míry také v oblasti kogenerační výroby elektřiny a tepla. V ČR se využívá biomasa jak dřevní, tak i rostlinná, jejíž význam postupně narůstá v souvislosti s podstatným vyčerpáním dostupného potenciálu dřevní biomasy. Technologie, která v současnosti biomasu nejvíce využívá, je přímé spalování.

Přímé spalování je technologicky nejjednodušší přeměnou chemicky vázané energie v biomase na využitelnou tepelnou energii, přináší však s sebou jisté komplikace z hlediska produkce nežádoucích znečišťujících látek, které jsou uvolňovány do ovzduší. Jedná se především o oxid uhelnatý a o oxidy dusíku. V současnosti jsou platné emisní limity na vypouštění těchto látek do ovzduší, pro nejmenší zdroje s tepelným příkonem do 300 kW pak platí minimální emisní požadavky. Současným trendem je zpříšňování těchto emisních limitů, které vyžaduje konstrukční a procesní zásahy do spalovacích systémů s cílem emise těchto znečišťujících látek snižovat. Zároveň s požadavky na snižování emisí existují i požadavky na zvyšování účinnosti těchto spalovacích zařízení. Dochází proto k vývoji technologií a technologických úprav, které umožní nové požadavky splnit.

Tato práce se zabývá jednou z těchto technologií, a to konkrétně odběrem spalin ze spalování biomasy za kotlem a jejich přivedení do spalovacího vzduchu. Tato technologie byla již v minulosti úspěšně aplikována při vysokoteplotním spalování zejména plyných a kapalných paliv, popř. práškového uhlí, ale v procesech spalování biomasy se ukazuje, že její efekt může být podstatně omezenější, než ve zmíněných úspěšných aplikacích. Diplomová práce je proto zaměřena na studium recirkulace spalin při spalování biomasy v roštovém kotli. Je studována problematika přívodu recirkulovaných spalin do primárního a sekundárního vzduchu a její vliv na emise zmíněných znečišťujících látek, aby bylo možné získat reálný kvantifikovaný dopad jejího využití. Z hlediska provozu kotle je pak ještě sledován vliv recirkulace spalin na jeho tepelnou účinnost a na tepelnou bilanci spalovací komory.

2. Rešeršní část

2.1 Definice biomasy dle české legislativy

Biomasa ke spalování je definována vyhláškou 415/2012 Sb. jako produkt, který je tvořen z rostlinného materiálu pocházejícího ze zemědělství nebo lesnictví a který lze použít jako palivo za účelem získání jeho energetického obsahu. [1]

V zákoně 137/2010 Sb. je biomasa popsána jako biologická rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětvích, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a rovněž biologicky rozložitelná část odpadů (průmyslového, komunálního). [2]

2.2 Rozdělení biomasy

2.2.1 Fytomasa – zemědělská biomasa

Fytomasou se rozumí veškerá biomasa pěstovaná na zemědělské půdě. Zemědělská půda je dále rozdělena na ornou půdu, zahrady, ovocné sady, chmelnice, vinice a trvalé travní porosty s příslušnými hektarovými rozlohami. Do zemědělské biomasy patří produkty vypěstované na orné půdě (např. kukuřice, řepka), trvalých travnatých porostech a vedlejší produkty zemědělské výroby (např. sláma, plevy).

Detailní rozdělení fytomasy:

- cíleně pěstovaná biomasa,
- biomasa obilovin a olejnin,
- trvalé travní porosty,
- rychlerostoucí dřeviny pěstované na zemědělské půdě,
- rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny. [3]

2.2.2 Dendromasa – lesní biomasa

Lesní biomasa, neboli dendromasa, zahrnuje palivové dřevo, zbytky z dřevozpracujícího průmyslu a lesní těžařské zbytky dále zpracovávané drcením, štěpkováním, lisováním [3]

2.2.3 Sekundární biomasa – zbytková biomasa

Zbytková biomasa vzniká sekundárně při zpracování primárních zdrojů rostlinné nebo živočišné biomasy.

Základní dělení je dle původu:

- z papírenského průmyslu,
- z potravinářského průmyslu,
- lihovarnické výpalky,
- BRKO (biologicky rozložitelná složka komunálního odpadu),
- z průmyslu zpracování dřeva,

- z živočišného průmyslu,
- čistírenské kaly,
- z ostatního průmyslu. [3]

2.3 Složení biomasy

2.3.1 Složení prvkové

Biomasa se skládá z uhlíku C, vodíku H, kyslíku O, dusíku N a síry S. Obsah uhlíku, vodíku a síry zásadním způsobem ovlivňuje spalovací proces. Tyto prvky patří do skupiny tzv. aktivních prvků. Aktivní prvky jsou nositeli chemicky vázané energie, která se při jejich spalování uvolňuje. Prvky kyslík a dusík se řadí do skupiny pasivních prvků a ovlivňují produkci znečišťujících látek. Procentuální zastoupení těchto prvků se mění dle druhu paliva. Typická složení pro zástupce z řad rostlinné biomasy jsou uvedena v následující tabulce (pro porovnání jsou též uvedeny hodnoty hnědého uhlí). Karbonizovaná paliva mají větší obsah uhlíku a síry. U rostlinné biomasy je zásadní obsah dusíku, dále vodíku a kyslíku. Vzhledem k tomu, že základními stavebními kameny rostlinné biomasy jsou polysacharidy (celulóza, hemicelulóza), je poměrné zastoupení uhlíku, vodíku a kyslíku v hořlavině rostlinné biomasy vždy přibližně stejné, jak je ukázáno v tab. 1. [7] [12] [18]

<i>Prvkové složení paliva</i>						
<i>Palivo</i>	<i>C^{daf}</i>	<i>H^{daf}</i>	<i>O^{daf}</i>	<i>N^{daf}</i>	<i>S^{daf}</i>	<i>V^{daf}</i>
	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>
Dřevo	50,96	6,93	41,75	0,26	0,03	81,9
Seno	50,55	7,56	38,81	2	0,18	80
Hnědé uhlí	64,58	5,71	20,56	1,27	3,35	54

Tab. 1 - Přehled prvkového složení různých vybraných paliv [5]

2.3.2 Hrubý rozbor paliva

Pro biomasu platí výpočty prvkového složení jako pro jiná pevná paliva. Palivo je charakterizováno základními složkami: hořlavinou, popelovinou a vodou. Palivo lze charakterizovat v následujících stavech:

- Původní stav r (as received)
- Bezvodé palivo d (dry)
- Hořlavina daf

Přepočty pro složení paliva při různých stavech (r, d, daf) je uvedené v následující tabulce.

	<i>Původní stav (r)</i>	<i>Bezvodé palivo (d)</i>	<i>Hořlavina (daf)</i>
<i>Původní stav (r)</i>	1	$1/(1 - W^r)$	$1/(1 - A^r - W^r)$
<i>Bezvodé palivo (sušina) (d)</i>	$1 - W^r$	1	$1/(1 - A^d)$
<i>Hořlavina (daf)</i>	$(1 - A^r - W^r)$	$1 - A^d$	1

Tab. 2 - Přepočtové vzorce pro různé stavy paliva [18]

2.3.2.1 Hořlavina

Hořlavina obsahuje aktivní prvky (uhlík, vodík, síra), jejichž oxidací vzniká teplo, a dělí se dále na fixní a prchavou. Obsah prchavé hořlaviny se mění dle typu paliva je vedle prvkového složení a obsahu balastních složek jedním z charakteristických znaků paliva, který ovlivňuje jeho spalovací vlastnosti. Prchavá hořlavina je definována jako množství plynné látky, která se uvolní z jednotkového množství vzorku paliva zahříváním za nepřístupu vzduchu při teplotě 850 °C. Obecně rostlinná biomasa patří mezi paliva s vysokým obsahem prchavé hořlaviny. V následující tabulce je uvedeno srovnání vybraných paliv dle obsahu prchavé hořlaviny.

<i>Podíl prchavé hořlaviny v hořlavině paliva</i>	
<i>Palivo</i>	V^{daf}
	%
Černé uhlí	10 až 45
Hnědé uhlí	45 až 60
Koks	0 až 5
Rašelina	60 až 73
Dřevo	73 až 82
Kůra	až 65
Sláma	až 90

Tab. 3 - Přehled podílů prchavé hořlaviny v hořlavině pro různá paliva [5]

Typické obsahy jednotlivých prvků v hořlavině jsou uvedené v následující tabulce.

<i>Složení hořlaviny pro rostlinnou biomasu</i>					
<i>Palivo</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>
	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>	<i>wt%</i>
Dub	49,48	5,38	43,13	0,35	0,01
Borovice	49,24	5,99	44,36	0,06	0,03
Kůra	56,3	5,6	37,7	0	0
Traviny	48,45	5,85	43,69	0,47	0,01

Tab. 4 - Přehled různých složení vybraných druhů rostlinné biomasy [5]

2.3.2.2 *Voda*

Voda je nejvýznamnější balastní složkou biomasy. Obsah vody ovlivňuje výhřevnost, teplotu spalování, prodlužuje dobu zapálení a objem odcházejících spalin. Voda totiž zvyšuje jejich tepelnou kapacitu a tím zvětšuje jejich objem, taková skutečnost se projeví např. u návrhu kotle. Obsah vody v biomase se může pohybovat ve velmi širokém rozpětí. Čerstvě pokácené dřevo nebo kůra, může obsahovat až 60 % vody. Dvouletým sušením dřeva na vzduchu je možné snížit obsah vody na (10 – 12) %. Obsah vody je nejvíce ovlivněn původem, druhem a stavem rostliny a způsobem zpracování. Obsažená voda v palivu se rozděluje na druhy:

- Přimísená voda – se do paliva dostane při těžbě či skladování na dešti apod., tento typ lze odstranit mechanicky (odkapání, odstředění).
- Hrubá voda – lze odstranit sušením, její obsah se stanoví vážením vzorku před a po sušení (sušení probíhá při teplotě okolí při relativní vlhkosti 50 %).
- Zbylá voda – je voda kapilárně vázaná, zbytek po odpaření hrubé vody, její obsah se určuje v laboratorních podmínkách sušením při teplotě 110 °C.
- Okludovaná voda – chemicky vázaná voda na popelovinu.
- Hydrátová voda – chemicky vázaná voda na hořlavinu. [7]

2.3.2.3 *Popelovina (popel)*

Popelovina je minerální látka, která je v biomase obsažena ve formě chloridů, sulfidů, sulfátů, uhličitánů a dalších sloučenin, zatímco jako popel definujeme minerální tuhé zbytky po spalování. V průběhu spalování se mnoho látek obsažených v popelovině, rozkládá a reaguje za vzniku oxidů, typicky například uhličitany. Obsah popeloviny v biomase se pohybuje v různé rozmezí závislý na jejím druhu. Například kůra obsahuje (5 – 8) % popeloviny a hodnoty pro dřevo se pohybují v rozmezí (0,8 – 1,4) %. Popelovinu lze rozdělit na inherentní – součást organické struktury a vnější. Vnější popelovina není chemicky vázána a jejím původem bývá sklizeň, skladování či způsob zpracování. Do prvkového složení popeloviny patří prvky: sodík, draslík, vápník, hořčík, křemík, fosfor, chlor a další.

2.3.2.4 *Výhřevnost a spalné teplo*

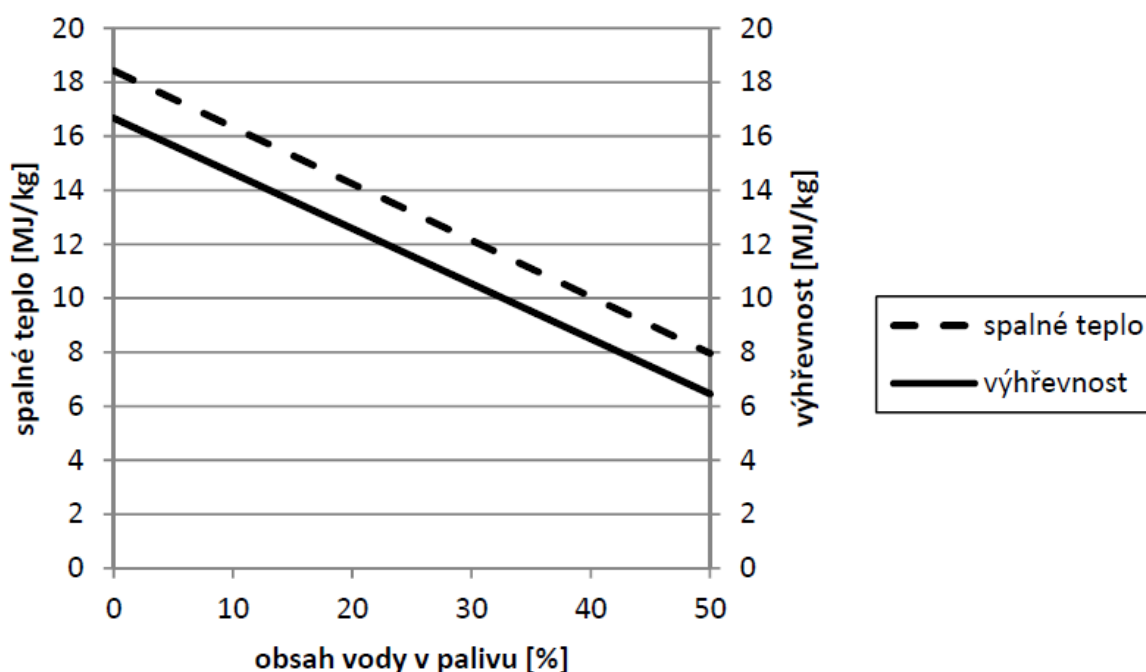
Výhřevnost Q_i je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na standardní výchozí teplotu 20 °C, přičemž vzniklá voda zůstane ve formě páry. Spalné teplo paliva je definováno obdobně s tím rozdílem, že vzniklá voda je ve formě kapaliny. Rozdíl mezi spalným teplem a výhřevností je tedy kondenzační teplo vodní páry. Vztah mezi spalným teplem a výhřevností uvádí rovnice 1, vztah mezi spalným teplem hořlaviny a spalným teplem původního stavu paliva pak rovnice 2. [13]

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 * (W^r + 9 * H^r) \quad (1)$$

$$Q_s^r = Q_s^{daf} * (1 - A^r - W^r) \quad (2)$$

Spalné teplo biomasy se určuje kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě, která je definovaná normou ČSN EN 14918.

Výhřevnost biomasy je v první řadě ovlivněna množstvím vody. V následujícím obr. je znázorněná závislost, ze které je patrné, jak množství vody snižuje výhřevnost a spalné teplo paliva. Typické výhřevnosti pevných paliv jsou uvedené v následující tabulce. Mezi pevnými palivy mají největší výhřevnost koks a černé uhlí. Pro paliva, která prošla fází karbonizace (černé, hnědé uhlí), mají oproti mladším palivům (dřevo, sláma) více uhlíku, ale méně kyslíku a vodíku. Pro spočítání výhřevnosti v tuhých palivech se používají normalizované postupy. [13]



Obr. 1 - Vliv obsahu vody na výhřevnost a spalné teplo paliva

<i>Výhřevnost pevných paliv</i>		
<i>Palivo</i>	<i>Výhřevnost</i>	<i>Obsah vody</i>
	<i>MJ/kg</i>	<i>%</i>
Černé uhlí	25 až 30	5 až 9
Hnědé uhlí	15 až 20	26 až 30
Koks	25 až 27	8 až 13
Dřevo obecně	14	20
Dřevní štěpka	12	30
Smrková kůra	8	50
Sláma obilovin	16	10
Sláma kukuřice	14	10

Tab. 5 - Přehled výhřevností různých paliv s různým obsahem vody

2.4 Spalovací proces

2.4.1 Obecné spalování

Spalování je rychlá reakce mezi palivem a oksylichovadlem (vzdušným kyslíkem), přičemž se přeměňuje chemická energie na tepelnou za vzniku dalších produktů (CO_2 , H_2O). Cílem spalování je využít vzniklou tepelnou energii. Základní předpoklady pro spalování jsou dány přítomností vhodného množství paliva a oksylichovadla, vytvoření jejich směsi a dosažení zápalné teploty. [8]

2.4.1.1 Spalování biomasy

Biomasa je komplikované palivo s vysokým podílem prchavé hořlaviny. Spalování lze rozdělit do několika fází. Nejprve se palivo ohřívá a suší. Tato fáze sušení probíhá přibližně do $150\text{ }^\circ\text{C}$. Následně se začne uvolňovat prchavá hořlavina a začne docházet k rozkladu jejích složek. Dále po dosažení zápalné teploty dojde k zapálení odplyněné prchavé hořlaviny nad povrchem částic paliva. Uvolňování a spalování prchavé hořlaviny probíhá za teplot ($250 - 500$) $^\circ\text{C}$. Současně se při těchto teplotách uvolňuje vodní pára. Poslední a nejdelší fází spalování je spálení tuhého uhlíku (fixní hořlaviny), kdy se uvolňuje zbylá část tepla. Tato fáze trvá až 90 % času spalování a probíhá při teplotách nad $500\text{ }^\circ\text{C}$. Vzhledem k tomu, že hořlavina biomasy je především prchavá, je již při teplotě okolo $500\text{ }^\circ\text{C}$ převážná část hmotnosti paliva vyhořelá, a nad touto teplotou vyhořívá již pouze minoritní část biomasy. Tím se biomasa významně liší zejména od uhlí. [4]

Spalování lze rozdělit na dvě skupiny dle vyhořelého uhlíku:

Dokonalé

Spalování, při kterém dokonale vyhoří veškerý uhlík bez ztráty hořlaviny ve spalinách, v tuhých zbytcích a dokonale vyhoření vodíku. Základem popisu dokonalého spalování jsou stechiometrické výpočty. Stechiometrickými výpočty se určuje objem vzduchu potřebný pro spálení 1 kg paliva a objem vzniklých spalin. Produkty dokonalého spálení jsou CO_2 a vodní pára. CO_2 je konečný produkt oxidace uhlíku. [13]

Nedokonalé

V praxi obvykle nedojde k úplné oxidaci uhlíku, vázaného v palivu, až na CO_2 hovoříme v tomto smyslu o nedokonalém spalování. Uhlík buď nevyhoří vůbec a zůstává jako zbytky fixní hořlaviny v popelu nebo oxiduje částečně pouze na CO , a v této podobě odchází ve spalinách. V obou případech se jedná o tepelnou ztrátu oproti stavu dokonalého spalování, neboť není využita veškerá chemická energie vázaná v hořlavině paliva [13]

2.4.2 Přebytek vzduchu

Součinitel přebytku spalovacího vzduchu, obvykle značený α , je veličina, která udává, kolikrát více je do spalovacího procesu přivedeno vzduchu, než je teoreticky potřebné podle stechiometrické bilance. Při návrhových výpočtech se α volí dle doporučení a zkušeností v závislosti na druhu paliva a typu a velikosti spalovacího zařízení. Jako

procesní veličinu jej lze určit pomocí měření koncentrace kyslíku ve spalínách a její následné dosazení do vztahu (27). Alternativní možností je určit jej z měření koncentrace CO₂ ve spalínách.

Pokud není možné tyto koncentrace měřit, existují další možnosti jeho určení, např. grafickou metodou (Ostwaldův trojúhelník) či z dalších početních vztahů. Tento vztah lze aplikovat pro dokonalé i nedokonalé spalování. [12] [13]

2.5 Emise ze spalování biomasy

Ve spalínách z ohniště vychází řada škodlivin, které znečišťují ovzduší. Splnění uzákoněných limitů lze dosáhnout vhodným řešením spalovacího zařízení, vhodným vedením spalovacího procesu, dostatečným opatřením záchytu škodlivin. [12] Emise ze spalování jsou především závislé na typu a složení paliva a na použité technologii spalování.

Ochranou ovzduší je podle zákona O ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. míněno předcházení znečištění ovzduší a snižování úrovně znečištění tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší. Zákon také nařizuje provozovatelům stacionárního zdroje, aby jejich provoz, činnosti nebo technologie byly v souladu s tímto zákonem. Mezi povinnosti provozovatele dle zákona patří např. dodržovat emisní limity, předkládat příslušným orgánům informace o provozu stacionárního zdroje a jeho emisích, spalovat paliva, která splňují požadavky na kvalitu paliv a další. Toto nařízení vlády je platné do 31. 12. 2017. Emisní limity jsou definovány pro stacionární zdroje podle jejich tepelného příkonu, obecně v základních kategoriích (0,3 – 50) MW, (50 – 100) MW, (100 – 300) MW a nad 300 MW, a jsou uvedeny v prováděcí vyhlášce 415/2012 Sb. k tomuto zákonu. Pro stacionární zdroje s tepelným příkonem pod 300 kW pak neplatí emisní limity, ale tzv. minimální emisní požadavky. Ty jsou uvedeny v příloze zákona o ovzduší a jsou definovány pro spalovací stacionární zdroje o jmenovitém tepelném příkonu 300 kW a nižším, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění, pro účely uvádění výrobků na trh. Ovšem, tento zákon definuje mezní emisní hodnoty pro NO_x pouze pro kapalná a plynná paliva. Pro pevná paliva definuje hodnoty pro emise CO, TOC a TZL. Minimální emisní požadavky jsou uvedeny v tab. 6. [16]

<i>Mezní hodnoty emisí, mg*m⁻³</i>									
<i>Palivo</i>	<i>≤ 65 kW</i>			<i>>65 až 187 kW</i>			<i>>187 až 300 kW</i>		
	<i>CO</i>	<i>TOC</i>	<i>TZL</i>	<i>CO</i>	<i>TOC</i>	<i>TZL</i>	<i>CO</i>	<i>TOC</i>	<i>TZL</i>
Biologické	300	100	150	2500	80	150	1200	80	150
Fosilní	3000	100	125	2500	80	125	1200	80	125

Tab. 6 – Minimální emisní požadavky pro malé zdroje podle zákona O ochraně ovzduší [16]

Vyhláška č. 415/2012 Sb. stanovuje přípustné úrovně znečišťování a způsob jejich zjišťování. Vyhláška obsahuje obecné i specifické emisní limity, způsoby výpočtů limitní stropů a technické podmínky provozu stacionárních zdrojů. Dále jsou ve vyhlášce popsány požadavky na kvalitu paliv a způsob prokazování jejich plnění a formáty ohlašování. V následující tabulce jsou uvedené specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu vyšším než 0,3 MW a nižším než 50 MW. Toto nařízení vlády je platné do 31. 12. 2017. Pro stacionární zdroje jsou specifické emisní limity vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 6 % v případě pevných paliv obecně, 11 % v případě biomasy a 3 % v případě kapalných a plyných paliv. V této vyhlášce jsou stanoveny specifické emisní limity pro SO₂, NO_x, TZL a CO. Naměřené hodnoty emisí NO_x a CO, které byly sledované v práci praktické části této práce, jsou v diskuzi porovnány s emisními limity uvedené v následující tabulce. [1]

Druh paliva	Specifické emisní limity, mg*m ⁻³											
	> 0,3-1 MW				>1-5 MW				>5-50MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné	-	650	250	650	-	650	250	650	2500	650	150	400
Kapalné	-	500	-	175	-	500	100	175	1700	450	100	175
Plynné	-	200	-	100	-	200	-	100	900	200	50	100

Tab. 7 – Specifické emisní limity podle vyhlášky 415/2015 Sb. [1]

2.5.1 Oxid uhličitý

Mezi hlavní produkty spalování biomasy patří CO₂. Biomasu lze zjednodušeně považovat z hlediska emisí oxid uhličitýho za neutrální, neboť množství CO₂ emitované ze spalování biomasy je přibližně shodné s množstvím CO₂ spotřebovaného během růstu rostlin (fotosyntéza). Toto lze považovat za jeden z hlavních přínosů biomasy z pohledu na životní prostředí. [5] Produktem dokonalého spálení paliva je CO₂, kdy se sloučí veškerý uhlík obsažený v palivu na oxid uhličitý, při čemž se uvolní teplo. Oxid uhličitý je bezbarvý nehořlavý plyn bez chuti a zápachu.

2.5.2 Oxid uhelnatý

CO je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu a je značně jedovatý. Ke vzniku CO přispívá zejména příliš nízká teplota spalování, pokud je čas pobytu ve spalovací komoře příliš krátký nebo pokud je nedostatek kyslíku. [8] V praxi bývá spalování nedokonalé a jeho produkty jsou CO₂, CO a část vůbec neshořelého uhlíku.

2.5.3 Oxidy dusíku

Při spalování biomasy vznikají v různé míře oxidy dusíku. Mezi produkované oxidy dusíku při spalování patří v největší míře oxid dusnatý NO (až 95 %), oxid dusičitý NO₂ a další oxidy jejichž produkce je zanedbatelná: oxid dusný N₂O, oxid dusitý N₂O₃, oxid dusičitý N₂O₄ a oxid dusičný N₂O₅. V této práci se NO a NO₂ souhrnně označuje jako NO_x.

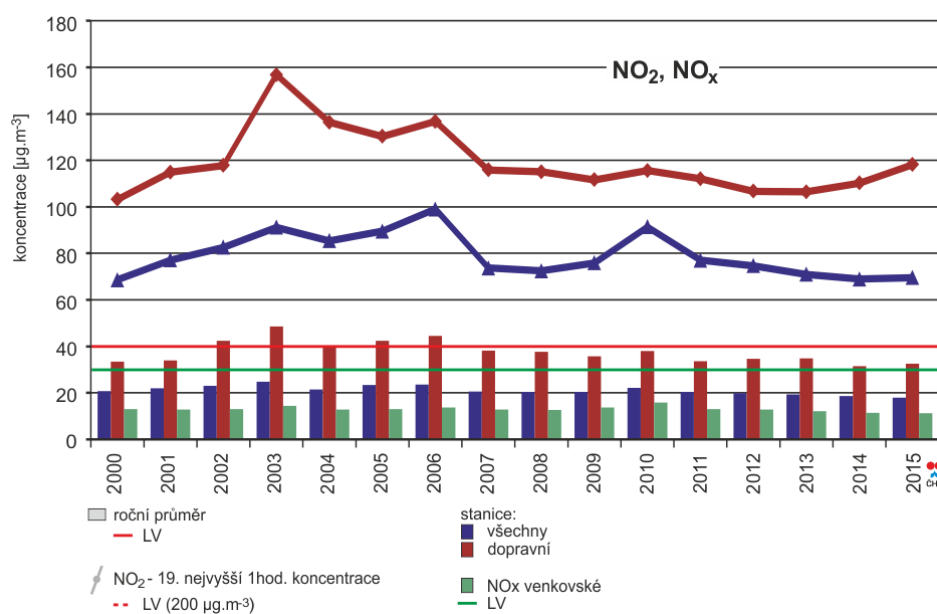
2.5.3.1 Dopady pro životní prostředí

Emise NO_2 přispívají ke vzniku kyselých dešťů, smogu a poškozování ozonové vrstvy. Kyselé deště se rozdělují podle zdroje vzniku. První zdroj je přírodní, kde se jedná o emise kyselinotvorných plynů z činnosti sopek a biologických procesů. Druhý zdroj je antropogenní, který vzniká v důsledku lidské činnosti z oblasti průmyslu, energetiky, automobilové dopravy a zemědělství. Vznik kyselých dešťů lze popsat reakcí:



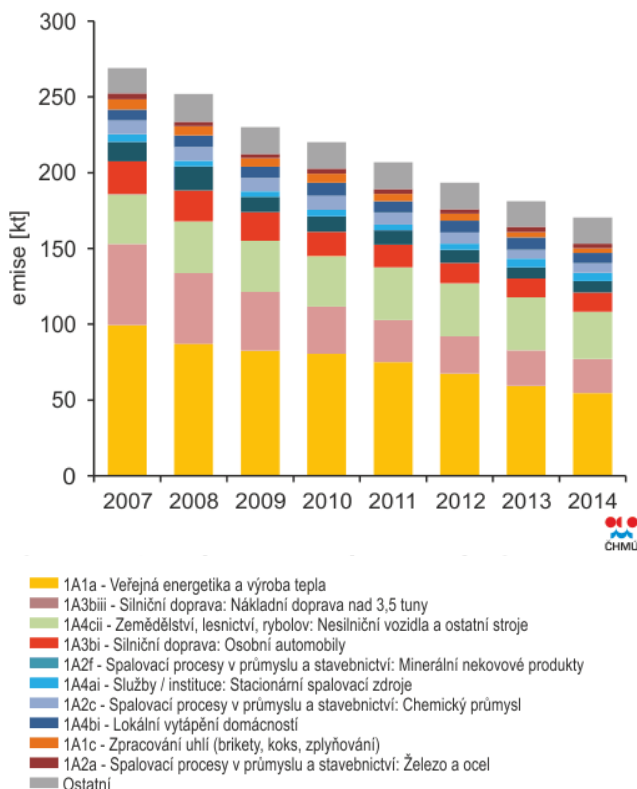
kde reaguje NO_2 s hydroxylovými radikály OH^- za vzniku kyseliny dusičné.

NO je jeden ze tříatomových skleníkových plynů, který se kumuluje v atmosféře a společně s dalšími skleníkovými plyny absorbuje záření zemského povrchu, které by jinak unikalo do vesmíru. Toto má za následek tzv. skleníkový efekt. Podle veřejně dostupných údajů od Českého hydrometeorologického ústavu docházelo v roce 2015 na území ČR pravidelně na několika místech k překračování imisního ročního limitu $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Tyto překročení vznikají v dopravně exponovaných lokalitách aglomerací a velkých měst. V dlouhodobém měřítku v průběhu 90. let došlo k výraznému poklesu jak ročních průměrných koncentrací NO_2 a NO_x , tak i 19. nejvyšších hodinových koncentrací NO_2 . Důvodem byl prudký pokles emisí v tomto období v důsledku nabytí účinnosti zákona č. 309/1991 Sb. a na něj navazujícího zavádění nových technologických opatření ke snižování emisí. Nejvýraznější nárůsty koncentrací poté byly zaznamenány v letech 2003, 2006 a 2010, pravděpodobně v důsledku nepříznivých meteorologických a rozptylových podmínek, které se v těchto letech vyskytovaly. Od roku 2011 bylo možné pozorovat pozvolna klesající trend. Tento průběh je viditelný v následujícím obrázku.



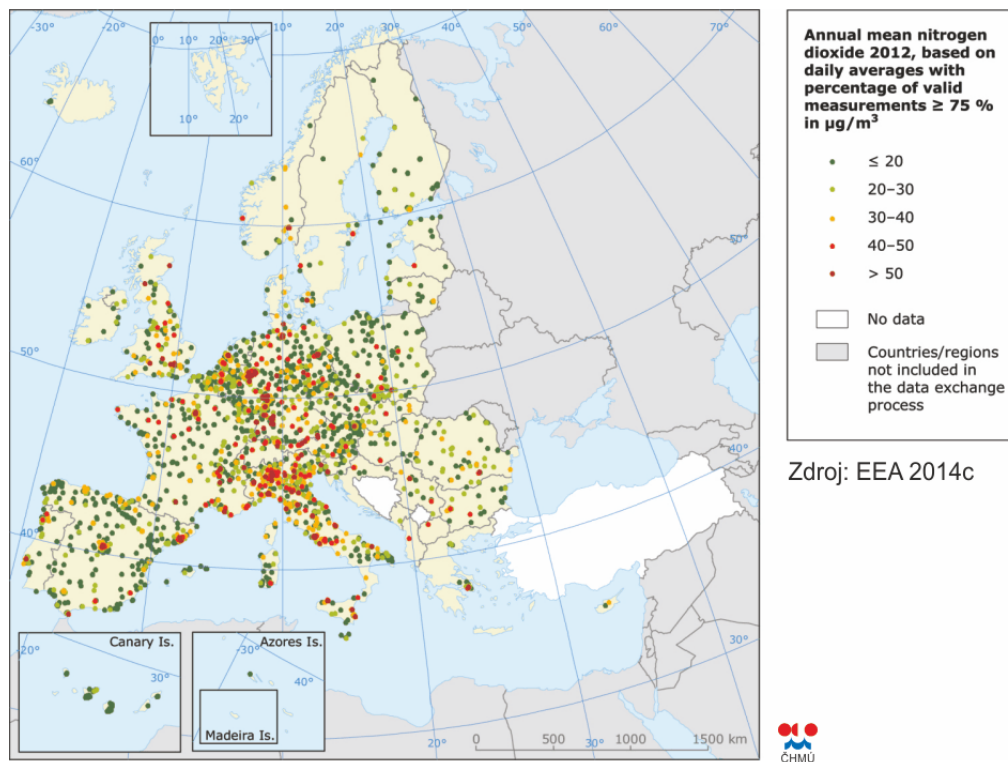
Obr. 2 - Trendy ročních charakteristik NO_2 a NO_x v ČR v období 2000 – 2015

V následujícím obrázku je zobrazeno zastoupení zdroje vzniku NO_x. Nejvyšší zastoupení je z veřejné energetiky a výroby tepla. Druhé nejvyšší zastoupení je v silniční dopravě. [27]



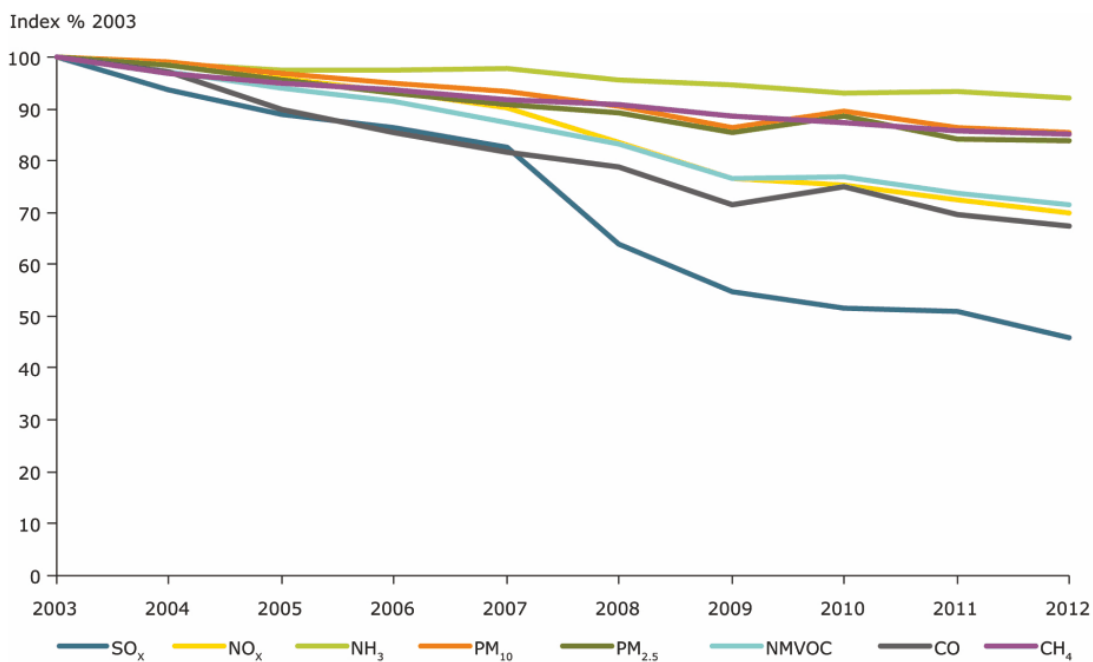
Obr. 3 - Vývoj celkových emisí NO_x v období 2007 - 2014

Globálněji je v následujícím obrázku uvedena průměrná roční koncentrace NO₂ v Evropě pro rok 2012. V obrázku jsou vyznačené červené tečky, které zobrazují překročení imisního ročního limitu 40 μg.m⁻³. Limitní koncentrace jsou překračovány zejména v lokalitách ovlivněných dopravou. Výskyt nadlimitních koncentrací lze předpokládat i ve státech, které výše zmíněné škodliviny sledují pouze na omezeném počtu lokalit nebo je nesledují vůbec. [26]



Obr. 4 - Průměrná roční koncentrace NO₂ v Evropě pro rok 2012

Nicméně v několika letém horizontu je trend oxidu NO_x v členských státech Evropské unie klesající a tento průběh je zobrazen na následujícím obrázku. Obr. zobrazuje časové období od roku 2003 do roku 2012. [27]



Obr. 5 - Průměrné roční koncentrace NO₂ v Evropě pro rok 2012

2.5.3.2 Dopady na zdraví

Oxid dusnatý NO je bezbarvý plyn, který se rychle kombinuje s O₂ v atmosféře a vytváří NO₂. NO je pro člověka jedovatý, dráždí oči a dýchací cesty. Dlouhotrvající vystavení NO způsobuje prudké záchvaty kašle, obtíže s dýcháním nebo cyanózu, tyto obtíže mohou mít smrtelné následky.

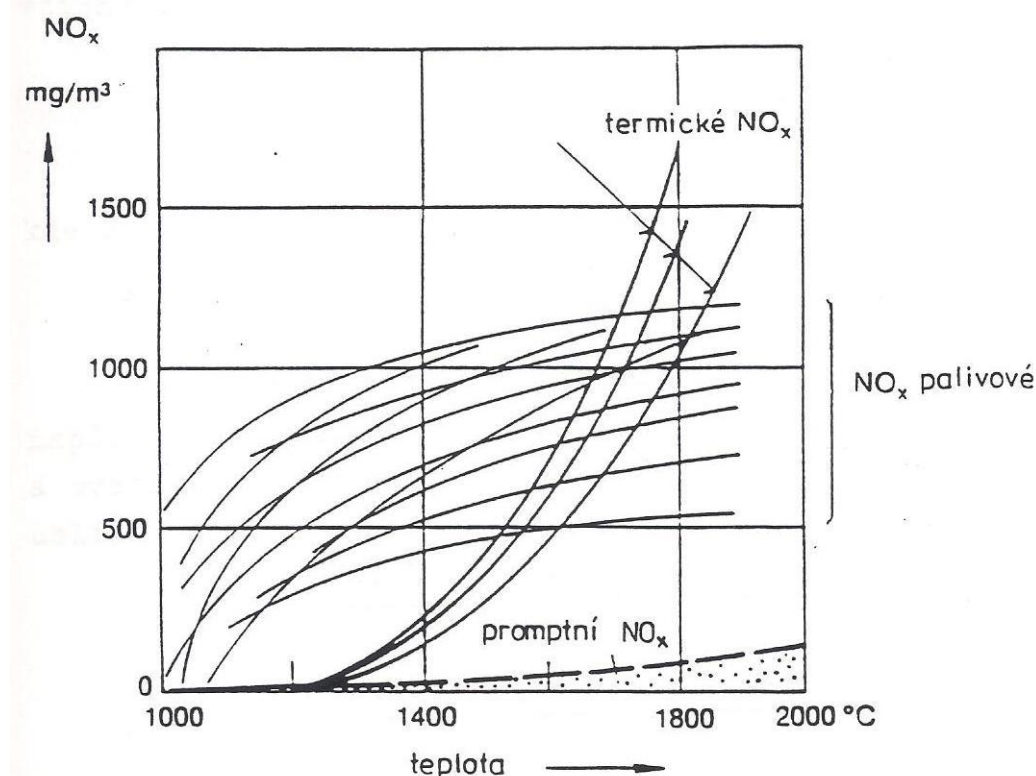
Oxid dusičitý NO₂ je červeně hnědý, vysoce reaktivní a toxický. NO₂ má dusivý zápach a je silným oxidačním činidlem. Páry NO₂ jsou velice dráždivé pro dýchací cesty, oči a může způsobovat nevolnost. Inhalace NO₂ může mít za následek také smrtelné následky v důsledku onemocnění hodní cest dýchacích a plic.

2.5.4 Druhy oxidů dusíku

Existují tři základní mechanismy vzniku NO_x:

- Termický
- Promptní (rychlé) – vznikají na rozhraní plamene za přítomnosti uhlovodíků
- Palivový – vznikají z dusíku obsaženého v palivu

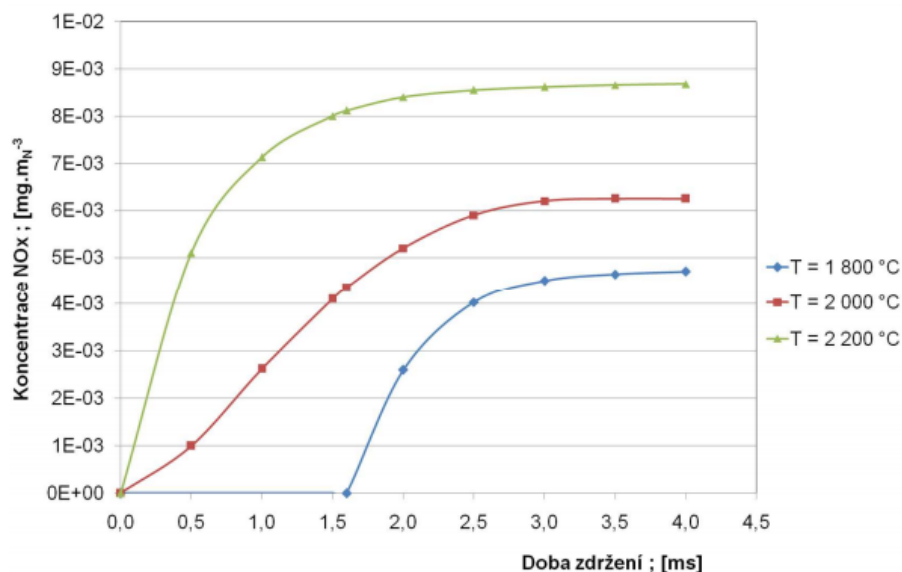
Závislost produkce jednotlivých druhů v závislosti na teplotě je uvedeno v následujícím obrázku.



Obr. 6 - Druhy NO_x v závislosti na produkci a teplotě spalování

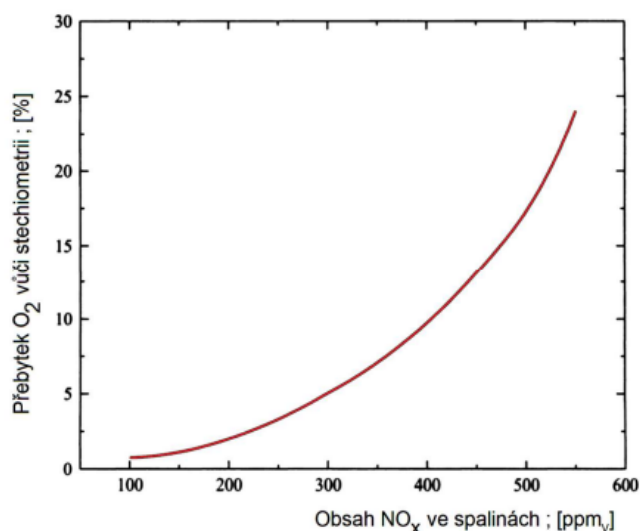
2.5.4.1 Termické oxidy dusíku

Termické NO_x vznikají za vysokých teplot mezi dusíkem a kyslíkem. Hlavní faktor tvorby je koncentrace atomárního kyslíku vzniklého disociací O_2 na 2O v oblasti vysokých teplot. Rychlost reakce je závislá na teplotě, koncentraci dusíku, koncentraci kyslíku a na době zdržení. Vliv doby zdržení a teploty na tvorbě NO_x je znázorněn v následujícím obrázku. [28]



Obr. 7 - Závislost tvorby NO_x na době zdržení

Vliv přebytku vzduchu na tvorbě NO_x je v následujícím obrázku, ze kterého je patrné, že je cílem minimalizovat přebytek vzduchu pro spalování. Tento obr. je platný i pro palivové NO_x . [28]



Obr. 8 - Závislost tvorby NO_x na přebytku kyslíku

Mechanismus oxidace je radikálový a liší se podle konkrétních podmínek. Mechanismus probíhá podle následujících reakcí:



Silná teplotní závislost tvorby termických NO_x je daná vysokou aktivační klíčové reakce (5). Možnosti snížení termického NO_x lze docílit, jak již bylo zmíněno, snížením koncentrace kyslíku v pásmu vysokých teplot. Dále lze tvorbu omezit snížením dobou zdržení a spalovací teploty. [28] U spalování biomasy, které je typické nižšími teplotami obvykle do (1000 – 1100) °C, je tvorba NO_x termickým mechanismem zanedbatelná.

2.5.4.2 *Promptní oxidy dusíku*

Promptní oxidu dusíku se formují relativně rychlými reakcemi mezi molekulárním dusíkem, kyslíkem a uhlovodíkovými radikály. Reakcí dusíku s uhlovodíkovými radikály vznikne NO v oblasti plamene bohaté na palivo. Reakce, které probíhají mezi radikály a dusíkem jsou popsány tzv. Fenimorovým mechanismem:

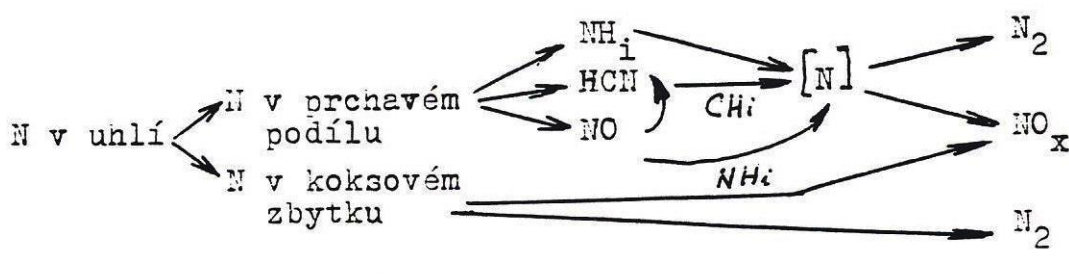




Obecně se jedná o velice komplikovaný proces obsahující stovky velmi rychlých reakcí. Tvorba oxidů dusíku promptním mechanismem je významná až nad teplotou cca 1400 °C. [8]

2.5.4.3 Palivové oxidy dusíku

Vznik palivových NO_x je významný při spalování biomasy, odpadů a dalších paliv bohatých na obsah dusíku, kdy se spaluje při nižších teplotách. NO vznikají oxidací dusíku obsaženého v palivu, přičemž NO nevzniká přímo ale postupnými reakcemi. Nejprve reagují uhlovodíkové radikály NH₂ za vzniku kyanovodíku HCN a dále reagují na NH₃. Další oxidací vzniká NO, který pokud se vyskytuje v redukční atmosféře s NH₃, tak se redukuje na molekulární dusík. Tento průběh je naznačen v následujícím schématu. Pouze malá část se přeměňuje na NO a tuto přeměnu ovlivňuje přebytek vzduchu a množství obsaženého dusíku v palivu. Jedná se o mnoho reakcí, při kterých jsou formovány i různé meziprodukty. Rychlost přeměny dusíkatých látek obsažených v prchavém podílu paliva na NO slabě roste s teplotou a silněji závisí na koncentraci kyslíku.



Obr. 9 - Mechanismus vzniku palivových NO_x

Biomasa je typická velmi odlišným obsahem palivového dusíku mezi jednotlivými druhy, např. zemědělské produkty nebo cíleně pěstovaná biomasa může obsahovat až řádově více palivového dusíku, než dřevní biomasa. Tento fakt pak má významný vliv na výsledné emise NO_x při spalování těchto paliv.

2.5.4.4 Tvorba NO₂

NO₂ vzniká oxidací NO a při spalování u standartních kotlů představuje do max. 10 % všech vzniklých NO_x. Primární vznik je zapříčiněn skokovým ochlazením spalin, což vzniká např. v plynových turbínách. Sekundárně NO₂ vzniká v kouřovodu a v komínu. Další terciální konverze NO na NO₂ vzniká ve vnějším ovzduší fotochemickými reakcemi a působí na tvorbu troposférického ozonu, dle následujících reakcí:





2.6 Opatření pro snížení emisí NO_x

Opatření lze rozdělit do dvou skupin na primární – omezení vzniku tvorby NO_x v ohništi a sekundární – redukce již vzniklých NO_x.

2.6.1 Primární opatření

Primární opatření je v podstatě specifické řízení spalovacího režimu. U tuhých paliv může být tvorba NO_x ovlivněna vhodnou či nevhodnou volbou paliva a spalovacího procesu. K existujícím základním primárním opatřením patří:

- stupňovitý přívod paliva,
- stupňovitý přívod vzduchu,
- kombinace stupňovitého přívody paliva a vzduchu,
- recirkulace spalin.

Podle spalovacího zařízení se mění jednotlivé typy NO_x. Množství termických NO_x silně stoupá s teplotou, množství palivových NO_x vzrůstá s teplotou pomaleji. Teplotu plamene ovlivňuje součinitel přebytku vzduchu, teplota spalovacího vzduchu a složení paliva. Primární opatření se tedy mění dle vznikajících NO_x. Pro palivové NO_x jsou opatření snížení teploty spalovacího vzduchu, snížení přebytku vzduchu a rychlé ochlazení plamene.

Podíl NO/NO_x závisí dále na přebytku vzduchu a velikosti prchavého podílu. Se vzrůstajícím přebytkem vzduchu podíl NO/NO_x vzrůstá. Pro palivo je vhodné nalézt mezní součinitel přebytku vzduchu, kdy se vliv prchavého podílu mění. [18]

2.6.1.1 Recirkulace spalin

Recirkulací spalin znamená návrat části spalin odebraných za kotlem a jejich návrat do spalovací komory. Recirkulace může mít různé určení. V současnosti se využívá pro potlačení vzniku emisí NO_x, sušení paliva před mletím (pro uhlí) a pro regulaci teploty ve spalovací komoře. Obvyklé uspořádání ve spalinové trati je, že jsou spaliny dopravovány do recirkulační trati spalinovým ventilátorem. Spalinový ventilátor je obvykle umístěn až za hlavní spalinový ventilátor. Recirkulace se rozděluje na tři základní druhy:

- 1. recirkulace – vnitřní recirkulace, kdy se odebírají spaliny přímo za spalovací komorou a využívají se např. k sušení paliva;
- 2. recirkulace – málo využívaná, spaliny se odebírají v konvekčním tahu a dopravují se zpět do spalovací komory;

- 3. recirkulace – spaliny jsou v tomto typu recirkulace odebírány až za kotlem, tzn. před komínem a navraceny zpět do spalovací komory (studená recirkulace).

Tato práce se zabývá recirkulací typu 3. [12]

Recirkulaci lze vyjádřit recirkulačním součinitelem, který je poměrem průtoku odebíraných spalin a průtoku spalin ve spalinovém traktu po odběru pro recirkulaci. Recirkulační součinitel r lze vypočítat podle vztahu (51).

2.6.2 Sekundární opatření

Sekundární opatření redukuje vzniklé oxidy dusíku. Mezi hlavní používané metody patří selektivní nekatalytická redukce (SNCR), selektivní katalytická redukce (SCR) a simultánní metody společně s odsířením, rovněž s využitím katalyzátorů.

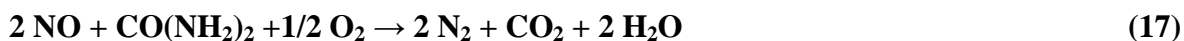
2.6.2.1 Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

Princip spočívá v selektivní redukci NO_x redukčním činidlem (amoniakem NH_3 nebo močovinou $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). Redukce probíhá při teplotách (870 – 1100) °C. Principiálně se redukční činidlo vstříkuje do proudu horkých spalin. Děj probíhá přímo ve spalovací komoře. Redukce probíhá podle rovnic:

Pro amoniak:



Pro močovinu:



SNCR je možno doplnit nějakým primárním opatřením, kdy redukční činidlo může být přiváděno do proudu recirkulovaných spalin a tím se rovnoměrněji rozloží ve spalovací komoře. Účinnost obou procesů závisí na několika faktorech:

- teplotě spalin a rovnoměrnost teploty ve spalovací zóně,
- tvaru trysek a jejich umístění,
- rychlosti vstříku. [22]

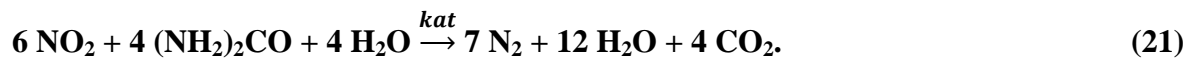
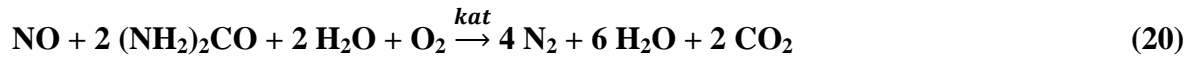
2.6.2.2 Selektivní katalytická redukce (SCR)

Tato metoda je založena na principu redukce NO_x pomocí reakce oxidů dusíku s amoniakem nebo močovinou za přítomnosti katalyzátoru. Katalyzátorů existuje řada typů. Mezi používanými materiály pro katalyzátory jsou keramické materiály jako oxid titaničitý anebo oxidy obecných kovů (vanad, molybden, wolfram), dále zeolity nebo drahé kovy. Redukce probíhá podle rovnic:

Pro amoniak:



Pro močovinu:



[18] [22]

2.6.2.3 *Simultánní metody*

K dalším sekundárním opatřením patří simultánní metody, které odstraňují NO_x a SO_x . Principiálně se jedná o mokré a suché vypírky.

K suchým metodám patří postup Bergbau-Forschung, kdy se NO_2 , SO_x odstraňuje pomocí aktivního koku a NO se redukuje zástříkem čpavku.

Při mokré metodě se NO ze spalin nechá oxidovat na NO_2 a vypírá ve čpavkovém roztoku a následně se zachycuje jako dusičnan amonný. [18]

3. Výpočtová část

Tato kapitola uvádí přehled všech použitých vztahů a výpočtových postupů, použitých v práci pro zpracování naměřených dat a pro vyhodnocení výsledků. Pokud není uvedeno jinak, následující výpočty a doporučení zvolených různých parametrů je převzato z literatury [12]. Vytvořený výpočtový skript v prostředí Matlab je nahrán v příloženém CD, které je součástí této práce.

3.1 Výhřevnost paliva

V práci je jako palivo použita dřevní biomasa, která má přibližně konstantní hodnotu výhřevnosti hořlaviny, resp. sušiny, bez ohledu na její druh. Výhřevnost původního stavu biomasy je jedním z nezbytných parametrů pro vyhodnocení výsledků, není však nutné ji přímo měřit. Namísto toho ji lze jednodušším způsobem určit ze známého obsahu vody. Pro výpočet této výhřevnosti existuje řada vzorců, které jsou uzpůsobené pro určité palivo. Pro tuto práci byl vybrán vztah, který je určen pro biomasu:

$$Q_i^r = 34,75 \cdot C^r + 95,3 \cdot H^r - 10,9 \cdot (O^r - S^r) - 2,5 \cdot W^r \quad (22)$$

Hodnoty hmotnostních zlomků jednotlivých prvků lze rovněž určit ze zjištěného obsahu vody v biomase, neboť hodnoty vztažené na hořlavinu, resp. sušinu biomasy, jsou rovněž přibližně konstantní.

Prvkové složení paliva zadané školitelem práce:

<i>Prvek</i>	<i>Hodnota</i>
	<i>kg/kg</i>
C^{daf}	0,509
H^{daf}	0,069
S^{daf}	0,0003
N^{daf}	0,0026
A^d	0,01

Tab. 8 - Prvkové složení paliva

Hodnoty do výpočtu byly přepočítány ze stavu *daf* (dry ash free), *d* (dry) do stavu *r* (as received) podle tab. 2.

3.2 Stechiometrické výpočty

Cílem stechiometrických výpočtů bylo určit objem vzduchu vlhkého potřebného pro spálení paliva a objem vlhkých spalin vzniklých spálením paliva. Z těchto vypočtených hodnot se následně určovaly průtoky spalovacích vzduchů, spalin a recirkulovaných spalin. Konečný parametr a cíl výpočtů bylo určení recirkulačního poměru *r*. Základem výpočtů

jsou hodnoty jednotlivých složek paliva, ze kterého se vypočítá minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva.

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva se určí ze vztahu:

$$O_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S_{spal}^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (23)$$

Minimální objem suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva vychází z objemového podílu kyslíku v suchém vzduchu $O_{O_2} = 21 \%$

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} \quad (24)$$

Minimální objem vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} \quad (25)$$

Součinitel respektující podíl vodní páry připadající na 1 Nm³ suchého vzduchu, byl zvolen pro běžné klimatické podmínky (při relativní vlhkosti $\varphi = 70 \%$ a teplotě $t_v = 20 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$\chi_v = 1,016$$

Objem vodní páry z minimální objem vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VSmin} \quad (26)$$

Součinitel přebytku spalovacího vzduchu:

$$\alpha = \frac{21}{21 + O_{O_2}} \quad (27)$$

Objemy jednotlivých složek suchých spalin:

Objem oxidu uhličitého:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VSmin} \quad (28)$$

Objem oxidu siřičitého:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad (29)$$

Objem dusíku:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VSmin} \quad (30)$$

Objem argonu:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VSmin} \quad (31)$$

Objem suchých spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu pro $\alpha = 1$. Objem suchých spalin je dán součtem jednotlivých složek z předchozích výpočtů:

$$O_{SSmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (32)$$

Minimální množství vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin je tvořen ze spalování vodíku, odpařenou vlhkostí a vlhkostí vzduchu:

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H_2O}^V \quad (33)$$

Minimální objem vlhkých spalin:

$$O_{SVmin} = O_{SSmin} + O_{H_2O}^S \quad (34)$$

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$O_{SV} = O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin} \quad (35)$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu vlhkého:

$$O_{VV} = O_{VVmin} \cdot \alpha \quad (36)$$

Při tepelné bilanci kotle je potřeba vyjádřit teplo, které je spalinám odebíráno. Pro tento účel se používá entalpie spalin. Spaliny lze považovat za směs plynů + popílek, jejich výslednou entalpii lze získat jako součet jednotlivých dílčích složek. Entalpii stechiometrických spalin ($\alpha = 1$) lze vyjádřit:

$$I_{Smin}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_{\dot{u}} \cdot A^r \cdot i_{pop}^t \quad (37)$$

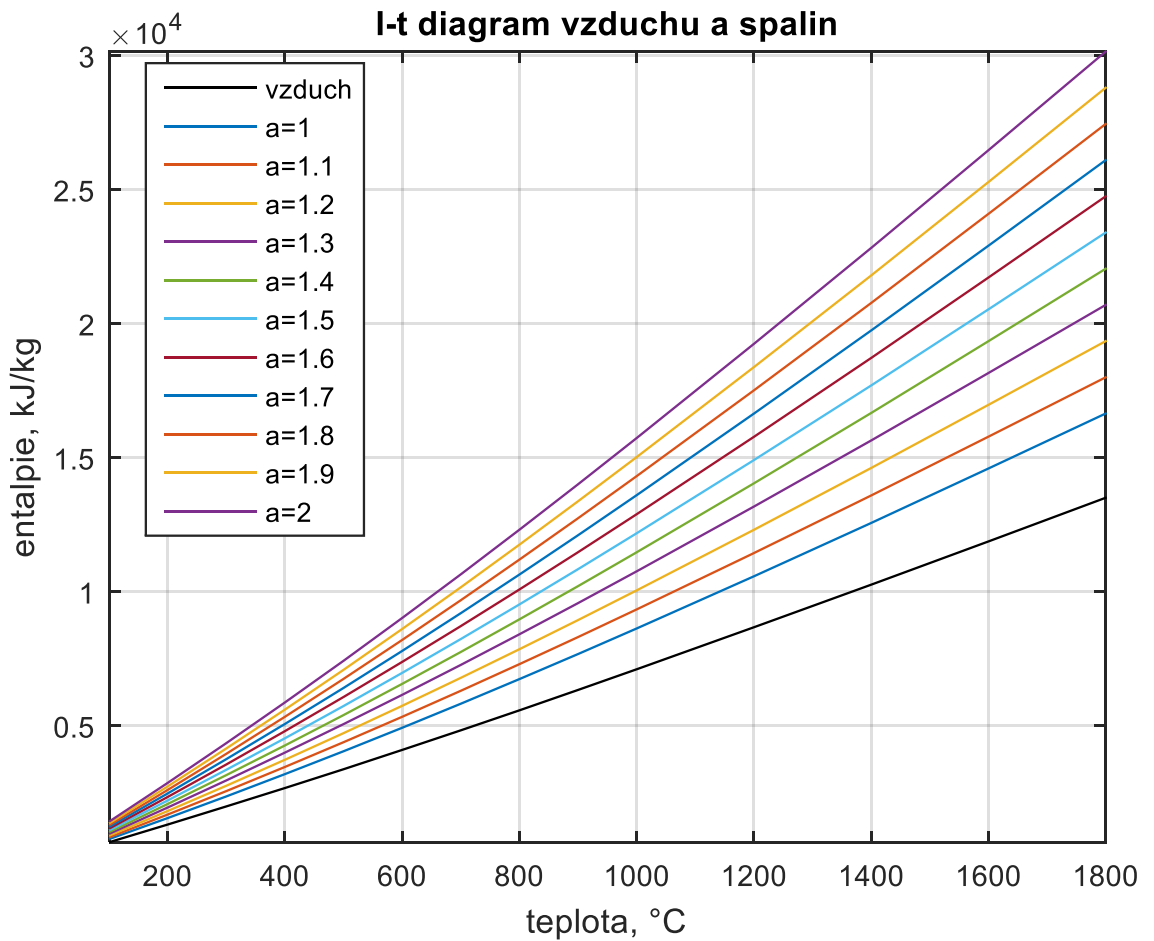
Měrné entalpie různých složek spalin při teplotě t , které byly použity při výpočtech, jsou uvedeny v příloze v tab. 24. Entalpie minimálního množství vzduchu při teplotě t byla určena podle vztahu:

$$I_{Vmin}^t = O_{VSmin} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2O}^v \cdot i_{H_2O}^t \quad (38)$$

Entalpii spalin o teplotě t , které vzniknou po spálení 1 kg paliva s přebytkem vzduchu α se vypočítá:

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) * I_{Vmin}^t \quad (39)$$

Obr. 10 představuje sestrojený I-t diagram spalin, který zobrazuje závislost entalpie spalin na teplotě a přebytku spalovacího vzduchu. Diagram byl sestrojen pro různé přebytky vzduchu a pro složení paliva, které je uvedeno v tab. 8. Vynesené body byly proloženy hladkými křivkami. Pozn. v celé práci je součinitel přebytku vzduchu značen α , pouze v legendě následujícího obrázku je označen jako a .



Obr. 10 - I-t diagram vzduchu a spalin při různých přebytcích vzduchu

Hmotnostní průtok paliva byl určen podle následujícího vztahu, který je založen na kalibraci dopravníku paliva, který přivádí palivo ze zásobníku do kotle a měření jeho doby chodu a doby prodlevy:

$$\dot{m}_{pv} = \frac{m_{pv} \cdot t_{ch}}{t_{ch} + t_k} \quad (40)$$

Výsledky kalibrace dopravníku jsou uvedeny v kapitole 4.1.2. Průtok spalovacího vzduchu lze získat vynásobením množstvím spáleného paliva \dot{m}_{pv} :

$$\dot{V}_{vz} = \dot{m}_{pv} * \alpha * O_{VVmin} \quad (41)$$

Průtok spalin se získá obdobným způsobem:

$$\dot{V}_s = \dot{m}_{pv} * (O_{SVmin} + (\alpha - 1) * O_{VVmin}) \quad (42)$$

Spočítaný \dot{V}_{vz} lze rozdělit na průtoky primárního a sekundárního vzduchu:

$$\dot{V}_{vz} = \dot{V}_p + \dot{V}_{sek} \quad (43)$$

Následující vztah je vyjádření poměru mezi průtoky primárního a sekundárního vzduchu a jejich rychlostmi měřenými anemometry:

$$\frac{\dot{V}_p}{\dot{V}_{sek}} = \frac{c_1}{c_2} \quad (44)$$

Na základě rovnic předchozích byly odvozeny následující vztahy pro určení průtoků primárního a sekundárního vzduchu z celkového průtoku vzduchu \dot{V}_p a \dot{V}_{sek} :

$$\dot{V}_p = \dot{V}_{vz} / \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) \quad (45)$$

$$\dot{V}_{sek} = \dot{V}_{vz} - \dot{V}_p \quad (46)$$

Dále je potřebné znát průtok recirkulovaných spalin, který je možné určit pomocí následujícího vztahu, který je založen na principu měření koncentrace kyslíku ve spalinách za kotlem a po smíchání recirkulovaných spalin s primárním vzduchem:

$$\dot{V}_1 \cdot x_{S1} = \dot{V}_p \cdot x_v + \dot{V}_{sr1} \cdot x_{sp} \quad (47)$$

Obdobný vztah platí pro bilanci kyslíku po smíchání recirkulovaných spalin se sekundárním vzduchem:

$$\dot{V}_2 \cdot x_{S2} = \dot{V}_{sek} \cdot x_v + \dot{V}_{sr2} \cdot x_{sp} \quad (48)$$

Z předchozích vztahů pak lze určit neznámé průtoky recirkulovaných spalin do primárního i sekundárního vzduchu:

$$\dot{V}_{sr1} = \dot{V}_p \cdot \frac{(x_v - x_{s1})}{(x_{s1} - x_{sp})} \quad (49)$$

$$\dot{V}_{sr2} = \dot{V}_{sek} \cdot \frac{(x_v - x_{s2})}{(x_{s2} - x_{sp})} \quad (50)$$

Součet rovnic předchozích udává skutečný průtok recirkulovaných spalin \dot{V}_{sr} . Je pouze potřeba zmínit, že tento přístup předpokládá chování spalin jako ideální plyn. Z průtoků spalin \dot{V}_s a recirkulovaných spalin \dot{V}_{sr} byl určený vztah pro vypočtení recirkulačního poměru:

$$r = \frac{\dot{V}_{sr}}{(\dot{V}_s - \dot{V}_{sr})} \quad (51)$$

3.3 Tepelná účinnost kotle

Tepelná účinnost kotle je jedním z parametrů, u kterého byl sledován vliv recirkulace spalin. Energetické zařízení může být horkovodní kotel, ve kterém se přeměňuje chemicky vázaná energie v teplo. Tepelná účinnost kotle vyjadřuje, jak efektivní je tato přeměna. Účinnost kotle byla stanovena nepřímou metodou. Tato metoda určuje účinnost kotle pomocí stanovení tepelných ztrát.

Redukovaná výhřevnost sumarizuje celkové teplo přivedené do kotle vztažené na jednotkové množství:

$$Q_{ired} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{cz} + Q_{pr} + Q_s^{r3} \quad (52)$$

Pro výpočet v rámci této práci jsou tyto tři parametry Q_{cz} , Q_{pr} a i_{pv} nulové.

Parametr i_{pv} se uvažuje pouze v případě, když platí podmínka:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{15000 \cdot 4,19} \quad (53)$$

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích, znamená ztrátu nespálenou hořlavinou. Lze ji vypočítat vztahem:

$$Z_c = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ci} \quad (54)$$

$Q_{ci} = 32600$ kJ/kg a je to výhřevnost uhlíku.

Ztráta chemickým nedopalem (ztráta hořlavinou ve spalinách) se vyjadřuje jako teplo ztracené v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalinách. Za parametr $mgCO$ byly dosazeny naměřené hmotnostní koncentrace CO přepočtené na referenční podmínky.

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SSmin}}{(21 - O_2) \cdot Q_{ired}} \quad (55)$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků, se skládá podobně jako ztráta mechanickým nedopalem ze ztráty popílku, úletu a propadu. Se ztrátami nedopalem škváry a strusky nebylo počítáno, protože při spalování biomasy tyto složky nevznikají.

$$Z_f = \sum_i \frac{X_i}{1 - c_i} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot c_i \cdot t_i \quad (56)$$

Ztráta sdílením tepla do okolí zohledňuje množství tepla, které uniká pláštěm do okolí. Ztráta závisí na kvalitě izolace stěn, způsobu oplechování, velikost povrchu a výkonem kotle.

$Z_{sv} = 0,02$ - tato hodnota byla na doporučení vedoucího práce odečtena z příslušného obrázku uvedeného v normě ČSN EN 12952-15.

Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta):

Tato ztráta představuje teplo odcházející z kotle ve spalinách. Tato ztráta je nevýznamnější a nejvíce ovlivňuje účinnost kotle. Velikost této ztráty závisí na teplotě spalin, přebytku vzduchu α ve spalinách za kotlem. Existuje několik možných výpočtů. Pro tuto práci byl vybrán následovný vztah, z důvodu využití již vypočtených hodnot:

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_s^{t_k, \alpha_k} - I_s^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_{ired}} \quad (57)$$

Ze známých účinností je možné určit účinnost kotle:

$$\eta = 1 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k \quad (58)$$

3.4 Zjednodušený tepelný výpočet ohniště

Teplota nechlazeného plamene je teoretická adiabatická spalovací teplota, která by byla v plamenu, pokud by z něho nebylo odváděno teplo. Lze ji určit z celkového tepla uvolněného v ohništi (součtem veškerých tepel uvolněných v ohništi), z paliva a popřípadě vzduchu.

$$Q_u = Q_{ired} \cdot (1 - Z_{co} - Z_c - Z_f) - Q_v - Q_{cz} \quad (59)$$

Boltzmanovo číslo je bezrozměrné podobnostní kritérium definované pro účely výpočtů ohnišť:

$$Bo = \frac{(1 - Z_{sv}^0) \cdot \dot{m}_{pv} \cdot (O_S \bar{c}_S)_0}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot S_{st} \cdot (273 + t_{np})^3} \quad (60)$$

Poměrná ztráta sálání a vedením tepla do okolí připadající na ohniště byla zvolena:

$$Z_{sv}^o = 0,0015 \quad (61)$$

Střední tepelná jímavost spalin v ohništi je dána vztahem:

$$(O_S \bar{c}_S)_o = \frac{Q_u - (1+r) \cdot I_S^{t_{ok} \cdot \alpha_{ok}}}{t_{np} - t_{ok}} \quad (62)$$

Součinitel M respektuje průběh teplot v ohništi a závisí na poloze maximální teploty plamene a na druhu spalovaného paliva:

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot \chi_{pl} \quad (63)$$

Parametr χ_{pl} pro spalování v silné vrstvě na pevné nebo pohyblivé roštu byl volen:

$$\chi_{pl} = 0,14$$

Stupeň černosti plamene vyjadřuje sálavé vlastnosti plamene a stěn ohniště. Pro roštové ohniště se a_o vypočte následovně:

$$a_o = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R_l}{S_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\psi}) \cdot \left(1 - \frac{R_l}{S_{st}}\right)} \quad (64)$$

Koncentrace popílku ve spalinách lze určit:

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ii} + 1)}{2 \cdot G_S} \quad (65)$$

Hmotnost spalin v poměrném úletu:

$$G_S = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{VVmin} \quad (66)$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi:

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{ok} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (67)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny:

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt[3]{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s \quad (68)$$

Objemové podíly tříatomových plynů r_{H_2O} a r_{CO_2} ve spalínách lze určit:

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (69)$$

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (70)$$

Součet objemové koncentrace tříatomových plynů ve spalínách:

$$r_S = r_{H_2O} + r_{CO_2} \quad (71)$$

Účinná tloušťka sálové plochy ohniště:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{S_{st}} \quad (72)$$

Parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách:

$$p_S = r_S \cdot p \quad (73)$$

Optická hustota plamene:

$$k \cdot p \cdot s = (k_S \cdot r_S + k_P \cdot \mu_{pk} + k_{kok} \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2) \cdot p \cdot s \quad (74)$$

Součinitel $k_{kok} = 10$

Pro dřevo $\kappa_1 = 0,5$

Pro roštové ohniště $\kappa_2 = 0,03$

Stupeň černosti plamene při spalování tuhých paliv:

$$a_{pl} = 1 - e^{-kps} \quad (75)$$

3.5 Teplota spalín na výstupu z ohniště:

Teplotu spalín na výstupu není možné vypočítat přímo, neboť určité parametry užívané při výpočtu jsou na výstupní teplotě spalín závislé. Proto se používá postup, kdy se zvolí teplota spalín na výstupu z ohniště a s jejím užitím se dopočtou potřebné parametry. Pokud se vypočtená teplota liší od zvolené o 50 °C, lze vypočtenou teplotu považovat za správnou. Jestliže je rozdíl obou hodnot větší, výpočet se opakuje s použitím vypočtené teploty. Pro tuto práci byla iterace spočítána pro 100 cyklů a shoda teplot byla do 0,5 °C.

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)} - 273,15 \quad (76)$$

Po znalosti teploty t_{ok} j možné vypočítat tepelný výkon zachycený v prostoru ohniště Q_o :

$$Q_o = \dot{m}_{pv} \cdot (Q_u - (1 + r) \cdot I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}} - Z_{sv}^o \cdot Q_{ired}) \quad (77)$$

4. Praktická část

Cílem praktické části diplomové práce bylo experimentální ověření vlivu přívodu recirkulovaných spalin do spalovacího vzduchu na emise hlavních znečišťujících látek, tepelnou účinnost kotle, a rovněž také její vliv na teplotu na konci ohniště. Experimenty byly provedeny na roštovém kotli na biomasu. Experimenty zahrnovaly přimíchávání recirkulovaných spalin, odebíraných ze spalin za kotlem, v různých poměrech do primárního a sekundárního vzduchu, a byl vyhodnocován vliv na tyto parametry. V případě testování vlivu recirkulace spalin na teplotu na konci ohniště bylo rovněž provedeno porovnání mezi její naměřenou hodnotou a hodnotou získanou teoretickým výpočtem.

4.1 Popis experimentu

Tato kapitola popisuje metodiku experimentů použitých pro tuto práci. Experimenty byly realizovány v laboratoři ČVUT Fakultě strojní v Praze na Julisce.

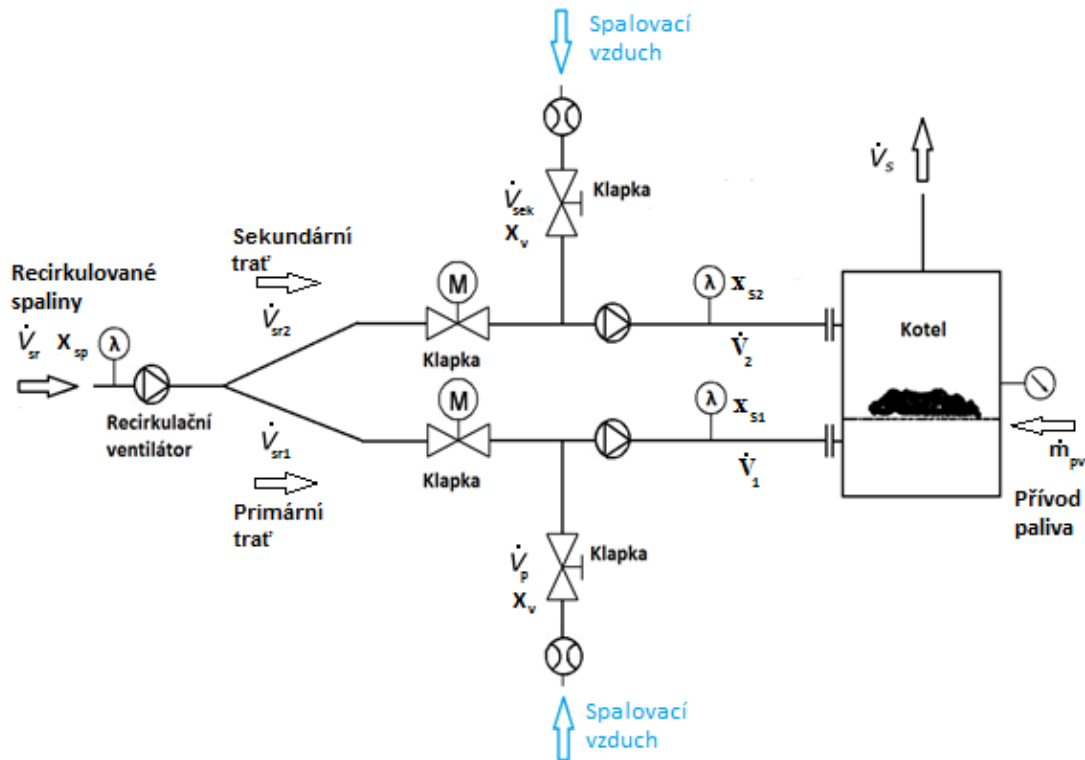
4.1.1 Popis kotle

Pro experimentální měření byl použit horkovodní kotel o výkonu 100 kW určený pro spalování biomasy, který zobrazen na následujícím obrázku. Kotel je sériově dodáván bez systému recirkulace spalin, tento systém byl na kotel instalován dodatečně. Palivo je dopravováno z násypky do spalovací komory pomocí vynášecího šneku, který je poháněn elektromotorem. Množství paliva přiváděného do kotle je možné regulovat dobou prodlevy a dobou chodu šnekového dopravníku paliva. Ve spalovací komoře je ocelový rošt. Rošt má pohyblivé roštnice a je skloněný směrem od vstupu paliva k výsypce popela.



Obr. 11 - Kotel s experimentální recirkulační tratí

Schéma zapojení vstupů primárního a sekundárního vzduchu a recirkulace spalin je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 12 - Schéma vstupů a výstupů průtoků vzduchů, spalin a paliva do kotle [30]

Vzduch pro spalovací proces je přiváděn dvěma oddělenými přívody. Primární přívod spalovacího vzduchu je označen \dot{V}_p a přívod spalovacího vzduchu sekundárního je označen \dot{V}_{sek} . \dot{V}_p je přiváděn do spalovací komory pod rošt a \dot{V}_{sek} je přiváděn z boků. Oba přívody mají vlastní ventilátor. Obě potrubí pro přívod vzduchu obsahují klapky ovládané servomotory. Pomocí nastavení klapky a výkonu ventilátorů lze měnit průtok přiváděného vzduchu do kotle.

Ve spalinovém traktu, kudy proudí průtok spalin \dot{V}_s , je instalován spalinový ventilátor, který udržuje podtlak ve spalovací komoře a dopravuje spaliny do komína. Za spalinovým ventilátorem bylo umístěno odběrové místo pro analýzu spalin. Za spalinovým ventilátorem je umístěn odběr spalin do větve recirkulace, ve které je rovněž umístěn recirkulační ventilátor. Průtok recirkulovaných spalin je označen \dot{V}_{sr} .

Odebírané spaliny recirkulačním ventilátorem putují potrubím až do rozbočení ve tvaru Y a rozdělují se na dvě části. Jedna část \dot{V}_{sr1} se směšuje do přívodu primárního vzduchu a druhá část \dot{V}_{sr2} do sekundárního přívodu. Přívody recirkulovaných spalin jsou také vybaveny regulačními klapkami. Nastavením klapky je možno upravovat průtok spalin anebo recirkulační potrubí uzavřít. Koncentrace kyslíku v recirkulovaných spalinách je stejná, jako ve spalinách, ale mění se po smíšení se vzduchem. V primární trati je

koncentrace kyslíku ve směsi značená x_{S1} . To samé platí i pro sekundární trať, pouze s jiným značením x_{S2} . Koncentrace kyslíku po smíšení recirkulovaných spalin a vzduchu byly měřené elektrochemickým analyzátozem kyslíku Aseko Asin s měřicím rozsahem (0 - 25) % objemových.



Obr. 13 - Hlavní odtahový ventilátor a recirkulační ventilátor



Obr. 14 - Rozdělení recirkulačního potrubí do primárního a sekundárního přívodu

Je možné ovládat výkon všech ventilátorů a natočení klapky a tím řídit jednotlivé průtoky vzduchů nebo spalin. Rychlost vzduchu v přívodním potrubí je měřena pomocí anemometrů, pracujících na principu ochlazování žhaveného drátku. Anemometry nebyly

pro experimenty kalibrované, proto bylo využito faktu podobnosti jejich kalibračních křivek a počítáno s relativními hodnotami. Hodnoty koncentrace O₂, CO₂, CO, NO_x byly měřeny analyzátozem plyných složek za spalínovým ventilátorem. Byl použit analyzátor spalín od výrobce MRU Air, typ MGA 5.

Spalovací proces je řízen jednak ovládacím panelem kotle instalovaným jeho výrobcem. Přes tento panel je možno ovládat přívod paliva, pohyb roštu a kontrolovat různé provozní údaje kotle. Druhá část řízení je zajištěna pomocí počítače se softwarem Matlab Simulink. Experimenty probíhaly ve spolupráci se studentem ČVUT Fakulty strojní, ústavu Přístrojové a řídicí techniky. Jeho úkolem bylo navrhnout a vytvořit funkční model v Simulinku pro ovládání jednotlivých komponent recirkulace. Tento vytvořený model byl následně aplikován pro nastavování potřebných parametrů v průběhu experimentů.

4.1.2 Palivo

Při experimentech byla spalována dřevní štěpka. V průběhu měření byly odebírány vzorky paliva přímo z podávacího šneku a následně byl zjišťován obsah vody pro určení výhřevnosti. Ten byl určen na základě úbytku hmotnosti vzorku po sušení v horkovzdušné sušárně při teplotě 105 °C po dobu 1 hodiny. Stanovené hodnoty obsahu vody v palivu jsou uvedené v tab. 9 pod označením W^r .

<i>Stav</i>	<i>W^r</i>
	%
S1	14,95
S2	14,45
S3	14,45
S4	14,45
S5	15,38
S6	15,38
S7	15,38
S8	15,38

Tab. 9 - Obsah vody v palivu



Obr. 15 - Navážené vzorky paliva před vložením do sušárny

Množství paliva m_{pv} vstupujícího do kotle bylo určeno z měřených hmotnostních průtoků paliva přiváděného pootočením šneku. Odebrání a zvážení paliva bylo provedeno třikrát. Střední hodnota průtoku odebíraného paliva je $\dot{m}_{pv} = 60,77$ g/s. Konečná hodnota paliva vstupujícího do kotle byla přepočtena podle rovnice (40), kde zohledňuje časové nastavení chodu a klidu podávacího šneku. Časové nastavení šneku proto všechny experimenty bylo následující: 2 s chod a 13 s klid, kromě experimentu S1. U tohoto experimentu bylo časové nastavení 2 s chod šneku a 11 s klid. Vysvětlení označení a nastavení parametrů jednotlivých experimentů je níže v této kapitole.

Určení pro experiment S1:

$$\dot{m}_{pv1} = \frac{60,77 \cdot 2}{2+11} = 9,349 \text{ g/s} = 34 \text{ kg/h} \quad (78)$$

Určení pro experimenty S2 až S8, pro které bylo nastavení stejné:

$$\dot{m}_{pv2} = \frac{60,77 \cdot 2}{2+13} = 8,103 \text{ g/s} = 29 \text{ kg/h} \quad (79)$$

Stanovením množství vlhkosti v biomase proběhlo podle normy ČSN P CEN/TS 14774-1 až 3 s experimentální směrodatnou odchylkou $X_W=0,43$ %, která byla způsobena s proměnlivou kvalitou paliva. Kalibrace průtoku paliva byla provedena 3x a podle délky režimu chodu a klidu byl stanoven konečný průtok paliva se směrodatnou odchylkou $X_{pv}=1,6$ kg/h.

4.1.3 Metodika experimentů

Pro experimenty bylo vybráno 8 stavů s označením S1 až S8.

Experiment s označením S1 byl měřen jako referenční s vypnutou recirkulační tratí, tzn. klasický provozní stav kotle.

Při experimentu S2 byla recirkulační trať otevřená a recirkulační ventilátor byl zapnutý. Do primární tratě se přimíchávaly ke vzduchu i spaliny ve zvoleném poměru. 80 % tvořil vzduch a 20 % spaliny.

Další experimenty s označením S3 a S4 principiálně odpovídají stavu S2 s tím rozdílem, že byly rozdílné poměry míšení vzduchu a spalin. Pro S3 se přivádělo 60 % vzduchu a 40 % recirkulovaných spalin. Při experimentu S4 bylo použito 40 % vzduchu a 60 % recirkulovaných spalin.

Experimenty s označením S5 a S6 probíhaly s otevřenou recirkulační tratí a se zapnutým recirkulačním ventilátorem. Při těchto stavech měření byly recirkulované spaliny přiváděny a míchány do sekundárního přívodu vzduchu. Při stavu S5 se přivádělo 80 % vzduchu a 20 % recirkulovaných spalin. Při stavu S6 60 % vzduchu a 40 % recirkulovaných spalin.

Dále, pro experimenty S7 a S8 byla recirkulační trať otevřená a recirkulované spaliny se míchaly do primární i sekundární tratě současně. Při stavu S7 se míchalo 90 % vzduchu a 10 % recirkulovaných spalin do primární tratě a stejný poměr platil i pro sekundární trať. Pro stav S8 bylo použito 80 % vzduchu a 20 % spalin pro primární i sekundární trať.

Jednotlivé stavy měření jsou též znázorněny v tabulkách 10 až 11. Tab. 10 zobrazuje, kolik procent vzduchu se přimíchalo do primární a sekundární větve. Následně tab. 11 zobrazuje procenta přiváděných recirkulovaných spalin do primární a sekundární větve.

		<i>Vzduch míchaný do primární větve, %</i>				
		<i>100</i>	<i>90</i>	<i>80</i>	<i>60</i>	<i>40</i>
<i>Vzduch míchaný do sekundární větve, %</i>	<i>100</i>	S1	-	S2	S3	S4
	<i>90</i>	-	S7	-	-	-
	<i>80</i>	S5	-	S8	-	-
	<i>60</i>	S6	-	-	-	-

Tab. 10 – Procenta vzduchu míchaného do primární a sekundární tratě

		<i>Recirkulované spaliny míchané do primární větve, %</i>				
		<i>0</i>	<i>10</i>	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>
<i>Recirkulované spaliny míchané sekundární větve, %</i>	<i>0</i>	S1	-	S2	S3	S4
	<i>10</i>	-	S7	-	-	-
	<i>20</i>	S5	-	S8	-	-
	<i>40</i>	S6	-	-	-	-

Tab. 11 – Procenta míchaných recirkulovaných spalin do primární a sekundární tratě

4.2 Naměřené hodnoty

Při experimentech byly měřené hodnoty ukládány v elektronické podobě. Sledovány byly následující veličiny: obsah kyslíku ve spalinách, obsah kyslíku ve směsi vzduchu a recirkulovaných spalin, koncentrace NO_x a koncentrace CO taktéž ve spalinách. Aby bylo možno naměřené hodnoty porovnat se specifickým emisním limitem (tab. 7) bylo nutno data přepočítat z objemových jednotek ppm c_{CO} a ppm c_{NO_x} na hmotnostní koncentrace při referenčních podmínkách a vztáhnout k referenčnímu obsahu kyslíku. Naměřené hodnoty byly přepočteny podle následujících vztahů.

Přepočtové faktory f_{CO} a f_{NO_x} byly vypočteny podle:

$$f_{\text{CO}} = \frac{M_{w_{\text{CO}}} \cdot p_N}{R \cdot T_N} \quad (80)$$

$$f_{\text{NO}_x} = \frac{M_{w_{\text{NO}_x}} \cdot p_N}{R \cdot T_N} \quad (81)$$

Přepočet z objemové koncentrace na hmotnostní koncentraci při referenčních podmínkách pro CO:

$$w_{\text{CO},N} = f_{\text{CO}} \cdot c_{\text{CO}} \quad (82)$$

A obdobně pro NO_x :

$$w_{\text{NO}_x,N} = f_{\text{NO}_x} \cdot c_{\text{NO}_x} \quad (83)$$

Hodnoty $w_{\text{CO},N}$ a $w_{\text{NO}_x,N}$ byly dále přepočítané k referenčnímu obsahu O_2 podle následujících vztahů:

$$w_{\text{CO},N}^R = w_{\text{CO},N} \cdot \frac{21 - \omega_{\text{O}_2}^R}{21 - \omega_{\text{O}_2}} \quad (84)$$

$$w_{NO_x,N}^R = w_{NO_x,N} \cdot \frac{21 - \omega_{O_2}^R}{21 - \omega_{O_2}} \quad (85)$$

, kde bylo dosazeno za $\omega_{O_2}^R = 11 \%$ (pro biomasu).

<i>Přepočtové faktory z jednotky ppm na mg/Nm³</i>		
CO	1,249	mg/Nm ³
NO _x	2,053	mg/Nm ³

Tab. 12 – Přepočtové faktory

V následujících tabulkách jsou uvedena vyhodnocená data pro každý experiment. V tab. 13 jsou hodnoty pro koncentraci O₂ ve spalinách.

<i>Stav</i>	<i>O₂ – ve spalinách</i>			
	<i>Sřední hodnota</i>	<i>Sm. odchylka</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>
	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
S1	5,7	0,8	7,6	4,1
S2	5,7	0,6	6,7	4,3
S3	6,4	0,5	8,1	5,2
S4	5,9	0,6	7,3	4,3
S5	5,7	0,6	7,1	4,3
S6	6,1	1,2	7,8	2,4
S7	7,9	1,4	10,2	4,5
S8	8,0	0,7	9,5	6,4

Tab. 13 – Naměřené hodnoty O₂ – ve spalinách

V tab. 14 jsou uvedené koncentrace O₂ ve směsi vzduchu a recirkulovaných spalin. Sloupeček s názvem „místo měření“, znamená místo, kde byla koncentrace měřena (podle experimentu). Např. u stavu S7 se recirkulovaly spaliny do primární i sekundární tratě, proto měření probíhalo v obou tratích.

<i>Stav</i>	<i>Místo měření</i>	<i>O₂</i>			
		<i>Sřední hodnota</i>	<i>Sm. odchylka</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>
		<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>

Stav	Místo měření	O ₂			
		Střední hodnota	Sm. odchylka	Maximum	Minimum
		%	%	%	%
S1	-	-	-	-	-
S2	Primární trať	17,8	0,2	18,2	17,4
S3	Primární trať	15,1	0,4	16,2	14,2
S4	Primární trať	12,0	0,4	12,9	10,9
S5	Sekundární trať	18,2	0,9	19,8	16,2
S6	Sekundární trať	15,4	0,3	16,0	14,5
S7	Primární trať	19,6	0,1	19,8	19,6
	Sekundární trať	19,5	0,2	19,7	19,2
S8	Primární trať	18,9	0,1	19,2	18,7
	Sekundární trať	19,1	0,2	19,6	18,7

Tab. 14 – Naměřené hodnoty O₂ - ve směsi recirkulovaných spalin a vzduchu

V tab. 15 jsou uvedeny hodnoty hmotnostní koncentrace CO přepočtené na referenční podmínky a obsah kyslíku.

Stav	w _{CO,N} ^R			
	Střední hodnota	Sm. odchylka	Maximum	Minimum
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
S1	159,6	88,1	461,7	58,2
S2	66,7	41,0	219,7	19,6
S3	5,2	1,2	7,7	3,3
S4	7,9	1,2	12,9	4,4
S5	1849,1	917,1	4385,5	413,7
S6	4157,1	778,9	5569,5	1753,7
S7	409,3	323,4	1442,5	108,6
S8	202,0	111,3	719,2	62,5

Tab. 15 – Naměřené koncentrace CO

V tab. 16 jsou uvedeny hodnoty hmotnostní koncentrace NO_x přepočtené na referenční podmínky a obsah kyslíku.

Stav	$w_{NO_x,N}^R$			
	<i>Střední hodnota</i>	<i>Sm. odchylka</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
S1	462,6	21,9	512,3	403,4
S2	241,1	18,8	299,4	206,3
S3	300,4	12,2	339,0	268,0
S4	258,5	12,2	291,1	226,8
S5	191,7	19,3	239,3	154,6
S6	213,1	37,4	270,4	133,3
S7	216,6	29,7	260,4	133,6
S8	210,2	14,5	253,9	178,7

Tab. 16 – Naměřené koncentrace NO_x

V tab. 17 jsou uvedené naměřené hodnoty teploty spalin t_{sp} :

Stav	t_{sp}			
	<i>Střední hodnota</i>	<i>Sm. odchylka</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>
	°C	°C	°C	°C
S1	179,7	3,5	185,0	172,0
S2	139,2	5,9	148,0	128,0
S3	171,7	2,0	176,0	166,0
S4	196,3	3,0	200,0	186,0
S5	147,7	1,4	150,0	145,0
S6	201,7	3,6	206,0	189,0
S7	179,0	13,7	201,0	106,0
S8	209,9	7,4	217,0	196,0

Tab. 17 – Naměřené hodnoty teploty spalin

V tab. 18 jsou uvedené naměřené hodnoty teploty na konci ohniště t_{ok_m} . Tato hodnota bude dále v textu srovnána s teplotou na konci ohniště označenou t_{ok} , která byla vypočítána ve výpočtové části. Pro experiment S1 hodnoty nejsou uvedené z důvodu poruchy měřidla v průběhu experimentu.

Stav	t_{ok_m}			
	Střední hodnota	Sm. odchylka	Maximum	Minimum
	°C	°C	°C	°C
S1	-	-	-	-
S2	924,9	13,0	955,0	899,6
S3	940,5	19,6	959,2	854,0
S4	1003,5	11,6	1026,5	981,4
S5	993,0	16,0	1020,4	958,3
S6	1064,7	16,9	1101,6	1034,8
S7	1035,1	25,8	1121,4	993,1
S8	1050,4	13,6	1088,2	1020,8

Tab. 18 – Naměřené hodnoty teploty na konci ohniště

4.3 Výsledky

V následujících tabulkách 19 až 22 jsou uvedeny vypočtené hodnoty podle kapitoly 3 na základě naměřených dat. V tab. 19 jsou uvedeny hodnoty součinitele přebytku spalovacího vzduchu α , průtoků spalin \dot{V}_s , vzduchu \dot{V}_{vz} , recirkulovaných spalin \dot{V}_{sr} , recirkulačního poměru r a účinnosti kotle η . Pro experiment S1 nejsou hodnoty \dot{V}_{sr} a r uvedeny, jelikož se jednalo o tzv. referenční stav - bez recirkulace.

Stav	α	\dot{V}_s	\dot{V}_{vz}	\dot{V}_{sr}	r	η
	-	Nm^3/h	Nm^3/h	Nm^3/h	-	%
S1	1,38	251	230	0	0	85
S2	1,38	215	198	15	0,07	88
S3	1,44	224	206	21	0,10	85
S4	1,39	216	199	29	0,16	84
S5	1,38	212	194	12	0,06	87
S6	1,41	216	198	29	0,16	82
S7	1,60	243	225	28	0,13	83
S8	1,62	246	228	41	0,20	81

Tab. 19 – Vypočtené výsledky

V tab. 20 jsou uvedené spočtené hodnoty teplot nechlazeného plamene t_{np} a teplot na konci ohniště t_{ok} .

<i>Stav</i>	t_{np}	t_{ok}
	°C	°C
S1	1525	1127
S2	1491	1048
S3	1473	1032
S4	1529	1029
S5	1493	1054
S6	1502	1016
S7	1378	985
S8	1391	960

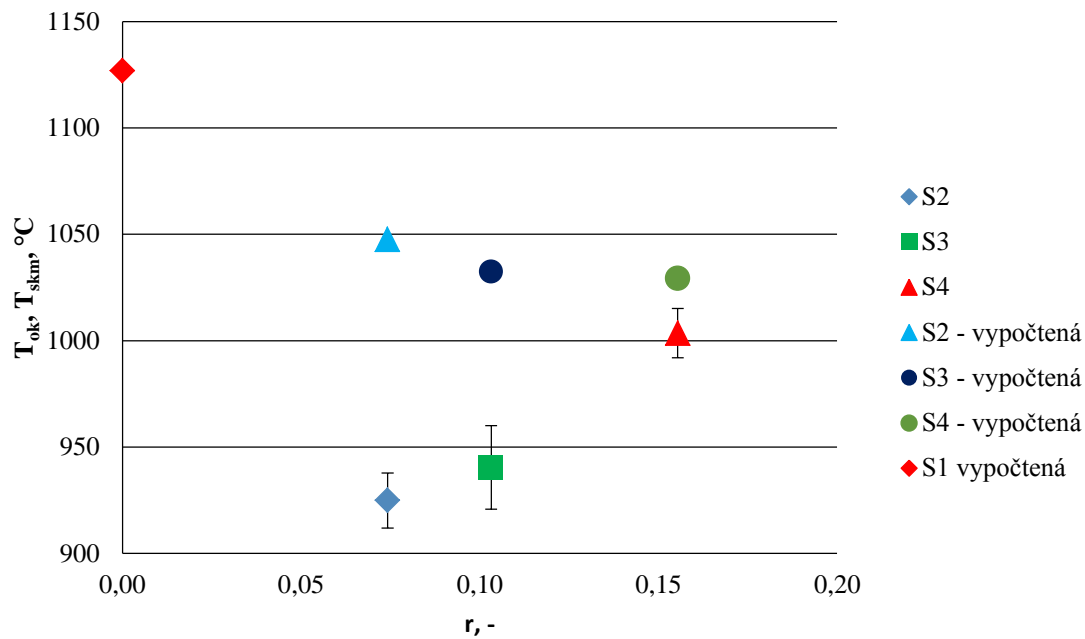
Tab. 20 – Vypočtené teploty nechlazeného plaměne a na konci ohniště

Tab. 21 jsou uvedeny rozdíly mezi teplotou vypočítanou t_{ok} a teplotou změřenou t_{okm} . V řádcích jsou uvedeny vypočtené hodnoty pro jednotlivé experimenty.

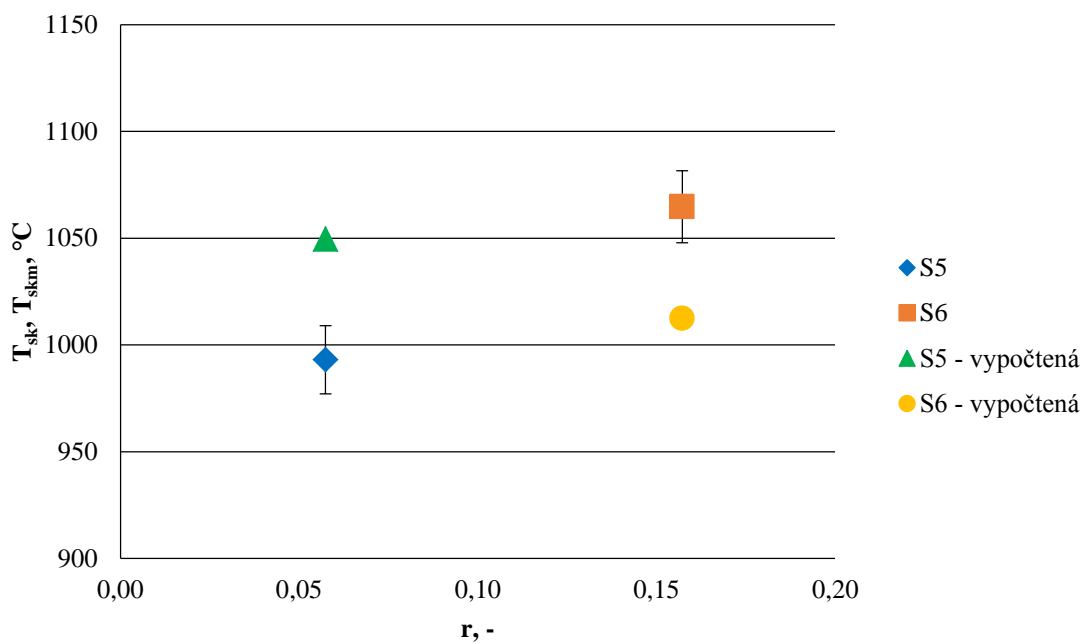
<i>Stav</i>	$\Delta t_{ok} - t_{okm}$
	°C
S1	-
S2	123
S3	92
S4	26
S5	60
S6	-49
S7	-50
S8	-90

Tab. 21 – Porovnání teploty vypočítané a naměřené

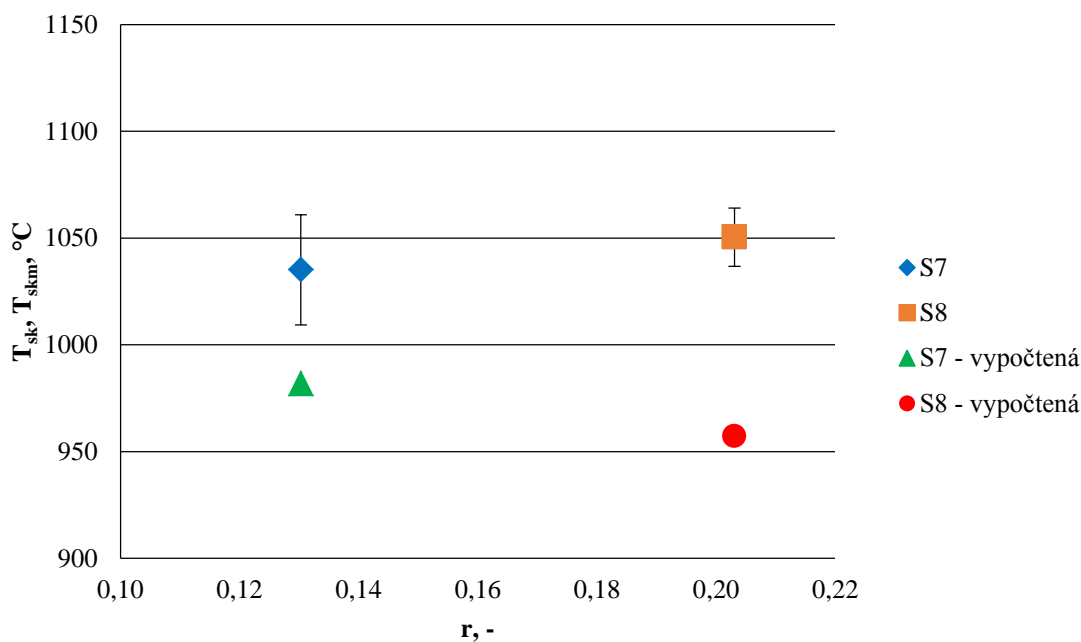
V následujících obrázcích jsou vyznačené t_{okm} a t_{ok} pro každý experiment. U naměřených hodnot t_{okm} jsou vyznačené odchylky, které byly spočítané jako směrodatné odchylky z naměřených dat. Teploty u jednotlivých experimentů byly rozděleny třech obrázků podle toho, do jaké větve nebo větví byly přiváděny recirkulované spaliny a toto rozdělení je stejné i pro následující obrázky.



Obr. 16 - Teploty na konci ohniště pro recirkulaci do primární tratě a referenční stav

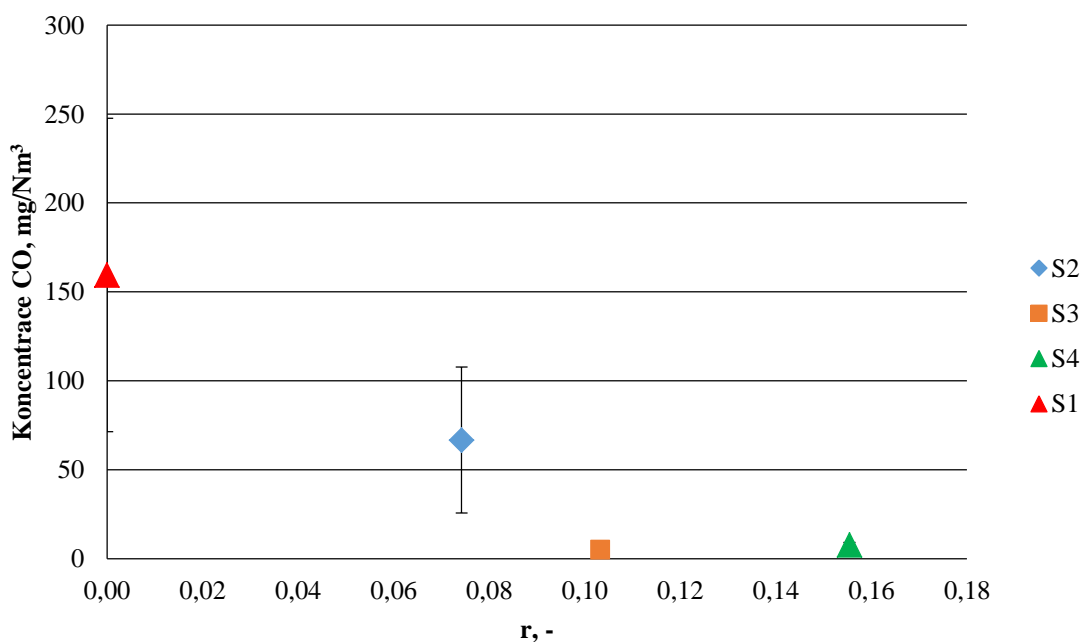


Obr. 17 - Teploty na konci ohniště pro recirkulaci do sekundární tratě

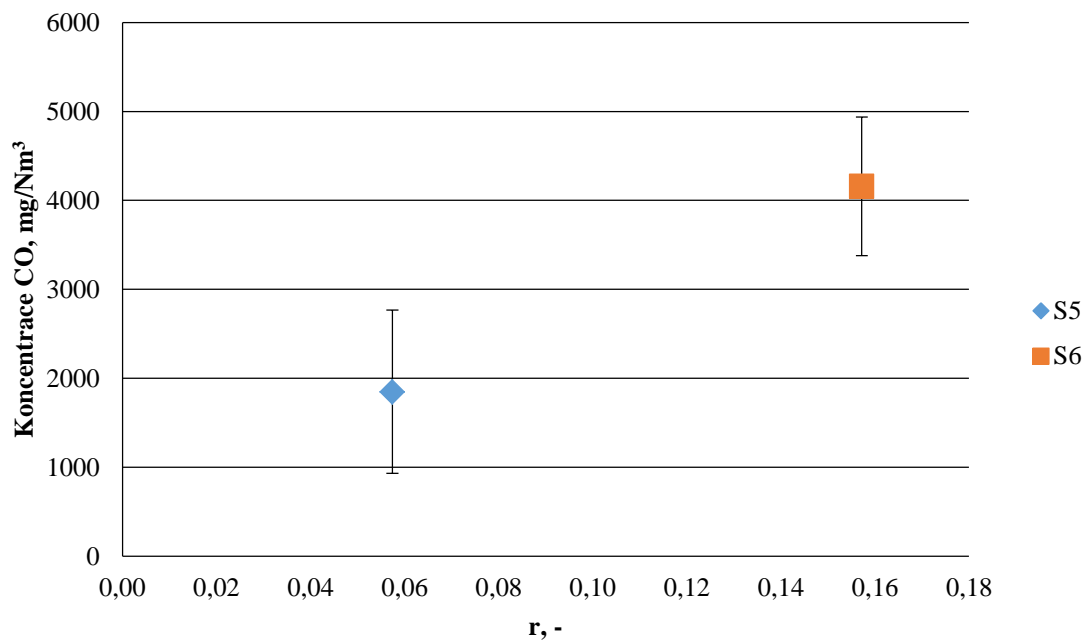


Obr. 18 - Teploty na konci ohniště pro recirkulaci do obou tratí

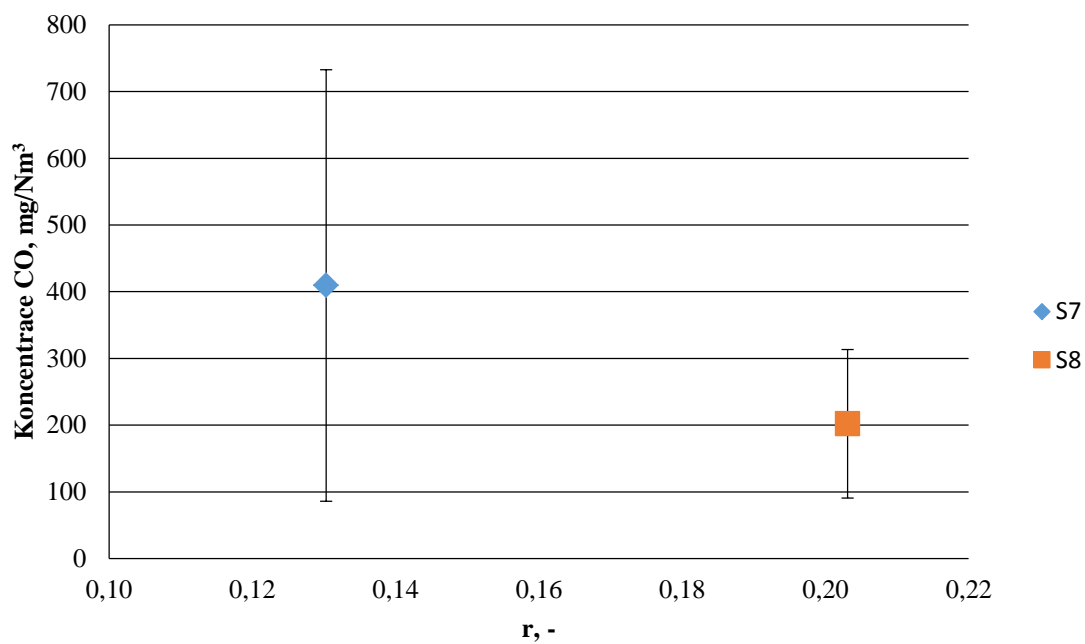
V následujících obrázcích jsou zobrazeny koncentrace $w_{CO,N}^R$ v závislosti na recirkulačním poměru r . U hodnot jsou zobrazeny nejistoty, které jsou vyjádřené jako směrodatné odchylky stanovené pro naměřená data. V obrázku pro stavy S3 a S4 jsou odchylky nepatrné a jejich velikost není v měřítku obrázku rozpoznatelná.



Obr. 19 – Koncentrace $w_{CO,N}^R$ - recirkulace do primární tratě a referenční stav

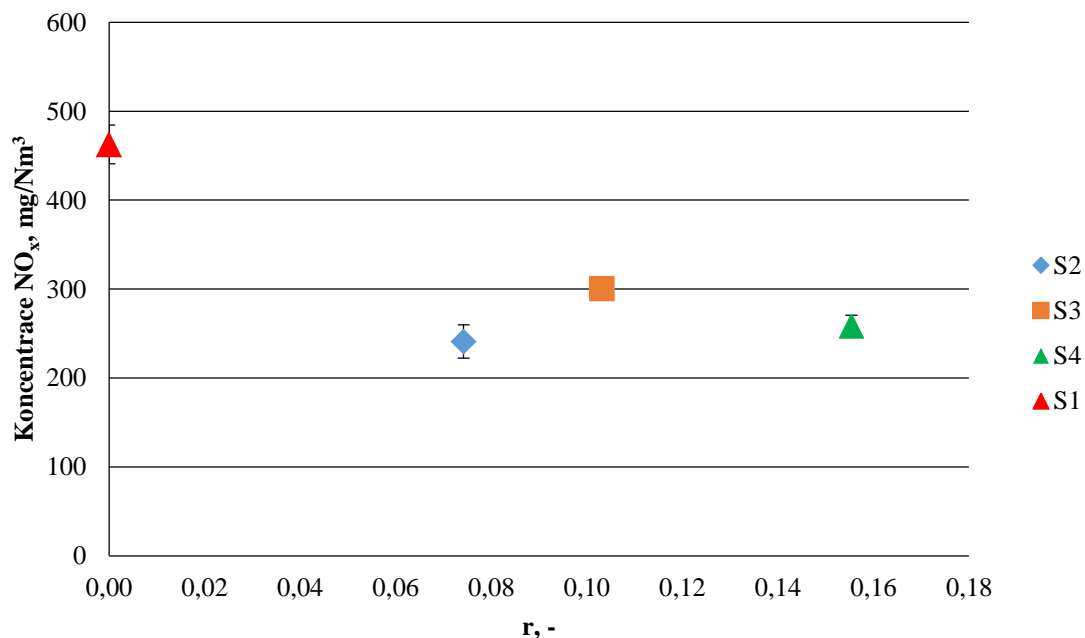


Obr. 20 - Koncentrace $w_{CO,N}^R$ recirkulace do sekundární tratě

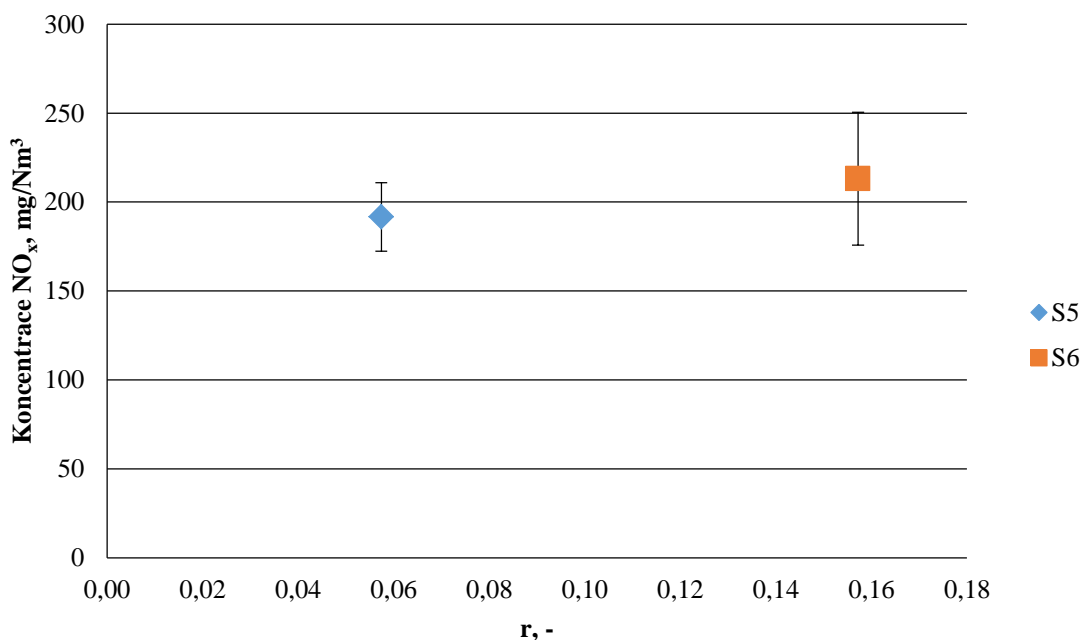


Obr. 21 - Koncentrace $w_{CO,N}^R$ recirkulace do obou tratí

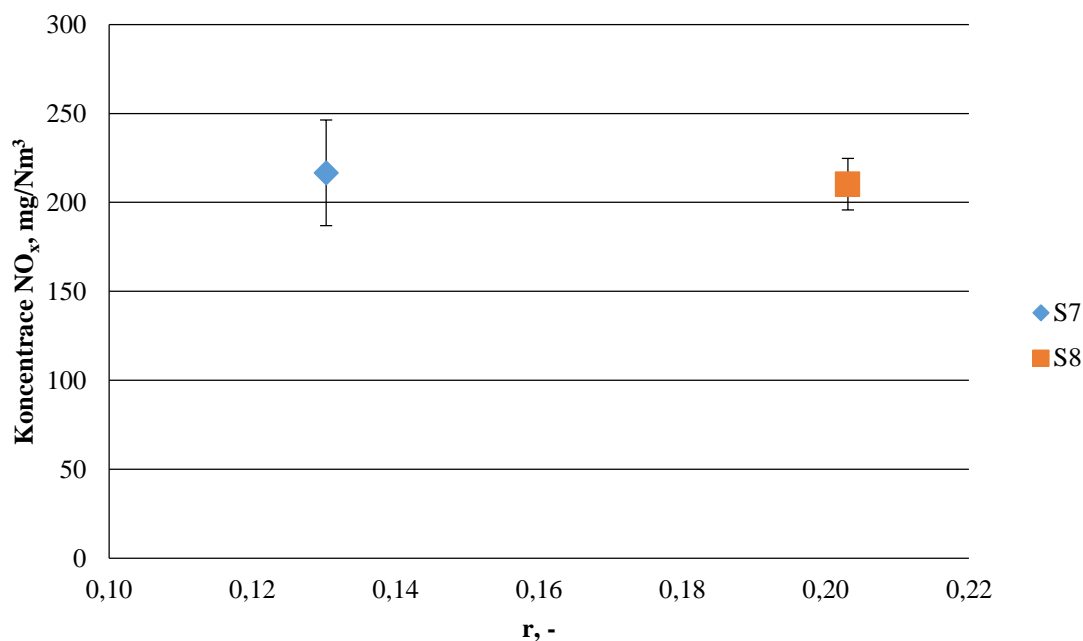
V následujících obrázcích jsou zobrazeny koncentrace $w_{NO_x,N}^R$ v závislosti na recirkulačním poměru r . U hodnot jsou zobrazeny nejistoty, které jsou vyjádřené jako směrodatné odchylky stanovené pro naměřená data. Z následujících obrázků je patrné, že u všech experimentů byly naměřené koncentrace NO_x stabilní.



Obr. 22 - - Koncentrace $w_{NO_x,N}^R$ - recirkulace do primární trati a referenční stav



Obr. 23 -- Koncentrace $w_{NO_x,N}^R$ - recirkulace do sekundární trati



Obr. 24 - - Koncentrace $w_{NO_x,N}^R$ - recirkulace do obou tratí

Hodnoty vypočítaného tepla uvolněné v ohništi Q_u jsou uvedeny v následující tabulce. Závislost Q_u na recirkulačním poměru r je v obr. 25, kde jsou uvedené hodnoty pro všechny experimenty. Teplo zachycené v prostoru ohniště Q_o vychází z určení Q_u a jeho vypočítané hodnoty jsou uvedené také v následující tabulce. Závislost tepla zachyceného v ohništi na r je zobrazena v obr. 26.

<i>Stav</i>	Q_u	Q_o
	<i>kW</i>	<i>kW</i>
S1	170,2	48,4
S2	142,4	38,9
S3	145,7	37,2
S4	147,3	37,4
S5	140,6	39,5
S6	144,1	35,9
S7	146,1	32,0
S8	149,3	29,9

Tab. 22 - Vypočtené hodnoty Q_u a Q_o pro všechny experimenty

5. Diskuze

Byla provedena série experimentů označených S1 až S8 pro zjištění vlivu velikosti recirkulace na emise CO a NO_x. Pro experimenty byl použit horkovodní kotel o výkonu 100 kW s instalovanou recirkulační tratí. Nejprve byl proveden experiment, kterým byl definován referenční stav, a poté byl postupně testován různý podíl přívodu recirkulovaných spalin do primárního a sekundárního vzduchu. Jako palivo byla použita dřevní štěpka bez specifických úprav.

V příloze (obrázky 27 až 42) jsou zobrazeny časové průběhy jednotlivých procesních veličin pro každý experiment. Vždy jsou spojeny výsledky koncentrace emise NO_x, teploty na konci spalovací komory t_{okm} , teploty spalin odchozích do komína t_{sp} . Koncentrace emise CO je spojená s hodnotami koncentrací kyslíku ve vystupujících spalinách a ve směsi vzduchu a recirkulovaných spalin.

U experimentu označeného S1 (experiment bez recirkulace spalin, tj. referenční stav) nebyla dokumentována t_{okm} z důvodu poruchy. Je vidět stabilní průběh t_{sp} . U koncentrace CO jsou patrné časté velké fluktuace, kterým odpovídají změny koncentrace kyslíku ve spalinách. Jedná se o běžný provoz kotle, kde určité nerovnoměrnosti v časovém průběhu emisí jsou dány přerušovaným přívodem paliva do spalovací komory.

Časové záznamy všech ostatních experimentů rovněž představují ustálené stavy provozu kotle bez provádění regulačních zásahů, a projevuje se zde rovněž nerovnoměrnost přívodu paliva do spalovací komory. Také je nutné zmínit tepelnou akumulaci kotle, která je v tomto případě velmi výrazná, neboť celá spalovací komora i dohořívající komora jsou obestavěny vyzdívkami ze žáruvzdorných cihel. Tato skutečnost se pak projevuje na částečném ovlivnění teploty na konci ohniště t_{okm} .

Dále budou diskutována některá základní naměřená data. Pro jednotlivé experimenty S1 až S8 byla sledována závislost koncentrace složek spalin CO, NO_x a O₂ ve spalinách na velikosti recirkulačního poměru r . Hodnoty koncentrace O₂ ve spalinách pro jednotlivé stavy jsou uvedeny v tab. 13 a je zřejmé, že se mezi jednotlivými stavy S2 až S6 mění pouze minimálně, což znamená, že se podařilo nastavit průtoky vzduchu a recirkulovaných spalin tak, že byl udržen celkový součinitel přebytku spalovacího vzduchu. V tab. 14 jsou uvedeny koncentrace O₂ v primární, resp. sekundární směsi vzduch-recirkulované spaliny, pak poklesem koncentrace O₂ dokumentuje podíl recirkulovaných spalin v obou směsích. Poněkud odlišná situace nastala u stavů S7 a S8, tj. při přimíchávání recirkulovaných spalin do obou tratí, kde je patrný mírný vzrůst koncentrace O₂ ve spalinách.

Koncentrace CO klesá se vzrůstajícím podílem recirkulovaných spalin do primární tratě a je tak dokumentován pozitivní vliv recirkulace spalin do primárního vzduchu, kdy dojde k dohoření nespáleného CO opětovným průchodem spalovací zónou. Pokles koncentrace CO je o 93 mg/Nm³ resp. o 58 % (oproti referenčnímu stavu S1) při podílu 20% recirkulovaných spalin a dále pokles o 157 mg/Nm³ resp. 97 % je sledován při přidávání

při 40 % recirkulovaných spalin do primárního vzduchu. Na druhou stranu, přimíchávání recirkulovaných spalin do sekundárního vzduchu způsobilo výrazný nárůst koncentrace CO, konkrétně o 1690 mg/Nm³ při 20 % podílu a o 3977 mg/Nm³ při míchání 40 % podílu recirkulovaných spalin do sekundárního vzduchu. Přívod recirkulovaných spalin do sekundárního vzduchu je tedy pro snižování emisí CO nevhodný. Při použití recirkulace spalin do primárního i sekundárního vzduchu rovněž způsobilo nárůst koncentrace CO, konkrétně o 156 mg/Nm³ pro míchání 10 % a o 27 mg/Nm³ pro míchání 20 % recirkulovaných spalin do obou tratí s velkou mírou její fluktuace oproti experimentů S2 až S4.

Přimíchávání recirkulovaných spalin do spalovacího vzduchu má vždy pozitivní vliv na koncentraci NO_x oproti referenčnímu stavu. Výsledky naměřených hodnot jsou uvedeny v tab. 23. Přimícháváním 20 % (S2) recirkulovaných spalin do primární tratě byl pozorován pokles o 48 % a dále byl zaznamenán pokles o 35 % při 40 % (S3) recirkulovaných spalin do stejné tratě. Přimícháváním recirkulovaných spalin do sekundární tratě dojde k většímu poklesu oproti recirkulaci do primární tratě ale s výraznější fluktuací. Konkrétně, přimícháním 20 % (S5) recirkulovaných spalin nastalo nejvýraznější snížení o 59 % a přimícháním 40 % (S6) recirkulovaných spalin byl zaznamenán pokles o 54 %. Přimícháním 10 % a 20 % recirkulovaných spalin do obou tratí byl zaznamenán pokles velmi podobný jako u experimentu S6.

Stav	$w_{CO,N}^R$	Limit pro CO	$w_{NO_x,N}^R$	Limit pro NO _x
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
S1	159,6	650	462,6	650
S2	66,7		241,1	
S3	5,2		300,4	
S4	7,9		258,5	
S5	1849,1		191,7	
S6	4157,1		213,1	
S7	409,3		216,6	
S8	202,0		210,2	

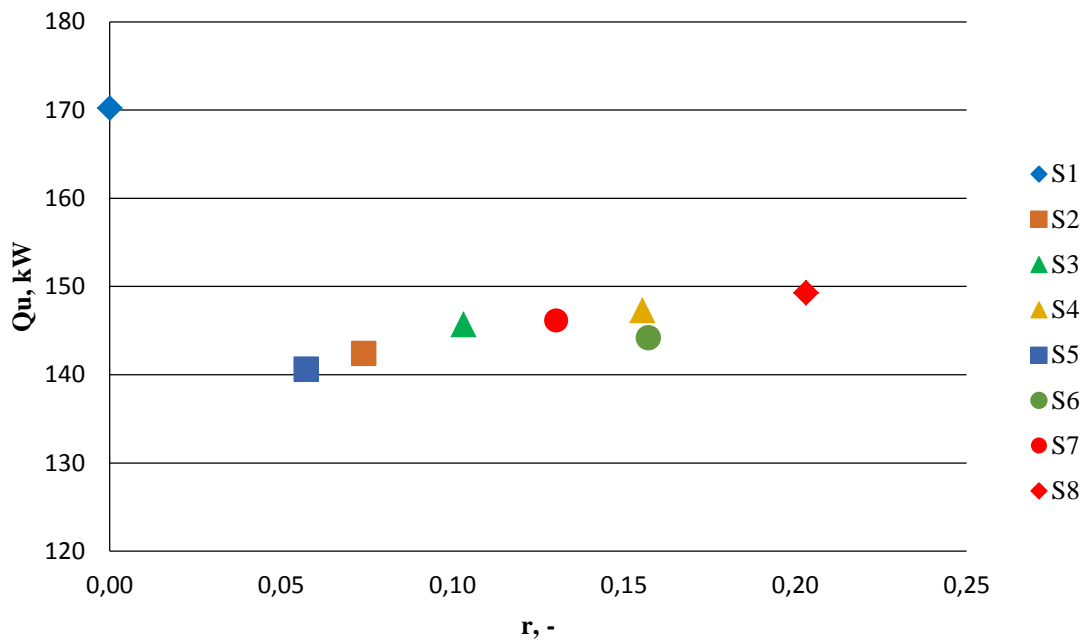
Tab. 23 - Porovnání naměřených emisí CO s emisními specifickými limity

Teplota spalin t_{sp} klesne při přidání recirkulovaných spalin do primární trati. Při zvyšování recirkulačního poměru r , teplota spalin již stoupá (vliv předeřevu). Stejný charakter má i použití recirkulovaných spalin do sekundární trati, s tím, že vliv předeřevu je zde markantnější. Stejný efekt je možné pozorovat i při přimíchávání recirkulovaných spalin do obou tratí. Fluktuace této teploty je výrazně menší oproti fluktuaci t_{okm} .

Při přimíchávání recirkulovaných spalin do primární trati je patrný nárůst t_{okm} (naměřené hodnoty jsou uvedené v tab. 18). Stejný efekt je možné pozorovat i při přimíchávání spalin do sekundární tratě. Naproti tomu ovšem stojí teoretický výpočet teploty na konci ohniště, ze kterého vyplývá opačný trend, tj. zvyšující se podíl recirkulovaných spalin snižuje adiabatickou teplotu plamene a rovněž i teplotu na konci ohniště. Opačné trendy naměřených a vypočtených hodnot lze s nejvyšší pravděpodobností přisoudit tepelné akumulaci vyzdívek spalovací komory, a tím potřeby podstatně delšího časového období na vyrovnání všech změn v tepelných tocích po provedení regulačního zásahu do kotle, než jaké bylo reálně použité. Nicméně i přes tuto skutečnost, že si trendy neodpovídají, je shoda naměřené a vypočtené hodnoty teploty na konci ohniště relativně dobrá. Nejvyšší rozdíl mezi teplotami je 123 °C při experimentu, kde se přimíchávalo 20 % recirkulovaných spalin do primární tratě. Nejmenší rozdíl mezi teplotami, který je 26 °C, byl pro experiment, kde bylo přimícháváno 60 % recirkulovaných spalin do primární tratě. Vypočtené a naměřené hodnoty jsou zobrazeny v obrázcích 16 až 18.

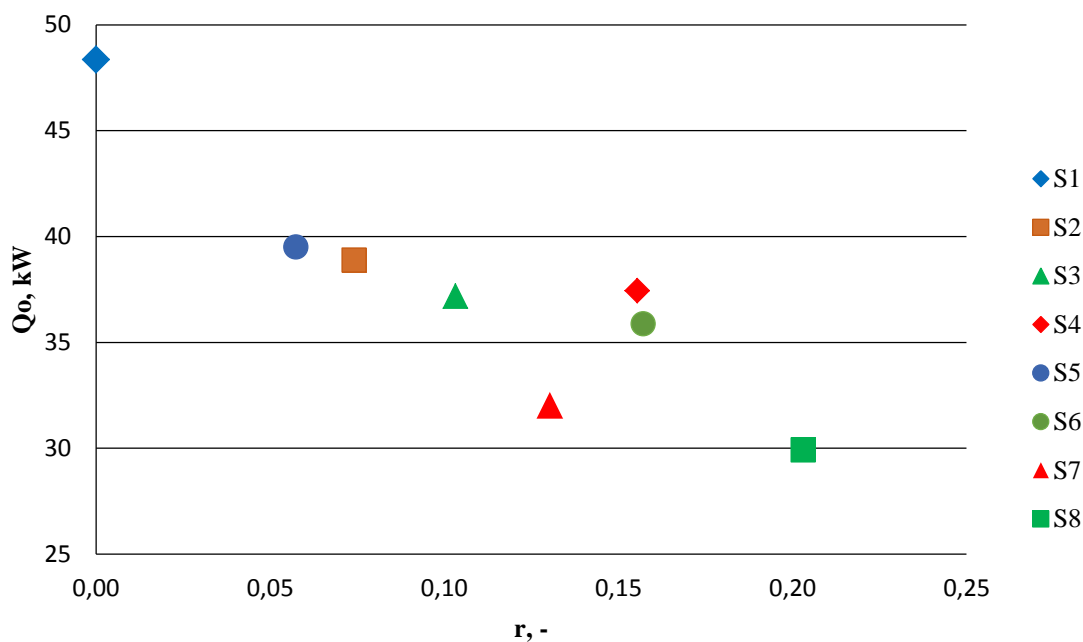
Tepelná účinnost kotle η závisí zejména na součiniteli přebytku spalovacího vzduchu a na teplotě spalin, ostatní tepelné ztráty byly ve všech případech příliš malé na to, aby mohly celkovou tepelnou účinnost kotle ovlivnit. Změna teploty spalin a přebytku vzduchu při přívodu recirkulovaných spalin je tedy hlavním faktorem, které tepelnou účinnost ovlivňují. Z tab. 12 vyplývá, že pro většinou sledovaných stavů se tepelná účinnost pohybuje v rozmezí (85 - 88) %, pouze v případě stavů S7 a S8, tj. při přívodu recirkulovaných spalin do primárního i sekundárního vzduchu, došlo k poklesu účinnosti na 81 % resp. 83 %, což odpovídá vyššímu součiniteli přebytku vzduchu v těchto stavech.

Teplu uvolněné v ohništi Q_u závisí především na redukované výhřevnosti paliva a teplu přivedeném ve spalovacím vzduchu. Pro referenční stav vyšlo Q_u 170,2 kW a tato hodnota je nejvyšší ze všech experimentů. To je dáno skutečností, že při experimentu S1 bylo přiváděno větší množství paliva. Pro experiment, kdy se přidávaly recirkulované spaliny do spalovacího vzduchu, uvolněné teplo vychází vyšší pro větší recirkulační součinitel. Tato skutečnost je dána tím, že do výpočtu přičítá hodnota tepla přivedeného recirkulovanými spalinami. Vypočtené hodnoty jsou uvedené v tab. 22 a v následujícím obrázku je popsána závislost zobrazena.



Obr. 25 - Teplo uvolněné v ohništi pro všechny experimenty

Teplo zachycené v prostoru ohniště Q_o je závislé na především na teple uvolněného v ohništi, recirkulačním poměru a množstvím paliva. Velikost zachyceného tepla dále ovlivněna velikostí výhřevné plochy kotle a jeho zanesení. Závislost tepla je zobrazena v následujícím obrázku. Pro referenční stav vyšla hodnota tepla nejvyšší 48,4 kW, což je důsledek přidáváním většího množství paliva. Pro experiment, kdy se přimíchávalo 20 % recirkulovaných spalin do sekundární tratě, vyšla hodnota o 8,9 kW nižší. U tohoto experimentu byl vypočten nejnižší recirkulační součinitel r . Výrazný rozdíl nastává u experimentu, kdy se přimíchávalo 20 % recirkulovaných spalin do obou tratí. U tohoto experimentu vyšlo Q_o nejnižší, oproti referenčnímu stavu o 18,5 kW. Tato skutečnost koresponduje s tím, že byl u tohoto experimentu vypočten nejvyšší recirkulační poměr r .



Obr. 26 - Teplo zachycené v prostoru ohniště pro všechny experimenty

Vypočtená teplota nechlazeného plamene t_{np} vychází z tepla, uvolněného v ohništi Q_u . Vypočtené teploty jsou uvedené v tab. 20. t_{np} při přidání recirkulovaných spalin do primární i sekundární tratě klesne pro všechny experimenty, kromě S4 v porovnání s referenčním stavem. V případě experimentu S4, kdy se přimíchávalo 60 % recirkulovaných spalin do primární trati, vyšla vypočtená teplota nejvyšší 1529 °C a pro referenční stav o nižší 4 °C nižší. Nejvyšší t_{np} vyšla u S4, protože do dílčího výpočtu Q_i^r se přičítalo teplo přivedené v recirkulovaných spalinách (u tohoto experimentu nejvyšší). Pro experimenty, kdy byly přimíchávané recirkulované spalin do obou tratí, vyšly vypočtené teploty nejnižší. Pro poměr 10 % recirkulovaných spalin je teplota o 151 °C nižší a pro 20 % recirkulovaných spalin taktéž o 138 °C nižší oproti experimentu S4.

Na závěr této práce bylo provedeno porovnání naměřených koncentrací v rámci experimentů s emisními specifickými hodnotami uvedeným ve vyhlášce č. 415/2015 Sb. (tab. 7). Porovnání bylo provedeno pro emise CO a NO_x. Pro přehlednost jsou v tab. 23 uvedeny naměřené hodnoty emisí CO a NO_x a jejich emisní specifické hodnoty.

Experimenty, kdy se přimíchávalo 20 % (S5) a 40 % (S6) recirkulovaných spalin do sekundárního vzduchu, limit pro koncentraci CO nespĺnily. Experiment S5 limit překročil o 1199,1 mg/Nm³ a experiment S6 o 3507,11 mg/Nm³, což je i nejvyšší hodnota v rámci experimentů. Oproti tomu nejnižší hodnota pro koncentraci CO je pro experimenty, kdy se přimíchávaly recirkulované spalin do primární trati v poměru 40 % (S3) a 60 % (S4). Pro experiment S3 byla naměřena hodnota 5,2 mg/Nm³ a pro druhý zmíněný 7,9 mg/Nm³. Emisní limitní hodnota pro koncentraci NO_x, nebyla u žádného experimentu překročena.

Nejvyšší koncentrace vyšla pro referenční stav S1 462,6 mg/Nm³ a u všech další experimentů byla koncentrace téměř o polovinu nižší, kromě experimentu S3. Při tomto experimentu se přimíchávalo 40 % recirkulovaných spalin do primární tratě a pokles koncentrace bylo o 162,2 mg/Nm³ než u referenčního stavu.

6. Závěr

V rámci práce byly provedeny experimenty, u kterých se zjišťovala závislost vlivu množství recirkulovaných spalin na produkci emisí CO, NO_x, tepelnou účinnost a tepelnou bilanci. Na základě experimentů bylo zjištěno, že recirkulace spalin do sekundární tratě má za následek maximální zvýšení koncentrace CO, které nevyhovuje specifickým emisním limitům. To je způsobeno tím, že sekundární trať přivádí směs vzduchů a spalin nad rošt, tedy do oblasti, kde dohořívá nespálený zbytek. Přivedení směsi vzduchu a spalin s nižší koncentrací O₂ do této zóny má negativní vliv na dohoření paliva a tím vzniká vyšší koncentrace CO. Nejnižší koncentrace CO byla naměřena, když se recirkulovaly spaliny pouze do primární trati (pod rošt) a nad zónu plamene byl přiváděn spalovací vzduch bez přidaných spalin. V takovém případě nespálený zbytek dohořel. Experiment s nejnižší produkcí tvorby emise CO, byl v případě, když se přimíchávalo 40 % recirkulovaných spalin do primární tratě. Pokles emise CO byl oproti referenčnímu stavu o 97 %. Při porovnání vyprodukovaných emisí NO_x a jejich specifických emisních limitů, všechny experimenty vyhověly. Nicméně byla zjištěna závislost recirkulace spalin na tvorbu NO_x. Při všech experimentech, kdy se recirkulovaly spaliny bez ohledu na místo přivodu, nastalo snížení emise NO_x oproti referenčnímu stavu bez recirkulace. Pozitivní vliv na snížení tvorby NO_x měly experimenty, kdy se přimíchávaly recirkulované spaliny do sekundární tratě a potom do obou tratí najednou. Vyprodukované emise NO_x při těchto experimentech vyšly velmi podobně. Konkrétněji, přimícháváním 20 % recirkulovaných spalin do sekundární tratě, mělo za následek nejnižší produkci NO_x ze všech experimentů. Oproti referenčnímu stavu byl zaznamenán pokles o 59 %. I přes pozitivní výsledky je nutno přihlídnout ke skutečnosti, že při tomto experimentu nebyly splněny specifické emisní limity pro CO. U experimentu, při kterém bylo přimícháváno 20 % recirkulovaných spalin do obou tratí, byl identifikován pokles emise NO_x o 54 %. Zároveň tento experiment splnil specifické emisní limity pro CO. Podle vypočtených výsledků teploty na konci ohniště t_{ok} vyplývá, že s vyšším recirkulačním součinitelem se snižuje teplota nechlazeného plamene t_{np} a tím i t_{ok} . Při experimentech byla teplota na konci ohniště t_{okm} měřena ale s opačným trendem. Opačné trendy mohou být způsobeny tepelnou akumulací vyzdívek spalovací komory a tím potřeby podstatně delšího časového období na stabilizaci tepelných toků. Vypočtená tepelná účinnost kotle η se pohybuje v úzkém rozmezí (85 - 88) % bez výrazných změn a výsledky závisí na součiniteli přebytku spalovacího vzduchu α , na teplotě spalin a tepelných ztrátách. Teplota spalin a tepelné ztráty výpočet téměř neovlivnily ale vyšší hodnota α měla za následek mírné snížení účinnosti kotle. To je patrné z experimentů, kdy se přimíchávaly 10 % a 20 % recirkulovaných spalin do obou tratí, při kterých byl součinitel přebytku vzduchu vyšší oproti ostatním experimentům.

7. Použitá literatura

- [1] *Vyhláška č. 415/2012 Sb. zákonyprolidi.* [online]. 30.11.2012 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [2] *Zákon 137/2010 Sb. biom.* [online]. 21.4.2010 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/legislativa/fyto-legislativa/1372010-sb>
- [3] Šindelářová, L. *Využití a potenciál energie z biomasy v ČR.* Praha, ČVUT, 2014.
- [5] Lackner, M., Winter, F., Agarwal, A. *Handbook of combustion Vol. 4: Solid Fuels.* Německo: WILEY-VCH, 2010. ISBN 978-3-527-32449-1.
- [6] Horák, J. Výzkumné energetické centrum. vec.vsb. [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/spalovani-tuhych-paliv.pdf>
- [7] Černý, V. *Spalovací zařízení a výměníky tepla.* Praha: ČVUT, 1986.
- [8] Jirouš, F. *Efektivní spalování paliv.* Praha: ČSZE, 2013. ISBN 978-80-260-5393-4.
- [9] Technické normy. tzb-info. [online]. 1.10.2010 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/normy/csn-iso-1928-2010-10>
- [10] Právní předpisy. tzb-info. [online]. 24.10.2012 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/zakon-c-383-2012-sb-o-podminkach-obchodovani-s-povolenkami-na-emise-sklenikovyh-plynu>
- [11] Hrdlička, J. *Problematika řízení automatických kotlů na biomasu se zaměřením na kotle malého výkonu pro domácnosti.* [online]. [cit. 24.5.2015]. Dostupné z <http://www.iczt.cz/cs/doc/sem34.pdf>
- [12] Dlouhý, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků.* Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02591-8.
- [13] Jirouš, F. *Efektivní spalování paliv.* Praha: ČSZE, 2013. ISBN978-80-260-5393-4
- [14] Koloničný, J. [online]. (7. 6. 2010). *Emise při spalování biomasy.* Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>
- [15] *Zákon č. 137/2010 Sb. o podpoře výroby elektřiny z OZE.* [online]. (21. 4. 2010). [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/legislativa/fyto-legislativa/1372010-sb>
- [16] *Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší.* [online]. (1. 9. 2012). Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/zakon-c-201-2012-sb-o-ochrane-ovzdusi>
- [17] Nitrogen dioxide. [online]. [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/airquality/nitrogenoxides/>
- [18] Ibler, Z. *Technický průvodce energetika.* Praha: BEN, 2002. ISBN 80-7300-026-1.
- [19] Ibler, Z. *Energetika v příkladech.* Praha: BEN, 2003. ISBN 80-7300-097-0.

- [20] Wiesner, F. *Stavba parních kotlů*. Praha: SNTL, 1960. ISBN 56/III-4-B3.
- [22] *Post-Combustion NOx Reduction* [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://www.pcc-sterling.com/products/thermal-oxidizers/scr-sncr/>
- [23] Horák, J., Kubesa, P. *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích* [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [24] *Metodický pokyn* [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/13/4083-metodicky_pokyn_nizkoemisni_spalovaci_zdroj.pdf
- [25] *Emise z kotelen a ochrana ovzduší* [online]. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/2309-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-iii>
- [26] *Grafická ročenka 2016* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/IV3_NOx_CZ.html
- [27] *Grafická ročenka 2015* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/VIII_EU_CZ.html
- [28] Staf, M. *Technologie ochrany ovzduší* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~stafm/Staf%20Marek%20-%20Pedagogika/Technologie%20ochrany%20ovzdu%C5%A1%C3%AD%20-%20N216006/>
- [29] *Grafická ročenka 2014* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/VIII_EU_CZ.html
- [30] BAZJUK, L. *Návrh řízení recirkulace spalin automatického 100 kW kotle na biomasu* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66170/F2-DP-2016-Bazjuk-Ludvik-Bazjuk_DP.pdf?sequence=-1

8. Seznam použitých zkratek

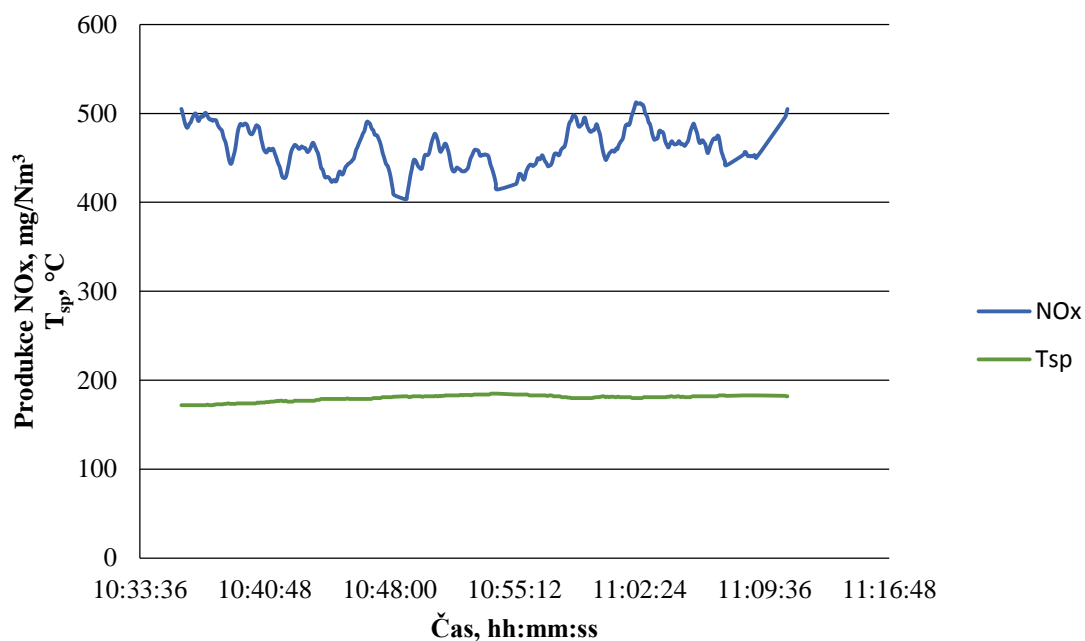
A^d – obsah popela – suchý stav, -
 A^r – obsah popela – reálný stav, -
 a_o – stupeň černosti ohniště, -
 a_{pl} – stupeň černosti plamene, -
 $a_{\dot{u}}$ – poměrný úlet popílku, -
 B_o – Boltzmannovo číslo, -
CO – oxid uhelnatý
 C^{daf} – obsah uhlíku – stav bez vody a popela, -
 C^r – obsah uhlíku – původní stav, -
 c_i – měrná tepelná kapacita tuhých zbytků, kJ/kgK
 C_i – podíl hořlaviny v tuhých zbytcích, -
 c_1 – rychlost proudění vzduchu do primární tratě, m/s
 c_2 – rychlost proudění vzduchu do sekundární tratě, m/s
 d_{pk} – střední efektivní průměr části popílku, μm
 f_{CO} – přepočtový faktor pro CO
 f_{NO_x} – přepočtový faktor NO_x
 G_S – Hmotnost spalin v poměrném úletu, kg/kg
 h – hořlavina, -
 H^{daf} – obsah vodíku – stav bez vody a popela, -
 H^r – obsah vodíku – původní stav, -
 I_{Smin}^t – entalpie stechiometrických spalin $\alpha=1$, kJ/kg
 $I_S^{t,\alpha}$ – entalpie spalin o teplotě t a přebytku vzduchu α , kJ/kg
 $I_S^{t_{vz},\alpha_k}$ – entalpie spalin při teplotě vzduchu v kotelně, kJ/kg
 $I_S^{t_{k,\alpha_k}}$ – entalpie spalin za kotlem, kJ/kg
 I_{Vmin}^t – entalpie minimálního množství vzduchu při teplotě t , kJ/kg
 i_{pv}^t – fyzické teplo paliva, kJ/kg
 $i_{CO_2}^t$ – měrná entalpie CO₂ složky spalin při teplotě t , kJ/kg
 $i_{SO_2}^t$ – měrná entalpie SO₂ při teplotě t , kJ/kg
 $i_{N_2}^t$ – měrná entalpie N₂ při teplotě t , kJ/kg
 i_{Ar}^t – měrná entalpie Ar při teplotě t , kJ/kg
 $i_{H_2O}^t$ – měrná entalpie H₂O při teplotě t , kJ/kg
 i_{pop}^t – měrná entalpie popílku při teplotě t , kJ/kg
 k – součinitel prostupu tepla. W/m²K
 k_p – součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi, -
 k_s – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny, -
 M – je součinitel respektující výškovou polohu hořáků, -
MEH – mezní emisní hodnota, mg/Nm³
 MW_{NO_x} – molární hmotnost NO_x, kg/mol
 MW_{CO} – molární hmotnost CO, kg/mol
mgCO – emise CO, mg/Nm³
 m_{pv} – množství paliva, g
 \dot{m}_{pv} – průtok paliva, kg/h
 \dot{m}_{pv1} – množství paliva pro experiment S1, kg/h
 \dot{m}_{pv2} – množství paliva pro experiment S2 až S8, kg/h

NO_X – oxidy dusíku
 N^{daf} – obsah dusíku – stav bez vody a popela, -
 N^r – obsah dusíku – původní stav, -
 O^{daf} – obsah kyslíku – stav bez vody a popela, -
 O^r – obsah kyslíku – původní stav, -
 O_{CO_2} – objem složky CO_2 ve spalínách, Nm^3/Nm^3
 O_{SO_2} – objem složky SO_2 ve spalínách, Nm^3/Nm^3
 O_{N_2} – objem složky N_2 ve spalínách, Nm^3/Nm^3
 O_{Ar} – objem složky Ar ve spalínách, Nm^3/Nm^3
 O_{SV} – celkový objem spalin vlhkých, Nm^3/Nm^3
 O_{VV} – celkový objem vzduchu vlhkého, Nm^3/Nm^3
 $O_{\text{S}\bar{\text{c}}\text{S}}$ – střední tepelná jímavost spalin, $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
 $O_{\text{O}_2\text{min}}$ – Minimální objem kyslíku, Nm^3/Nm^3
 O_{SSmin} – Minimální objem suchých spalin, Nm^3/Nm^3
 O_{SVmin} – Minimální objem vlhkých spalin, Nm^3/Nm^3
 O_{VSmin} – Minimální objem suchého vzduchu, Nm^3/Nm^3
 O_{VVmin} – objem vzduchu vlhkého Nm^3/Nm^3
 $O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}}$ – Minimální množství vodní páry ve spalínách, Nm^3/Nm^3
 $O_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{V}}$ – Objem vodní páry, Nm^3/Nm^3
 p – tlak, Mpa
 p_{N} – tlak za normálních podmínek, $p_{\text{N}} = 101325 \text{ Pa}$
 p_{S} – Parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách, MPa
 Q_{u} – Teplo uvolněné v ohništi, kJ/kg , kW
 Q_{V} – teplo přivedené ve vzduchu, kJ/kg
 Q_{cz} – teplo přivedené cizím zdrojem, kJ/kg
 Q_{ci} – výhřevnost uhlíku, kJ/kg
 $Q_{i\text{red}}$ – redukováná výhřevnost, kJ/kg
 Q_{pr} – teplo přivedené parou, kJ/kg
 Q_{o} – tepelný výkon zachycený ohništěm, kW
 Q_{i}^r – výhřevnost původního stavu, kJ/kg
 Q_{S}^{r3} – teplo přivedené v recirkulovaných spalínách, kJ/kg
 R_{I} – plocha hořící vrstvy na roštu, m^2
 R – univerzální plynová konstanta, kg/mol
 r – recirkulační součinitel, -
 r_{CO_2} – Objemový podíl tříatomového plynu, -
 $r_{\text{H}_2\text{O}}$ – Objemový podíl tříatomového plynu, -
 r_{S} – Součet objemové koncentrace tříatomových plynů ve spalínách, -
 s – účinná tloušťka sálavé plochy ohniště, m
 SO_2 – oxid siřičitý
 S^{daf} – obsah síry – stav bez vody a popela, -
 S^r – obsah síry – původní stav, -
 S_{st} – povrch stěn ohniště, m^2
 S_{spal}^r – obsah síry – spalitelné, -
 t – teplota, $^\circ\text{C}$
 T_{N} – teplota z normálních podmínek, $T_{\text{N}} = 273,15 \text{ K}$
 t_{i} – teplota tuhých zbytků, $^\circ\text{C}$
 t_{ch} – čas, kdy je šnek v chodu, s
 t_{k} – čas, kdy je šnek v klidu, s

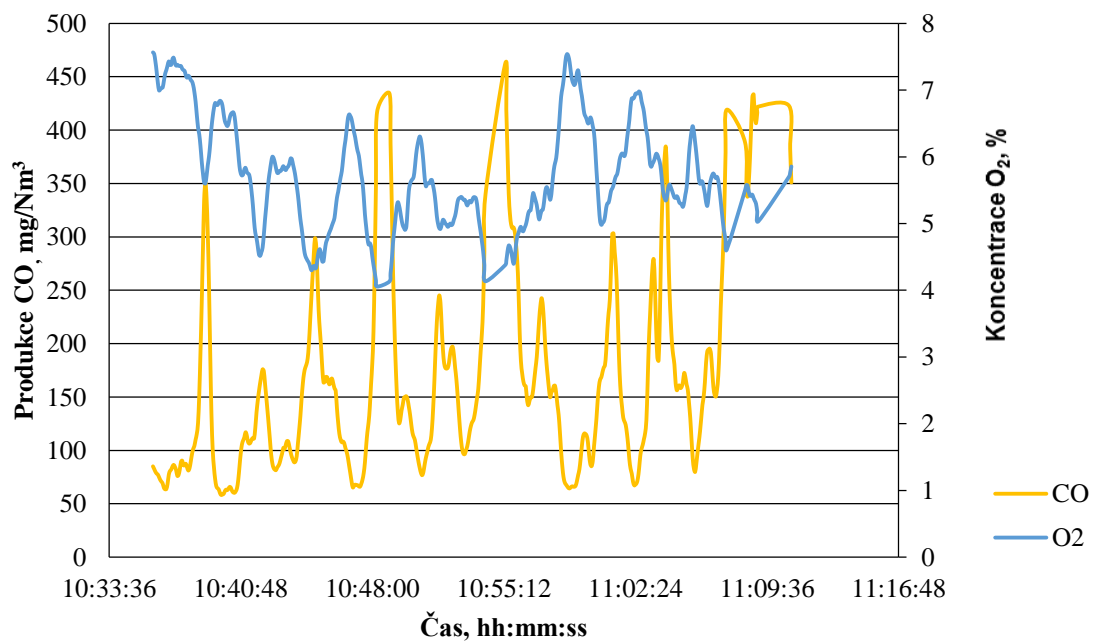
t_{np} – teplota nechlazeného plamene, °C
 t_{ok} – teplota na konci ohniště – vypočítaná, °C
 t_{okm} – teplota ve spalovací komoře – teplota naměřená, °C
 TOC – celkový organický uhlík
 TZL – tuhé znečišťující látky
 V_o – aktivní objem ohniště, m³
 \dot{V}_{NO_x} – průtok emise NO_x, g/h
 \dot{V}_{CO} – průtok emise CO, g/h
 \dot{V}_p – průtok vzduchu do primární tratě, Nm³/h
 \dot{V}_{sek} – průtok vzduchu do sekundární tratě, Nm³/h
 \dot{V}_s – celkový průtok spalin, Nm³/h
 \dot{V}_{sr} – průtok recirkulovaných spalin, Nm³/h
 \dot{V}_{sr1} - průtok recirkulovaných spalin do primární tratě, Nm³/h
 \dot{V}_{sr2} - průtok recirkulovaných spalin do sekundární tratě, Nm³/h
 \dot{V}_{vz} – celkový průtok spalovacího vzduchu, Nm³/h
 \dot{V}_1 – celkový průtok primární tratí, Nm³/h
 \dot{V}_2 – celkový průtok sekundární tratí, Nm³/h
 W^r – obsah vody, %
 $w_{CO,N}$ – hmotnostní koncentrace CO přepočtená na normální podmínky, mg/Nm³
 $w_{NO_x,N}$ – hmotnostní koncentrace NO_x přepočtená na normální podmínky, mg/Nm³
 $w_{CO,N}^R$ – hmotnostní koncentrace CO přepočtená na normální podmínky a referenční obsah kyslíku, mg/Nm³
 $w_{NO_x,N}^R$ – hmotnostní koncentrace NO_x přepočtená na normální podmínky a referenční obsah kyslíku, mg/Nm³
 X_i – podíl popela, -
 $X_{ú}$ – poměrný úlet popílku, -
 x_v – koncentrace kyslíku ve vzduchu, %
 x_{sp} – koncentrace kyslíku ve spalinách, %
 x_{s1} – koncentrace kyslíku v primární trati (po smíšení), %
 x_{s2} – koncentrace kyslíku v sekundární trati (po smíšení), %
 Z_c – ztráta mechanickým nedopalem, -
 Z_{CO} – ztráta chemickým nedopalem
 Z_f – ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků, -
 Z_k – ztráta komínová, -
 Z_{sv} – ztráta sáláním tepla do okolí, -
 Z_{sv}^o – poměrná ztráta sáláním a vedením tepla do okolí, -

 α – součinitel přebytku vzduchu, -
 λ – označení pro lambda sondu
 μ_{pk} – koncentrace popílku ve spalinách, kg/kg
 ψ – součinitel tepelné efektivity, -
 η – účinnost kotle, %
 χ_v – Součinitel respektující podíl vodní páry připadající na 1 Nm³ suchého vzduchu, -
 $\omega_{O_2}^R$ – referenční obsah O₂ v plynu, pro biomasu 11 %
 ω_{O_2} – ω_{O_2} skutečný obsah O₂ v plynu, %

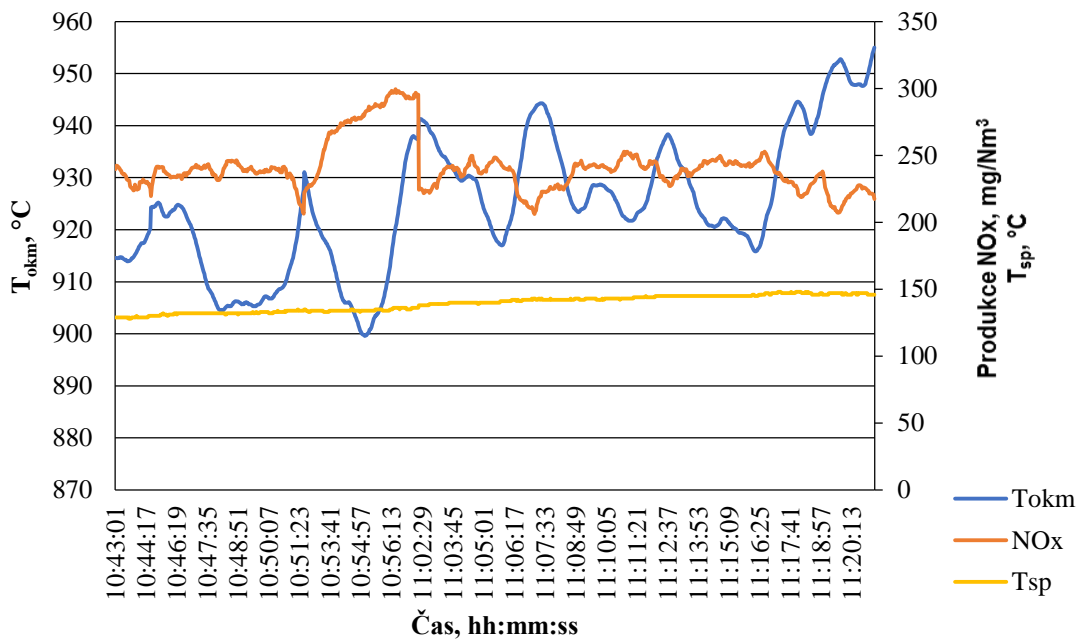
9. Přílohy



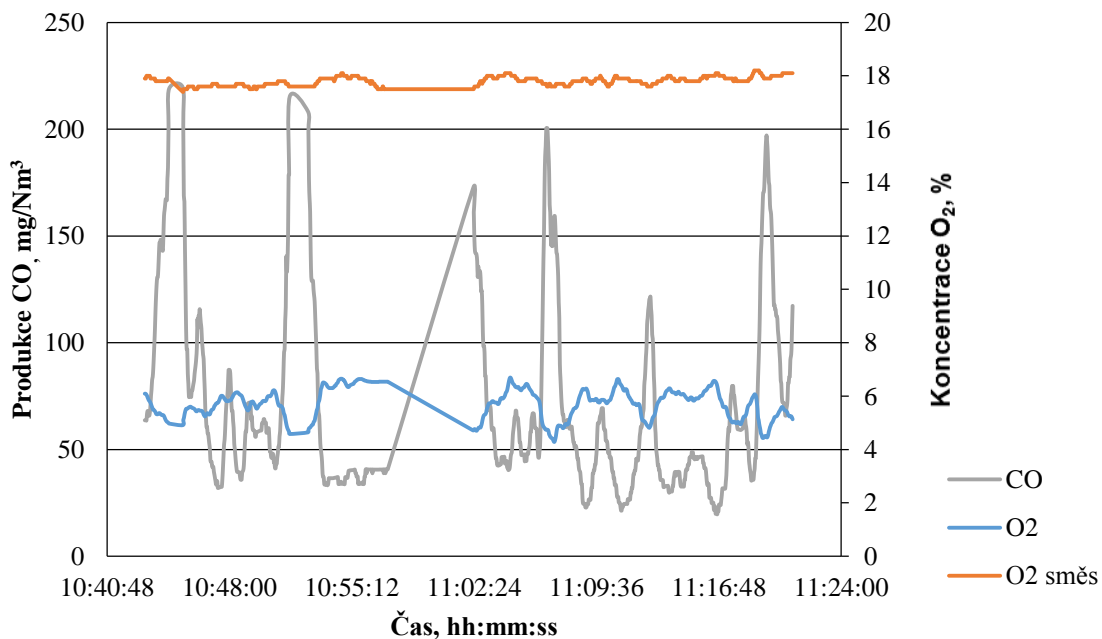
Obr. 27 - Experiment S1 – referenční stav – bez recirkulace



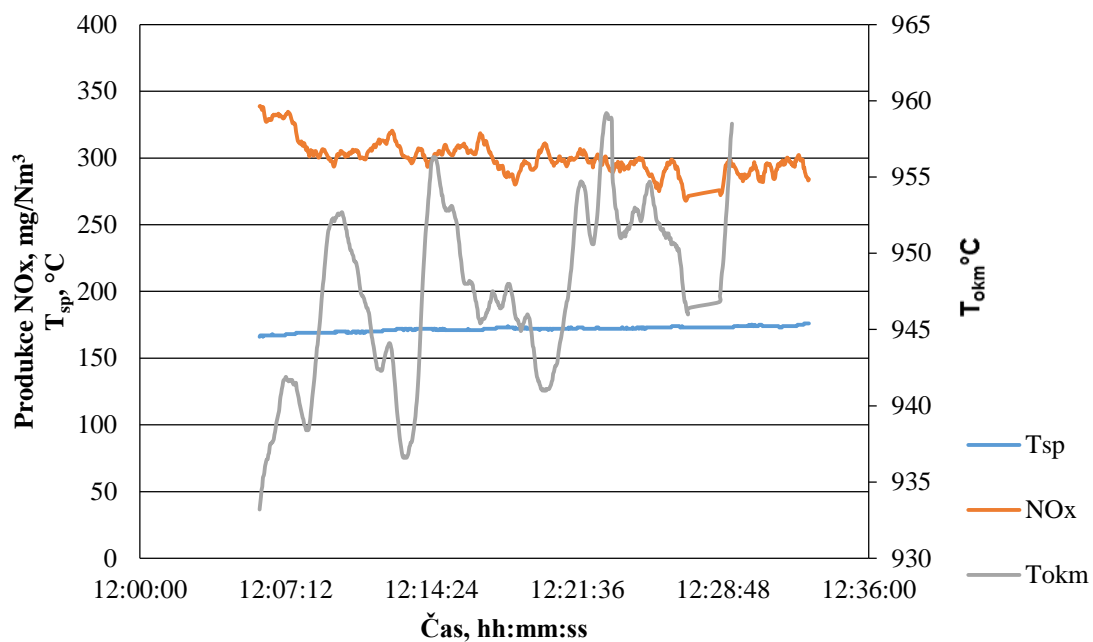
Obr. 28 - Experiment S1 – referenční stav – bez recirkulace



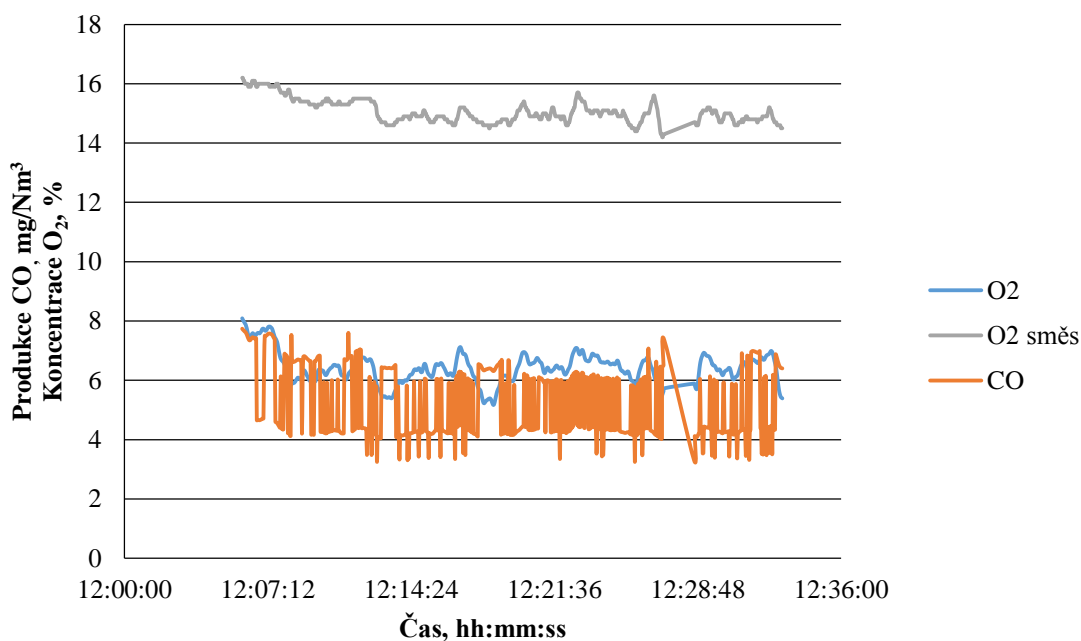
Obr. 29 - Experiment S2 – 20 % recirkulovaných spalin do primární trati



Obr. 30 – Experiment S2 - 20 % recirkulovaných spalin do primární trati



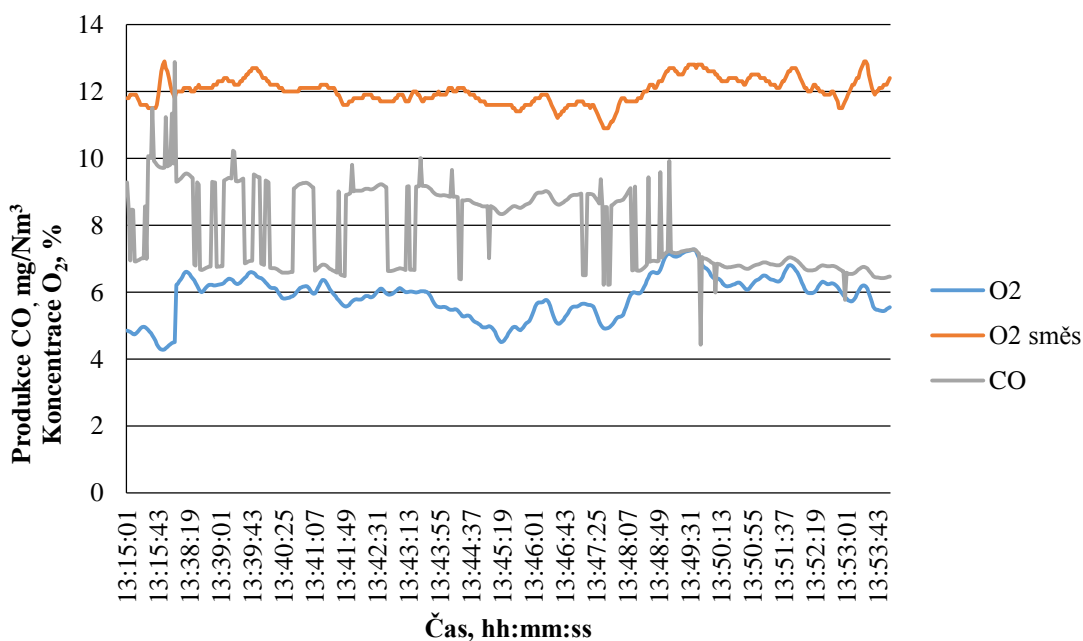
Obr. 31 – Experiment S3 - 40 % recirkulovaných spalin do primární trati



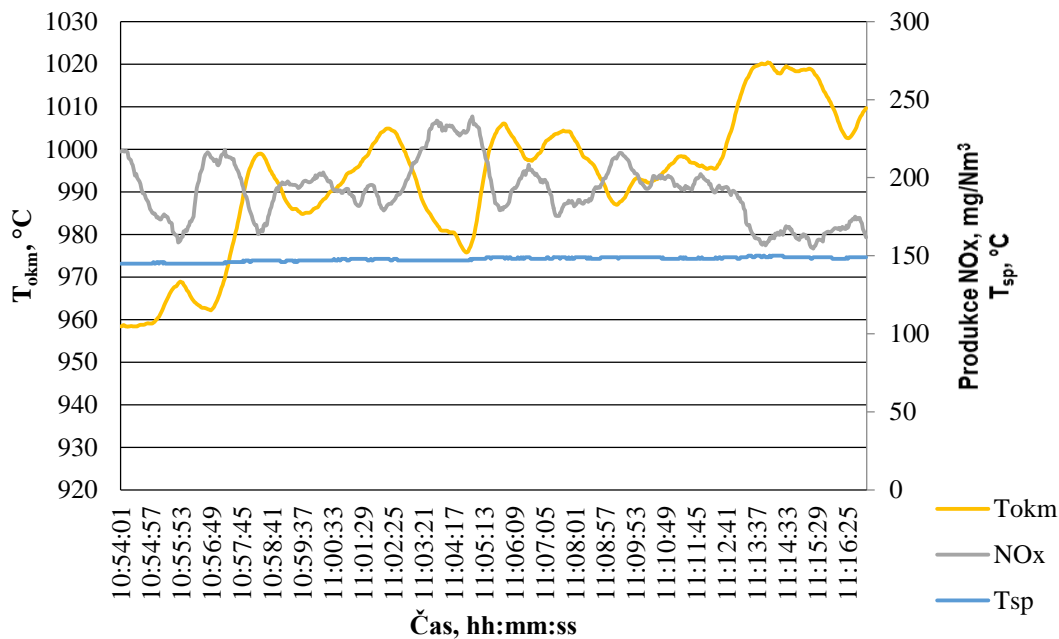
Obr. 32 - Experiment S3 - 40 % recirkulovaných spalin do primární trati



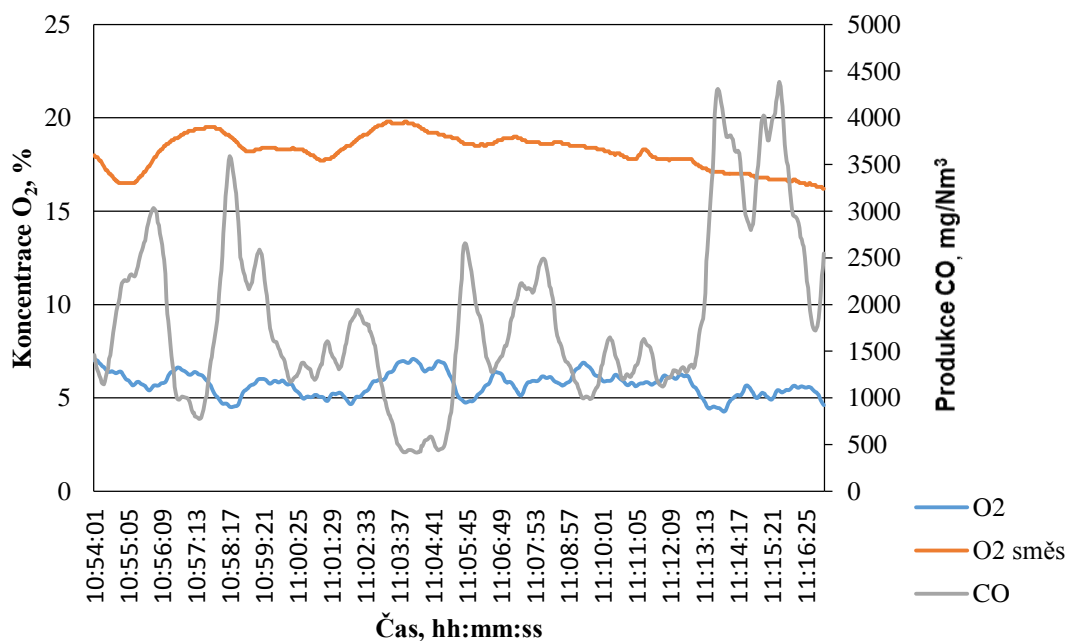
Obr. 33 – Experiment S4 - 60 % recirkulovaných spalin do primární trati



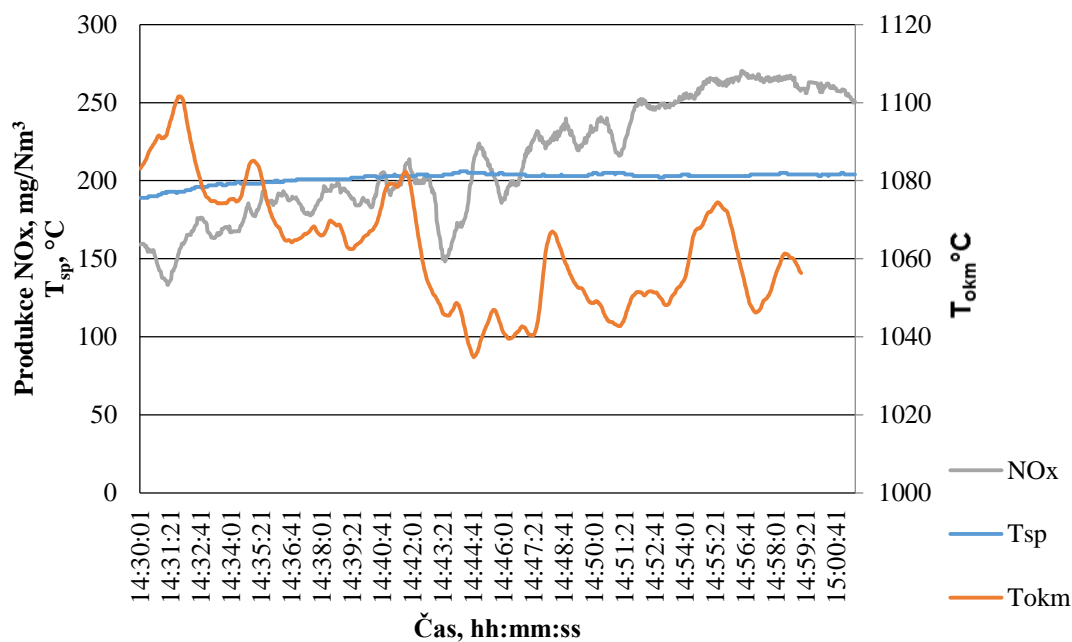
Obr. 34 - Experiment S4 - 60 % recirkulovaných spalin do primární trati



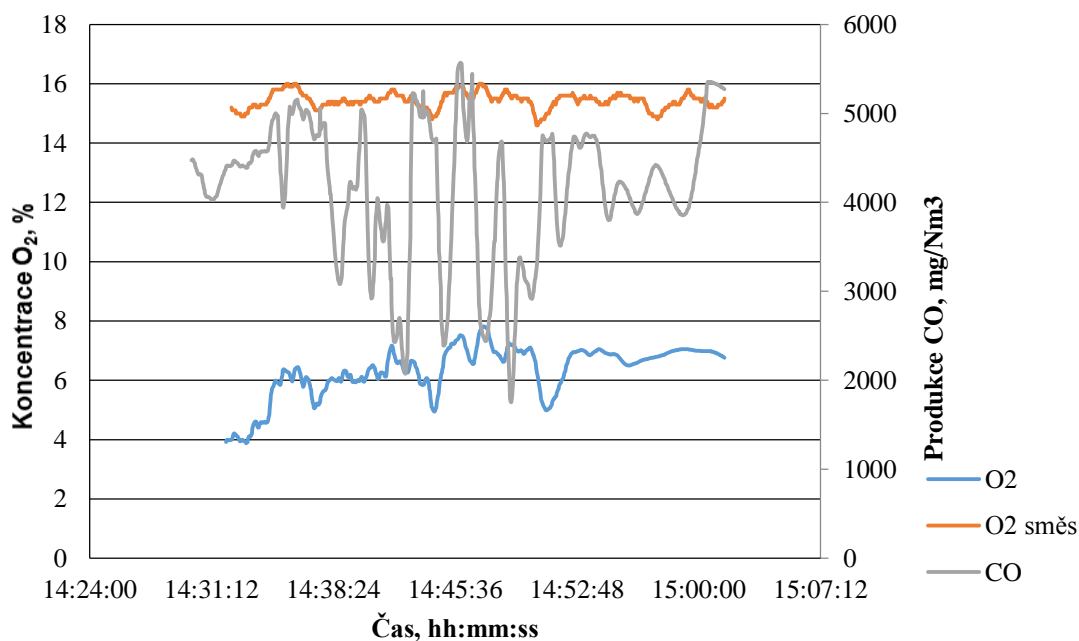
Obr. 35 - Experiment S5 - 20 % recirkulovaných spalin do sekundární trati



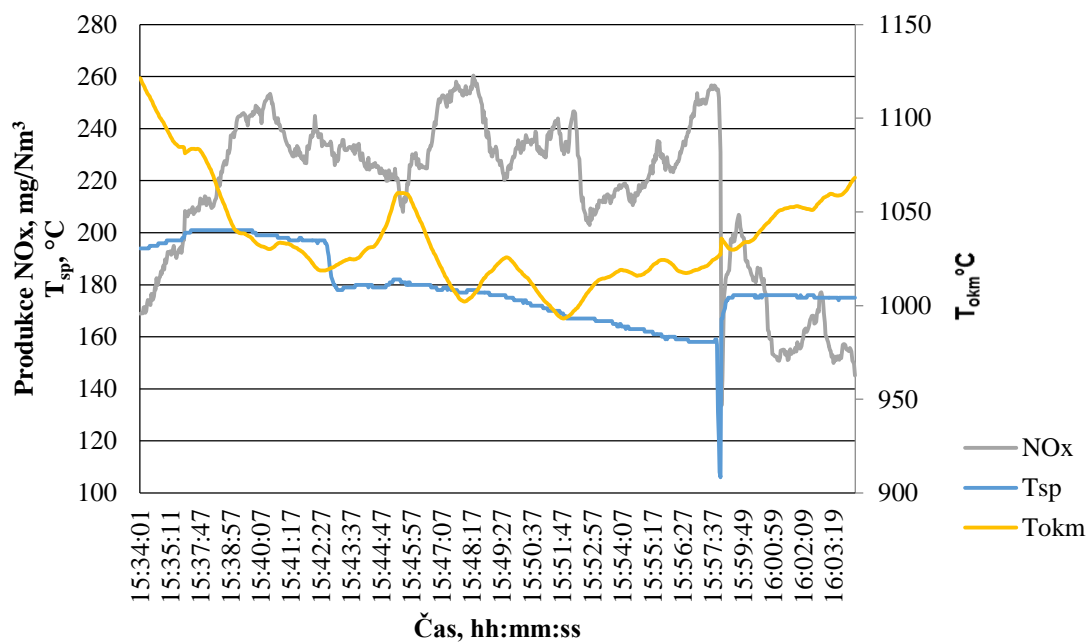
Obr. 36 - Experiment S5 - 20 % recirkulovaných spalin do sekundární trati



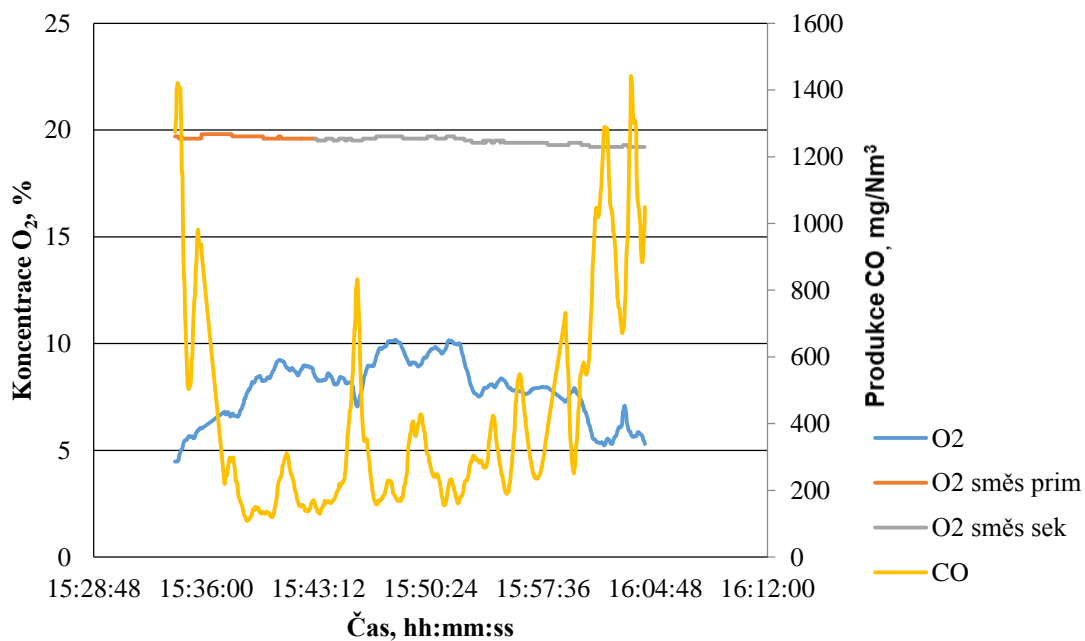
Obr. 37 - Experiment S6 - 40 % recirkulovaných spalin do sekundární trati



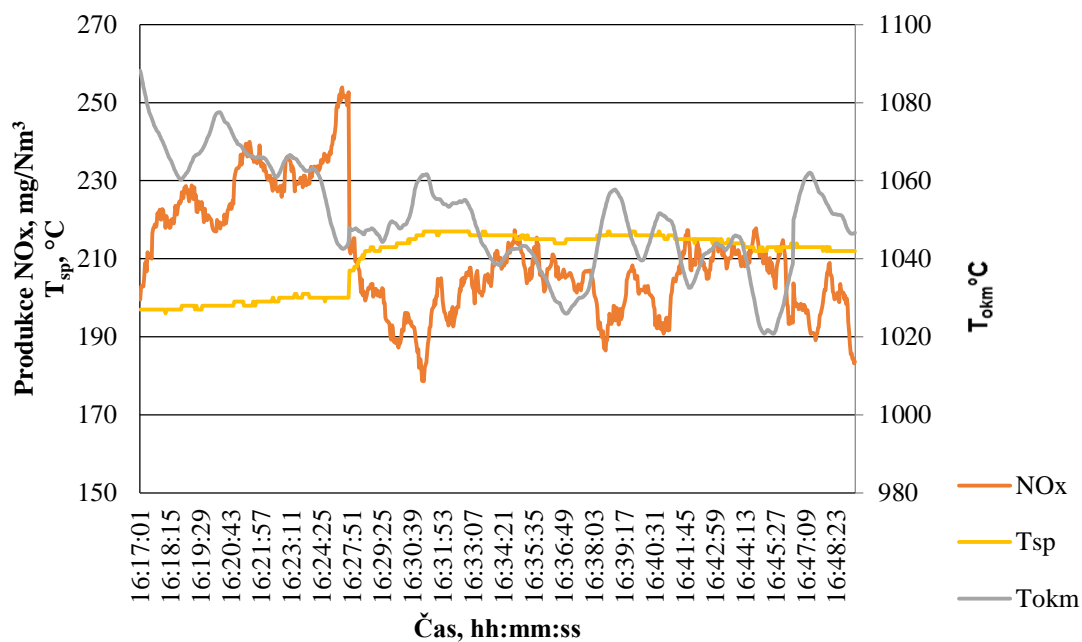
Obr. 38 - Experiment S6 - 40 % recirkulovaných spalin do sekundární trati



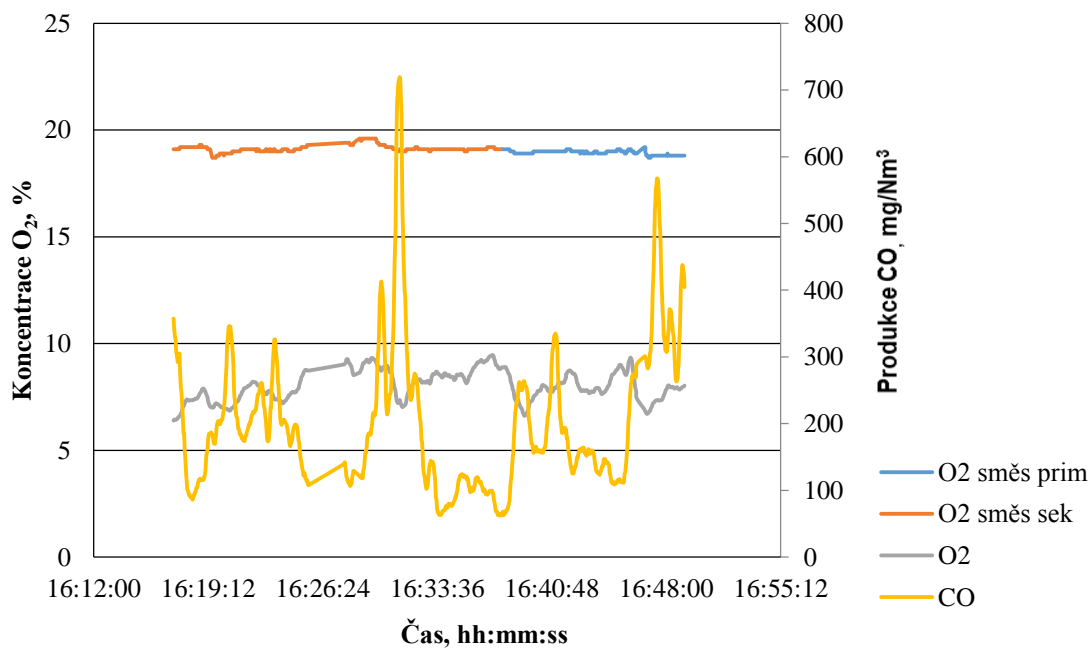
Obr. 39 - Experiment S7 – 10 % recirkulovaných spalin do primární a sekundární trati



Obr. 40 - Experiment S7 – 10 % recirkulovaných spalin do primární a sekundární trati



Obr. 41 - Experiment S8 – 20 % recirkulovaných spalin do primární a sekundární trati



Obr. 42 - Experiment S8 – 20 % recirkulovaných spalin do primární a sekundární trati

Teplota <i>t</i> , °C	Měrné entalpie jednotlivých složek spalin i_i^t [kJ/Nm ³] při teplotě <i>t</i>								Popílek, kJ/kg
	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	Vzduch suchý	CO	O ₂	
100	170	191	130	93	151	132	132	132	80
200	358	394	260	186	305	266	261	267	170
300	559	610	392	279	463	403	395	407	265
400	772	837	527	372	626	542	532	551	362
500	994	1070	664	465	795	684	672	699	460
600	1225	1310	804	557	969	830	814	850	558
700	1462	1554	947	650	1149	978	960	1003	658
800	1705	1801	1093	743	1335	1129	1109	1159	761
900	1952	2052	1241	836	1526	1283	1260	1318	868
1000	2203	2304	1392	928	1723	1439	1413	1477	983
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061
1800	4305	4363	2643	1742	3458	2732	2682	2804	2381

Tab. 24 - Měrné entalpie jednotlivých složek spalin a popílku