



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NÁVRH ÚPRAV BIOMASOVÉHO KOTLE PRO VELMI VLHKÁ PALIVA

RE-DESIGN OF BIOMASS BOILER FOR VERY WET FUEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN ZBOŘIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN LISÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Zbořil

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh úprav biomasového kotle pro velmi vlhká paliva

v anglickém jazyce:

Re-design of biomass boiler for very wet fuel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavní náplní práce bude analýza současného stavu kotle ZKG společnosti GEMOS jeho přepočet pro využívání velmi vlhkých paliv s obsahem vody do 60%, včetně návrhu úprav kotle. V rámci práce budou provedeny experimenty pro získání potřebných údajů a ověření některých parametrů.

Cíle diplomové práce:

Stechiometrický výpočet a bilance ohniště kotle ve stávajícím stavu pro běžné palivo

Analýza vlivu vlhkosti na podmínky ve spalovací komoře a průběh hoření paliva

Návrh úprav kotle pro spalování velmi vlhkého paliva

Seznam odborné literatury:

Černý, Janeba, Teyssler: Parní kotle, Technický průvodce č. 32, SNTL, 1983, 04-224-83

Dlouhý: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

Jícha: Přenos tepla a látky, CERM, 2001, ISBN 80-214-2029-4

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 11.11.2013

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je provést stechiometrický výpočet kotle a bilanci kotle pro běžné palivo s vlhkostí do 60%. Stanovit závislosti vlhkosti paliva na podmínky ve spalovací komoře a podmínky pro hoření. Experimentální analýzu současného stavu kotle ZKG pomocí měření na tomto zařízení a návrh úprav a řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Biomasa, kotel, zplyňovací komora, prvkový rozbor paliva, stechiometrie, vlhkost, spalování, spaliny, recirkulace, diagram spalin, emise.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to calculate the stoichiometric balance of boilers and boiler fuel for normal moisture to 60%. Determine the moisture, content depending on the conditions of the fuel in the combustion chamber and conditions of combustion. Experimental analysis of the current state of the boiler ZKG measurements using this device and propose modifications and solutions.

KEYWORDS

Biomass, boiler, gasification chamber, elemental analysis of the fuel, stoichiometry, moisture, combustion, exhaust gases, recirculation, diagram flue gas, emissions.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZBOŘIL, M. Návrh úprav biomasového kotle pro velmi vlhká paliva. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 94s . Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma: Návrh úprav biomasového kotle pro velmi vlhká paliva, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	- 3 -
2	Biomasa	- 5 -
2.1	Charakteristika	- 5 -
2.2	Základ biomasy	- 5 -
2.3	Zdroje biomasy	- 5 -
2.4	Vlastnosti biomasy	- 6 -
2.4.1	Vlhkost a výhřevnost biomasy	- 6 -
2.4.2	Složení biomasy	- 8 -
2.4.3	Alkalické kovy	- 9 -
2.4.4	PCDD/ PCDF	- 10 -
2.4.5	Charakteristické teploty popelovin	- 11 -
2.5	Problematika spalování biomasy	- 13 -
2.6	Expediční formy biomasy	- 13 -
2.6.1	Dřevní štěrka	- 13 -
2.6.2	Brikety	- 14 -
2.6.3	Pelety	- 14 -
3	Technické údaje zařízení GEMOS KWH a ZKG	- 15 -
4	Stechiometrický výpočet	- 18 -
4.1	Vstupní parametry paliva	- 18 -
4.2	Stanovení objemu vzduchu při spalování	- 19 -
4.3	Stanovení objemu spalín při spalování	- 21 -
4.3.1	Hustota spalín	- 22 -
4.4	Hmotové množství vzduchu a spalín	- 23 -
4.5	Tepelná bilance ohniště	- 24 -
4.6	Teplota nechlazeného plamene	- 25 -
4.6.1	I-t diagram spalín bez recirkulace	- 27 -
4.6.2	Měrná tepelná kapacita spalín	- 30 -
4.7	Závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti	- 31 -
4.8	Regulace teploty vzduchu	- 32 -
4.9	Recirkulace spalín	- 33 -

EÚ FSI VUT v Brně

4.9.1	Entalpie vzduchu a spalin s recirkulací	- 34 -
4.9.2	i-T diagram spalin s recirkulací.....	- 36 -
5	Ověření teplot v ohništi	- 38 -
5.1	Měřicí zařízení a analýza spalin	- 38 -
5.1.1	Mezní hodnoty emisí dle normy ČSN EN 303-5	- 39 -
5.2	Podmínky měření.....	- 40 -
5.2.1	Použité palivo	- 40 -
5.2.2	Podávací zkouška paliva	- 41 -
5.3	Měření teplot pro biomasu o $W^r=35\%$	- 42 -
5.4	Měření spalin pro biomasu o $W^r= 35\%$	- 43 -
5.5	Měření teplot pro biomasu o $W^r=55,8\%$	- 46 -
5.6	Měření spalin pro biomasu o $W^r= 55,8\%$	- 47 -
6	Vyhodnocení	- 50 -
6.1	Modelování komory ZKG	- 51 -
6.2	Geometrické parametry komory ZKG.....	- 51 -
6.3	Výsledek modelování	- 54 -
7	Návrh opatření	- 55 -
8	Ověření a vyhodnocení opatření	- 57 -
8.1	Měření teplot pro biomasu o $W^r=35\%$ s úpravou komory	- 57 -
8.2	Měření spalin pro biomasu o $W^r=35\%$ s úpravou komory	- 58 -
8.3	Měření teplot pro biomasu o $W^r=55,8\%$ s úpravou komory	- 61 -
8.4	Spaliny pro biomasu o $W^r=55,8\%$ s úpravou komory	- 62 -
8.5	Vyhodnocení.....	- 65 -
9	Závěr	- 68 -
10	Použitá literatura	- 69 -
11	Seznam Obrázků	- 71 -
12	Seznam Tabulek	- 73 -
13	Seznam zkratk a symbolů	- 74 -
14	Přílohy	- 76 -

1 ÚVOD

Problematika spalování velmi vlhkého paliva je tématem mé diplomové práce. Jedná se o rešeršní výpočtový a návrhový stav provozovaného spalovacího zařízení Gemos ZKG umístěného v laboratořích NETME Centre, Technická 2, Brno. Zde je spalovací komora umístěna jako experimentální a výzkumný segment součásti celého spalovacího zařízení Gemos CZ s podřízenými periferiemi. Stávající spalovací komora je navržena pro spalování biomasy o vlhkosti 20-40%. V diplomové práci bude ověřen výpočtový stav spalovací komory ZKG pro velmi vlhké palivo s relativní vlhkostí 55,8%. Na základě tohoto výpočtového stavu bude možné sestavit křivku závislosti vlhkosti biomasy na teplotách nechlazeného plamene pro rozdílné vlhkosti dřevní biomasy. Dalším krokem je možnost vysoušet palivo přehřevem spalovacího vzduchu, který by napomohl spalování vlhké biomasy.

Ověření výpočtového stavu bude provedeno za pomoci měřících zařízení umístěných v hlavních trasách a bodech spalovací komory, aby bylo možné detailní porovnání hodnot mezi sebou a tak zjištění případných problémů při nastavení podmínek spalování. Toto porovnání bude provedeno pro více režimů spalování různých vlhkostí biomasy. Výsledky bude možno porovnávat mezi sebou a stanovit tak vhodnost podmínek a použití spalovací komory pro jednotlivé palivo. V případě nevhodnosti použití spalovací komory pro zkušební palivo bude provedeno návrhové opatření, které by mělo vést ke zlepšení podmínek vedoucích ke konečnému spalování se zpětnou vazbou na výsledky emisních limitů. Zpětnou vazbu na emisní limity budou podávat spalínové analyzátory, které na základě množství kyslíku vyhodnotí koncentraci složek spalín.

K porovnání koncentrace složek spalín budou nápomocny tyto předpisy:

- Norma ČSN EN 303-5 : Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva s ruční a samočinnou dodávkou o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW.
- Vyhláška 415/2012 Sb.: O přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.

2 BIOMASA

2.1 Charakteristika

Biomasaou rozumíme biologicky rozložitelnou část výrobků, zbytků a odpadů ze zemědělství. Týká se to jak rostlinných tak živočišných látek. Biomasu můžeme hledat také v lesnictví a zároveň je to biologicky rozložitelná část komunálního a průmyslového odpadu.

Biomasa je v našich podmínkách velmi perspektivním a hlavně obnovitelným zdrojem energie. Tuto formu energie nemůžeme srovnávat s kapacitou vodních toků nebo větrnou energií, protože na tu nemáme tolik vhodných podmínek. Cílenou výrobou z biomasy tak vzniká biopalivo. K výrobě biomasy se dnes používá cílená výroba pěstovaných rostlin nebo odpadů ze zemědělství, lesnictví anebo potravinářství.[1]

2.2 Základ biomasy

Podle původu se biomasa rozděluje na 4 základní skupiny:

1. Dřevní biomasa – základem je biomasa ze stromů, keřů a všech křovin.
2. Bylinná biomasa – základem jsou rostliny, které nemají dřevnatý stonek a které odumírají na konci svého vegetačního období např.: obilniny, luskoviny, květiny.
3. Ovocná biomasa – základem jsou rostliny, které jsou semenné např.: bobule, dužnina, semena atp.
4. Směsná biomasa - základem jsou kombinace předešlých napsaných skupin [2]

2.3 Zdroje biomasy

Zdroje biomasy lze také rozdělit do několika skupin, které popisují z jiného úhlu pohled na využití respektive výhřevnost či vlhkost biomasy. O samotné vlhkosti se ještě zmíním v dalším článku.

1. Lesní, plantážové a jiné přírodní dřevo

Do této skupiny patří dřevo z parků, lesů zahrad, plantáží a rychle rostoucí dřeviny, které mohou být upraveny pouze redukcí velikosti částic, odkorněním, vysušením nebo zvlhčením.

2. Vedlejší zbytky a produkty dřevozpracujícího průmyslu

V této skupině se nachází chemicky upravené a neupravené dřevní zbytky ze zpracování dřeva a výroby nábytku z desek, která mohou být barvena, lakování atp.

3. Použité dřevo

Do použitého dřeva spadá dřevní odpad od zákazníků a společností. Je to přírodní

EÚ FSI VUT v Brně

nebo pouze mechanicky zpracované dřevo se zanedbatelným znečištěním na své ploše během svého používání. Do této kategorie patří např.: palety, krabice, transportní bedny, stavební dřevo aj.

4. Směsi a příměsi

Za směsi a příměsi považujeme kombinaci předešlých typů a to jak chemicky upravené tak neupravené.[2]

2.4 Vlastnosti biomasy

2.4.1 Vlhkost a výhřevnost biomasy

Velmi výraznou roli v oblasti výhřevnosti zaujímá samotná vlhkost biomasy, protože ta stojí za celkovou výhřevností této dřevní hmoty. Je nutné podotknout, že vlhkost je možné brát dvěma způsoby. V dřevařském průmyslu můžeme hovořit o vlhkosti, která může dosahovat až 100%, protože tato vlhkost pochází z čerstvě vytěženého surového dřeva a je vztažena k hmotnosti vody v palivu. Z energetického hlediska ale můžeme o této vlhkosti mluvit jako o 60% relativní vlhkosti, která je vztažena na hmotnost dřeva. Je to vlastně podíl hmotnosti vody k hmotnosti celkového vzorku.

$$\text{Vztah pro výpočet vlhkosti paliva: } w_d = \frac{m_p - m_o}{m_p} \cdot 100\%$$

m_p = počáteční hmotnost vzorku

m_o = hmotnost vysušeného vzorku

Z hlediska typu vlhkosti v biomase ji můžeme charakterizovat na 3 typy:

1. **Vodu chemicky vázanou** – je součástí chemických sloučenin. Nelze ji z biomasy odstranit sušením, ale pouze spálením, proto je v biomase zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti. Zjišťuje se při chemických analýzách paliva a její celkové množství představuje 1–2 % sušiny. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam.
2. **Vodu vázanou - hygroskopickou** – nachází se v buněčných stěnách biomasy a je vázána vodíkovými můstky na hydroxilové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulóz. Voda vázaná se v palivu vyskytuje při vlhkostech 0–30 %. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam.
3. **Vodu volnou (kapilární)** – vyplňuje v palivu lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Má podstatně menší význam než voda vázaná. [3]

Při oxidačních procesech se uvolňuje teplo, které se u tuhého paliva vztahuje k jeho hmotnosti a vyjadřuje se v jednotkách kJ/kg za normálních podmínek. Výhřevnost je definována jako množství tepla uvolněného při dokonalém spálení 1 kg paliva, přičemž všechna voda obsažená v palivu nekondenzuje a odchází pryč např. komínem. V praxi je také možno používat další termín a to: spalné teplo. Definice je velmi podobná, ale počítá

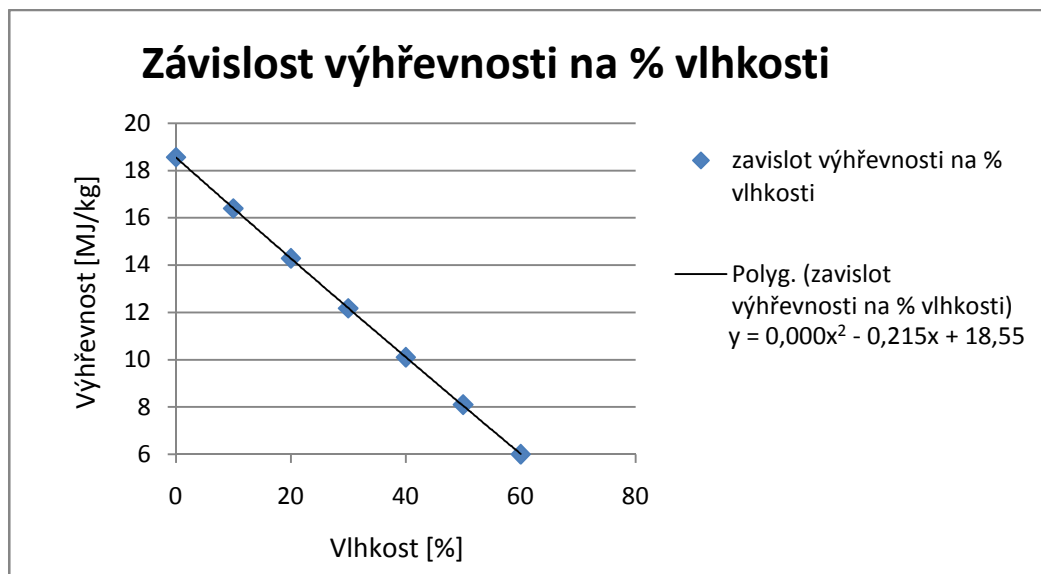
EÚ FSI VUT v Brně

s kondenzací vody ve spalínách, a to až na původní teplotu 0°C. Hodnota výhřevnosti je nižší než spalné teplo a to právě o teplotu potřebnou k ohřátí vody.

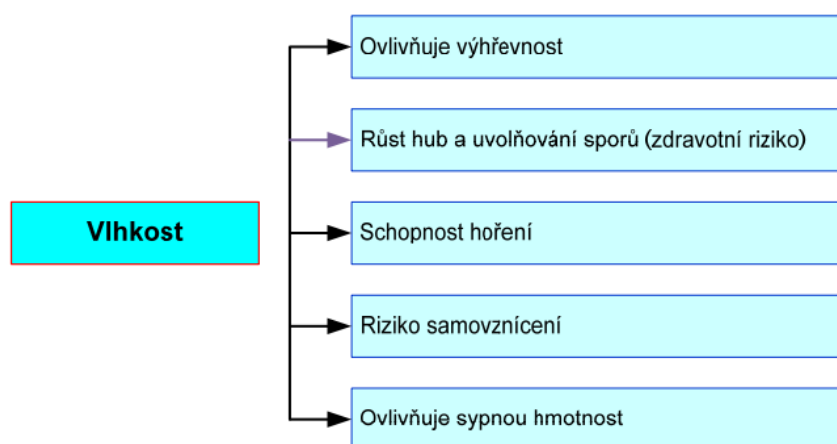
V následující tabulce můžeme vidět, jak různé druhy dřevin a různé zpracované typy mají svoji vlhkost a výhřevnost. Výhřevnost je téměř srovnatelná s hnědým uhlím. Na druhou stranu je samotná hmotnost biomasy téměř 3 až 10 krát větší než je tomu u fosilních pevných paliv.

Druh biomasy	Obsah vody	Výhřevnost	Objemová měrná hmotnost
	[%]	[MJ/kg]	[kg/m ³]
Polena (měkké dřevo)			(volně ložená)
	0	18,56	355
	10	16,4	375
	20	14,28	400
	30	12,18	425
	40	10,1	450
	50	8,1	530
	60	6	600
Dřevní štěpka	10	16,4	170
	20	14,28	190
	30	12,18	210
	40	10,1	225
Sláma (obiloviny)	10	15,5	120 (balíky)
Sláma (řepka)	10	16	100 (balíky)
Tříděný komunální odpad	20 - 38	9.14	
Bioplyn		cca 25 MJ/m ³	

Tab. 1 Přehled vlhkosti biomasy [4]



Obr. 1 Závislost výhřevnosti na vlhkosti[5]



Obr. 2 Charakteristika ovlivněná vlhkostí biomasy[5]

Paradoxně ani spalování absolutně suché biomasy není z hlediska průběhu hoření optimální. Příliš suchá biomasa hoří explozivně a velká část uniká v kouřových plynech. Za ideálních podmínek sušení na osluněných místech klesá relativní vlhkost na hodnotu 20% vlhkosti. Pro optimální spalovací proces se uvažuje vlhkost okolo 30%[5]

2.4.2 Složení biomasy

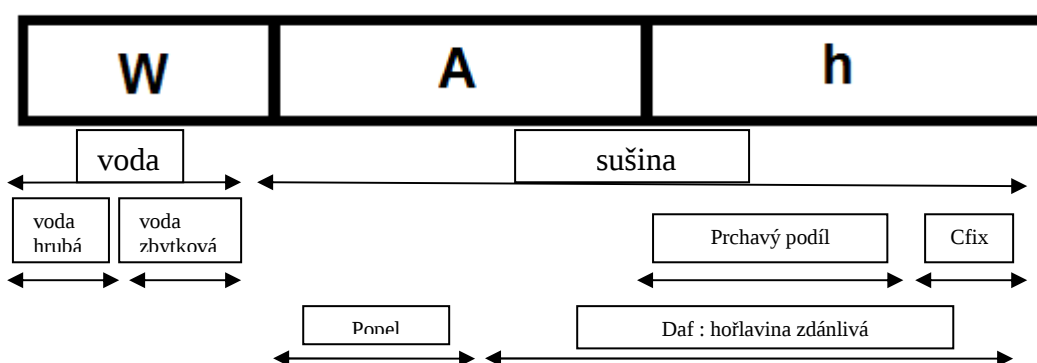
O celkovém složení biomasy, která je analyzována, jako vzorek paliva pro cílené spalování nesvědčí jen její původ ale i ostatní látky, které se během procesu dopravy a nakládky mohou přimísit do paliva. Tyto přimísené materiály mohou pocházet z přimísené zeminy, skladování, sběru a případnou geologickou kontaminací během sklizně.

Následující tabulka charakterizuje obsah základních prvků obsažených v biomasovém-dřevním palivu.

EÚ FSI VUT v Brně

Složka	Dřevo			Kůra	hnědé uhlí
	Jehličnaté [%]	Listnaté [%]	Smíšené [%]	[%]	[%]
Uhlík (C)	51,2	50	50,5	51,4	69,5
Vodík (H)	6,2	6,15	6,2	6,1	5,5
Kyslík (O)	42,2	43,25	42,7	42,2	23
Dusík (N)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,9
Síra (S)	-	-	-	-	1

Tab. 2 Prvkové složení dřevní biomasy[6]



Obr. 3 Grafické znázornění hořlaviny vody a popeloviny v palivu

Palivo	Hořlavina h	Voda W	Popelovina A
	[%]	[%]	[%]
Dřevo po těžbě	20-40	60-80	0,1
Dřevo - uschlé na vzduchu	79-82	17-20	0,5
Dřevní pelety	91	8	1

Tab. 3 Průměrné zastoupení hořlaviny, vody a popeloviny v dřevní biomase [6]

2.4.3 Alkalické kovy

Spalovací procesy při výrobě energie mohou být významným zdrojem zejména As, Cd, Hg, Ni, Se, Sn a V. Forma, ve které se těžké kovy vyskytují v palivu, a jejich množství má vliv na množství těchto kovů z něj uvolněné během spalování. Pokud je kov vázán na organickou hmotu (biomasa), pak s velkou pravděpodobností dojde k jeho odpaření. Naopak, když je vázán v hrubých minerálních částicích (popelovina uhlí), dojde často k jeho zachycení v popelu. Na množství uvolněných těžkých kovů má vliv také obsah Cl, S a vlhkost, dále podmínky v ohništi – oxidační a redukční podmínky, doba zdržení částic a teplota v ohništi. [7]

V tabulce 4. je znázornění procentuálního zastoupení oxidů K, Na, Mg, Ca, P, Si v dřevní biomase.

EÚ FSI VUT v Brně

Dřevina	Obsah popela [%]	složení popela [%]					
		K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂
Buk	0,55	0,09	0,02	0,06	0,31	0,03	0,01
Bříza	0,26	0,03	0,02	0,02	0,15	0,02	0,01
Dub	0,51	0,05	0,02	0,02	0,37	0,03	0,01
Borovice	0,26	0,04	0,01	0,03	0,14	0,02	0,01
Smrk	0,27	0,03	0,02	0,02	0,15	0,02	0,01
Modřín	0,27	0,04	0,02	0,07	0,17	0,03	0,01

Tab. 4 Charakteristická zastoupení alkalických kovů ve vzorcích dřevní biomasy [6]

2.4.4 PCDD/ PCDF

Látky PCDD/F mají potencionálně hepatotoxický, karcinogenní a teratogenní účinek na zdraví lidí. Jejich nadlimitní přívod do organismu člověka může působit inhibici epidermálního růstového faktoru, efekty na biochemické úrovni a srdeční a cévní choroby a celkové snížení imunity organismu. Tolerovaný denní příjem látek PCDD/F na člověka je 1 - 4 pg TEQ/kg tělesné váhy.

Přímý vstup PCDD/F do organismu dýcháním představuje 1 - 5% expozice, zbytek je příjem potravinami. Znečištění ovzduší se stává jednou z příčin kontaminace potravního řetězce. Doporučený imisní limit pro venkovní ovzduší je 20 fg TEQ/m³ jako průměrná 24 hodinová koncentrace. Hodnota 0,3 pg TEQ/m³ indikuje lokální zdroje emisí, které je nutno identifikovat a omezovat.

Pro zajímavost srovnání: legislativně jsou omezeny spalovny komunálních odpadů emisním limitem 0,1 ng/m³ TEQ.

Palivo	Cl mg/kg	HCl mg/m ³	ng TEQ/m ³
smrková štěpka	120	0,9	0,063
topolová štěpka	16	0,13	0,003
pelety z pšenič. slámy	2056	74	1,822
řezanka pšenič. slámy	1500	89	0,631
pelety ze sena	2890	173	0,835
řezanka ze sena	1681	50	1,909
pelety z triticales	575	72	0,078
řezanka z triticales	1390	45	0,082
řepkové pokrutiny	194	17	0,365

Tab. 5 Chemické zastoupení sloučenin chloru v dřevní biomase [8]

Při lokálním vytápění bytů dřevem se plynné emise PCDD/F pohybovaly v intervalu 0,1 - 2,0 mg TEQ na m³ a při spalování uhlí 8,0 - 41,8 ng TEQ/m³. [8]

Tento fakt je třeba sledovat a nadále monitorovat. Je více než jasné, že tyto data pocházejí z neřízeného spalování a naopak data předložená v tabulce 5. Jsou naměřeny při

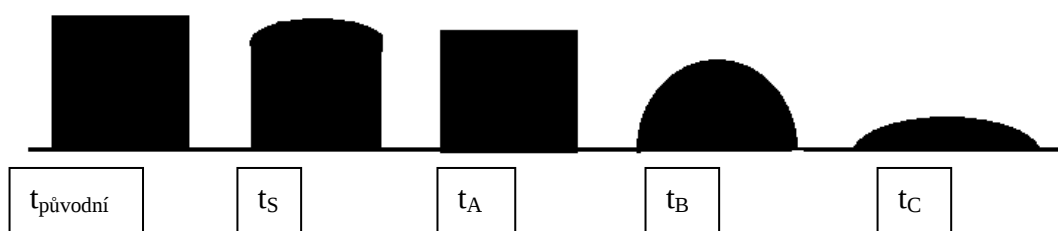
řízeném spalování s kyslíkovou sondou. V každém případě bychom na sloučeniny PCDD/PCDF neměli zapomínat a brát v potaz.

2.4.5 Charakteristické teploty popelovin

Chování popelovin při vysokých teplotách v ohništi, kdy některé složky měknou a popřípadě i přecházejí do kapalné fáze, je u většiny paliv jedním z nejvýznamnějších faktorů jak z hlediska konstruktéra samotného kotle tak provozovatele.

Nejrozšířenějším kritériem chování popelovin při vysokých teplotách jsou tzv. charakteristické teploty popela. Určování těchto teplot je dáno normou ČSN ISO 540.

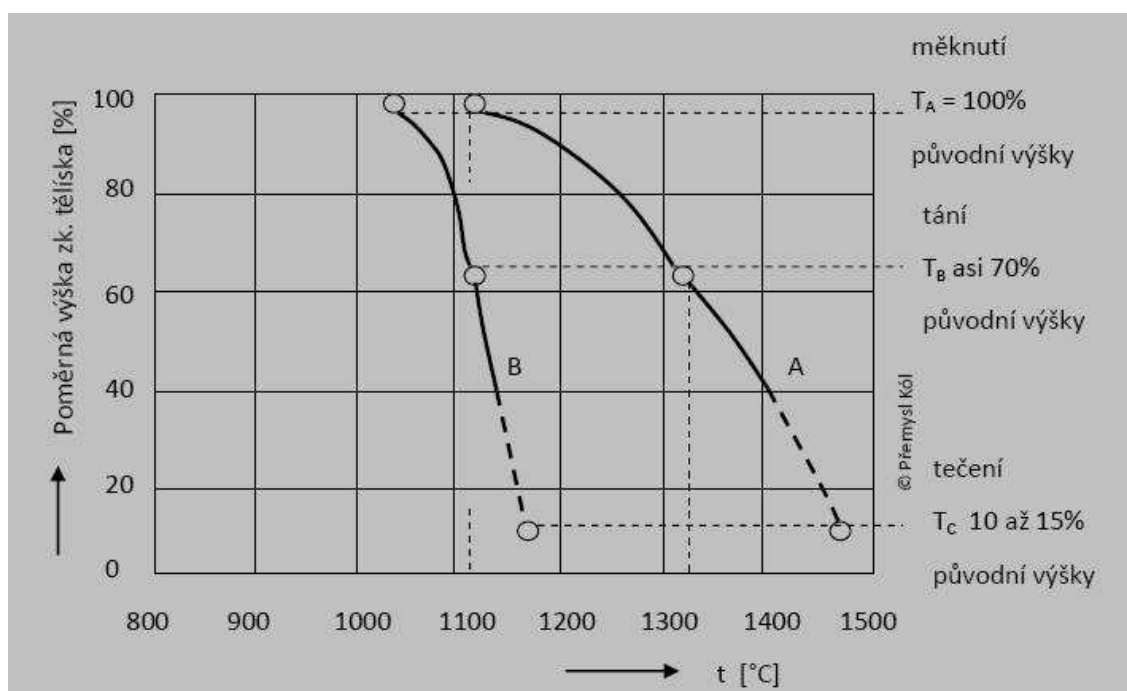
- teplota spékání (t_S)
 - spékají se částice na povrchu tělíska
- teplota měknutí (t_A)
 - teplota na počátku deformace
- teplota tavení (t_B)
 - roztavení tělíska na polokruhovitý tvar
- teplota tečení (t_C)
 - samotné roztečení tělíska



druh paliva	Měknutí	Tavení	Tečení
	[°C]		
Ječná sláma	659	783	923
Pšeničná sláma	612	767	1044
Řepková sláma	633	665	1452
Kukuřičná sláma	796	886	1036
Pšeničné zrno	612	727	772
Smrkové dřevo	1041	1180	1265
Hnědé uhlí	1260	1280	1360

Tab. 6 charakteristické teploty popela zemědělských plodin a dřeva [5]

EÚ FSI VUT v Brně



Obr. 4 Závislost výšky tělíska na teplotě [9]

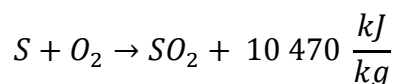
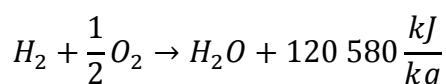
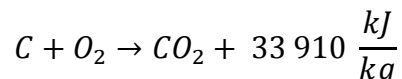
Prvky zvyšující charakteristické teploty popele	
oxid křemičitý	SiO_2
oxid hlinitý	Al_2O_3
Prvky snižující charakteristické teploty popele	
oxid železitý	Fe_2O_3
oxid hořečnatý	MgO
oxid titaničitý	TiO_2
oxid vápenatý	CaO
oxid fosforečný	P_2O_5
oxid sírový	SO_3
oxid manganičitý	Mn_3O_4
oxid sodný	Na_2O
oxid draselný	K_2O

Tab. 7 Vliv chemických látek na teplotu popele [10]

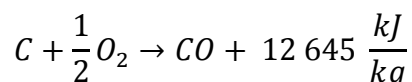
2.5 Problematika spalování biomasy

Obecná definice o spalování hovoří o oxidačním procesu, při kterém se uvolňuje energie chemicky vázaná v palivu. Je to tedy proces oxidace paliva, při kterém je uvolňování chemicky vázaného tepla doprovázeno navíc světelným efektem. Jedná se o exotermickou reakci hořlavých složek (hořlavina) paliva a okysličovadla (kyslík).

Níže je popis zjednodušené rovnice a vznikajícího tepla z oxidační reakce při dokonalém spalování biomasy reakcí uhlíku a vodíku, jakožto hlavní složka hořlaviny, s kyslíkem.[11]



Spalování tuhých paliv v malých ohništích však nikdy neprobíhá za ideálních podmínek. Nedochází k ideálnímu vyhoření uhlíku na oxid uhličitý. Část jej reaguje pouze na oxid uhelnatý, což je spojeno i s menším uvolněním energie.



Odsud můžeme odvodit, že se při nedokonalém spalování uvolní jen třetina možné energie „schovaná“ v uhlíku. Zbytek uvolněného uhlíku odchází ze spalovací komory dále a usazuje se na stěnách komínu a odchází ve formě tuhých znečišťujících látek ven komínem do ovzduší.[11]

2.6 Expediční formy biomasy

2.6.1 Dřevní štěpka

Dřevní štěpka je strojově nadrcená a nařezaná dřevní hmota. Jedná se o kusy o délce od 3mm do 15cm. Tyto kusy pochází z odpadů průmyslového zpracování dřeva nebo rychle rostoucích dřevin.

Obsah vody ihned po vytěžení se pohybuje okolo 55% a po přirozeném vysoušení přes léto je obsah vody v dřevní štěpce okolo 30%. Toto palivo je vhodné pro vytápění větších budov. Dřevní štěpku je možno dále dělit na:[28]

- Štěpku zelenou (lesní) - zbytky jehličí, listí, drobných větví atp.
- Štěpku hnědou - odřezky z pily, kůry stromů.
- Štěpku bílou – odkrojky při pilařské výrobě, zbavené kůry.

EÚ FSI VUT v Brně



Obr. 5 Štěpka bílá [12]



Obr. 6 Štěpka hnědá [12]

2.6.2 Brikety

Brikety jsou vyráběny lisováním ze suchého dřevního prachu, kůry, drtě či pilin. Mohou obsahovat také hobliny a zbytky dřevin. Můžeme se také setkat i s briketami ze slámy, kůry, dřeva nebo směsí těchto plodin. Výchozím tvarem jsou válečky nebo hranoly od průměru 40mm až do 100mm a délky 300mm.

Tyto typy válečků nebo hranolů je potřeba rozdělit pro cílené využití. Například brikety z měkkého dřeva, které mají uprostřed otvor, lépe prohořívají a používají se pro rychlejší zátop. Brikety pro trvalé topení je výhodnější použít plné brikety, pro stálé topení v rodinných domech.

Brikety mají obecně velmi malý obsah vlhkosti. Vlhkost se pohybuje okolo 8%, a objemová hmotnost okolo 1000kg/m³. [13]



Obr. 7 Vzor brikety [13]

2.6.3 Pelety

Pelety jsou stlačené výlisky válcovitého tvaru, které mohou mít průměr okolo 6mm a délku 5 až 40 mm. Takto vyráběné pelety mohou obsahovat dřevní zbytky, kousky kůry, dřevin, rašelin a jiné biomasy. Mohou tak vznikat směsné pelety. Pokud hovoříme o směsných peletách, tak tyto pelety mohou mít různé zbarvení v závislosti na použitém materiálu. Vlhkost pelet se obdobně jako u briket pohybuje okolo 8% a objemová hmotnost okolo 850 kg/m³. Výhodou je také to, že při spálení pelet vzniká z 1 tuny pelet zhruba 5kg popele, což je velmi nízké množství. Popel je možné použít jako zahradní hnojivo. S ohledem na životní prostředí, je to velmi dobrá varianta. [14]



Obr. 8 Typy pelet

- a) Dřevěné pelety bez kůry, b) Pelety z řepkové slámy,
c) Pelety ze slunečnice, d) Pelety ze šťovíku [14]

3 TECHNICKÉ ÚDAJE ZAŘÍZENÍ GEMOS KWH A ZKG

Následující popis zahrnuje technické údaje o spalovacím zařízení, které se skládá ze dvou součástí a to teplovodního kotle KWH a zplyňovací komory ZKG společnosti Gemos CZ Čelákovice. Obě součásti lze instalovat odděleně a postupně. Právě model zplyňovací komory ZKG bude podroben výpočtu v následujících kapitolách.

Spalovací jednotka Gemos je v tomto případě doplněna o další příslušenství jako: uzavřený zásobník, šnekový podavač paliva, cyklonový odlučovač popílku, spalínový ventilátor a systém řízení, regulace a měření.



Obr. 9 Gemos KWH a ZKG [15]

Teplovodní kotel KWH

Typ	KWH 180
Jmenovitý výkon	180 kW
Pracovní medium	Teplá voda
Pracovní přetlak	2,5 bar
Maximální teplota na výstupu z kotle	95°C
Minimální teplota na výstupu z kotle	60°C
Palivo	Dřevní kusy a odřezky (max 300mm a 35% W ^t)
Hmotnost	1150 kg
Rozměry (šířka x hloubka x výška)	910 x 1880 x 1550

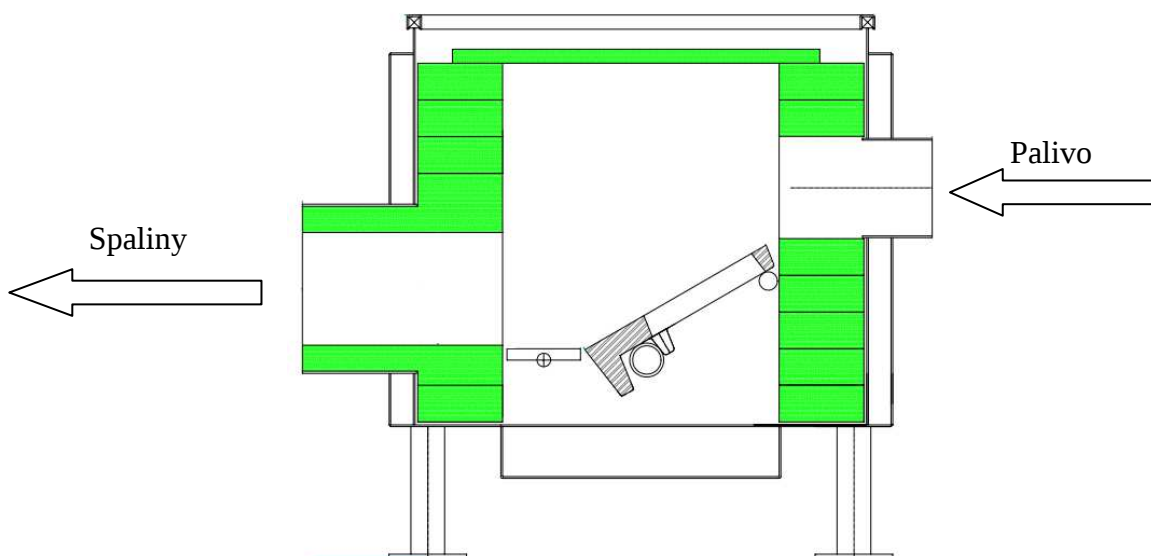
EÚ FSI VUT v Brně

Spalovací komora ZKG

Označení typu	ZKG - 110
Jmenovitý tepelný výkon	110 kW
Specifikace paliva	$Q_i^r=11500\text{kJ/kg}$, $W^r=32\%$, $t=5^\circ\text{C}$
Spotřeba paliva	43 kg/hod ; 4,2 m ³ /den
Palivo	Dřevní piliny a štěpky, pelety
-maximální vlhkost	35%
-maximální velikost zrna	30 mm
Hmotnost	600 kg
Rozměry: šířka x délka x výška	900 x 1520 x 1050 mm

Základní části komory ZKG

1. **Spalovací komora** je tvořena ocelovou konstrukcí a masivní vyzdívkou ze šamotových cihel, která zajišťuje akumulaci tepla a tím i stabilní teplotu v komoře. Strop komory je tvořen demontovatelnou keramickou deskou, izolací a odnímatelným ocelovým víkem. Tím je zajištěna možnost přístupu do celé nadroštové části komory v případě úprav a servisu. Ve stěně komory nad šikmým roštem jsou dveře, které umožňují okamžitý přístup do spalovacího prostoru. Pod roštem jsou z boku komory, v dolní části dvířka pro vybírání popele.
2. **Palivo** je přiváděno do horní části komory nad šikmý rošt. Po šikmém roštu se pohybuje směrem dolů vlivem gravitace a posunováním nově přichozího paliva. V této fázi dochází k ohřívání paliva, jeho vysušování a poté ke spalování. Za šikmým roštem následuje rošt vodorovný, kde palivo začíná hořet a do trysky komory vstupuje plamen. Na počátek trysky je přiváděn terciální vzduch. Pro zajištění kvalitního spalování jsou do komory přiváděny vzduchy primární, sekundární a terciální. Regulace množství a teploty vzduchu je pro každý okruh vzduchu samostatná. Předehřev vzduchu je řešen pro primární a sekundární okruh elektrickým ohřivačem, regulace případně uzavření vzduchu je realizováno regulační a uzavírací klapkou.
 - **Primární vzduch** je přiveden pod rošt jedním samostatným vstupem, druhý vstup je pouze připraven na případné modifikace a kombinace se vstupujícím množstvím vzduchu pod rošt.
 - **Sekundární vzduch** je přiveden jedním otvorem v boku komory nad vodorovný rošt a druhý vstup sekundárního vzduchu je rezervní.
 - **Terciální vzduch** je přiveden 2x2 trubkami na začátek trysky. Dvě trubky jsou umístěny ve stropu trysky a dvě ve spodní části. V trubkách jsou otvory směrem do trysky, což umožní dokonalé promíchání terciálního vzduchu a spalín. Trubky jsou výměnné, což umožní zkoušet vliv různých geometrií otvorů na kvalitu spalování.
3. Pro **snímání teploty** v komoře jsou ve stěně komory průchody pro čidla. Teplota spalín za zplyňovací komorou bude snímána čidlem v kotli za tryskou. [16]

Vnitřní konstrukce zplyňovací komory ZKG*Obr. 10 Schéma zplyňovací komory ZKG s rošty [16]*

Zplyňovací komora ZKG bude v následujících kapitolách podrobena výpočtu a měření při použití dřevní biomasy ve formě dřevních pilin o charakteristických vlastnostech, které jsou představeny v dalších kapitolách při stechiometrickém výpočtu. Na základě měření se ověří výpočtový stav spalovací komory. Ověří se možnost spalování velmi vlhkého paliva a případně se provedou úpravy takové, které zajistí spalování za co nejpříznivějších podmínek vzhledem k teplotám spalování, emisím a výkonu.

Některé parametry pro výpočet a nastavení spalovací komory včetně výsledku spalování velmi vlhkého paliva bylo požadavkem dle společnosti Gemos CZ s.r.o. Čelákovice.

4 STECHIOMETRICKÝ VÝPOČET

Stechiometrické výpočty slouží k určení potřeby vzduchu a objemu spalin při spalovacím procesu. Hodnoty používané ve vzorcích jsou vztaženy na 1 kg paliva a normálních podmínek, což je při 0°C a 0,101 MPa. Výpočty jsou vztaženy pro dokonalé spalování.

4.1 Vstupní parametry paliva

Vstupní parametry jsou základem pro stanovení stechiometrického výpočtu a jsou stanoveny z laboratorních zkoušek paliva, určeného pro spalování. Množství hořlavých složek v palivu bylo určeno průměrným složením těchto složek v možné použitelné biomase k řízenému spalování. Podíly základních složek biomasy jako je popel, vodík, uhlík, dusík, síra, kyslík byly získány jako průměrné z cca 10 vzorků různých druhů dřevin analyzovaných akreditovanou laboratoří TUEV NORD. [17] Hlavní vlastností biomasy byla vlhkost, kde byla použita biomasa s vlhkostí 35 a 55,8%. Zbylé údaje byly získány od firmy Gemos CZ.

Vstupní parametry			
Vlhkost	W^r	35 a 55,8	%
Popel v hořlavině	A^d	1,187	%
Vodík v hořlavině	H^{daf}	6,216	%
Uhlík v hořlavině	C^{daf}	49,557	%
Dusík v hořlavině	N^{daf}	0,246	%
Síra v hořlavině	S^{daf}	0,011	%
Kyslík v hořlavině	O^{daf}	43,957	%
Celkový součet	suma	99,987	%
Spalné teplo	Q^{daf}	19900	kJ/kg
Součinitel přebytku vzduchu	α	2	-
Účinnost	η	0,75	-
Výkon	P	110	kW

Tab. 8 Vstupní parametry výpočtu

➤ Určení složení paliva v surovém stavu, [18]

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) = 0,01187 \cdot (1 - 0,558) = 0,00525 \Rightarrow 0,525 \% \quad (4.1-1)$$

$$\begin{aligned} C^r &= C^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,4956 \cdot (1 - 0,558 - 0,00525) \\ &= 0,2448 \Rightarrow 24,48 \% \end{aligned} \quad (4.1-2)$$

$$\begin{aligned} H^r &= H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,0621 \cdot (1 - 0,558 - 0,00525) \\ &= 0,02715 = 2,715 \% \end{aligned} \quad (4.1-3)$$

$$\begin{aligned} N^r &= N^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,00246 \cdot (1 - 0,5558 - 0,00525) \\ &= 0,00107 \Rightarrow 0,107\% \end{aligned} \quad (4.1-4)$$

$$\begin{aligned} S^r &= S^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,00011 \cdot (1 - 0,558 - 0,00525) \\ &= 0,00005 \Rightarrow 0,005\% \end{aligned} \quad (4.1-5)$$

EÚ FSI VUT v Brně

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,43957 \cdot (1 - 0,558 - 0,00525) = 0,19198 \Rightarrow 19,198\% \quad (4.1-6)$$

Původní stav vzorku			
Voda	W^r	50	%
Popelovina	A^r	0,594	%
Vodík	H^r	3,071	%
Uhlík	C^r	24,484	%
Dusík	N^r	0,122	%
Síra	S^r	0,005	%
Kyslík	O^r	21,718	%
	suma	99,994	%

Tab. 9 Původní stav vzorku v surovém stavu

- Určení spalného tepla paliva, [18]

$$Q_s^r = Q_s^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad (4.1-7)$$

$$Q_s^r = 19900 \cdot (1 - 0,558 - 0,00525) = 8691,4 \frac{kJ}{kg}$$

- Určení výhřevnosti paliva, [18]

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) \quad (4.1-8)$$

$$Q_i^r = 19900 - 2453 \cdot (0,558 + 9 \cdot 0,02715) = 6723,26 \frac{kJ}{kg}$$

4.2 Stanovení objemu vzduchu při spalování

- Minimální objem kyslíku ke spálení 1kg paliva: viz [18]

$$V_{O_2}^{Min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (4.2-1)$$

$$V_{O_2}^{Min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,2164}{12,01} + \frac{0,02715}{4,032} + \frac{0,005}{32,06} - \frac{19,198}{32} \right) = 0,4188 \frac{m^3}{kg_{pal}}$$

- Minimální objem suchého vzduchu ke spálení 1kg paliva, [18]:

$$V_{VS}^{Min} = \frac{V_{O_2}^{Min}}{0,21} = \frac{0,4188}{0,21} = 1,994 \frac{m^3}{kg_{pal}} \quad (4.2-2)$$

- Objem vodní páry na 1 m³ suchého vzduchu, viz [18]:

Atmosférický vzduch obsahuje vždy určité množství vodní páry, která objem

EÚ FSI VUT v Brně

vzduchu zvětšuje. Koncentrace vodní páry je však závislé na teplotě vzduchu. Tato teplota odpovídá určitému tlaku vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu.

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p^a}{p^c - p^a} = 0,70 \cdot 0,024 = 0,0168 \quad (4.2-3)$$

φ [%] relativní vlhkost vzduchu $\varphi = 70$ % pro 25°C

p^c [Pa] celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu

p^a [Pa] absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě

$$\frac{p^a}{p^c - p^a} = 0,024 \text{ pro } 25^\circ\text{C}$$

Součinitel f :

Součinitel f vyjadřuje poměrné zvětšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry při dané relativní vlhkosti a teplotě vzduchu.

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p^a}{p^c - p^a} = 1 + 0,70 \cdot 0,024 = 1,0168 \quad (4.2-4)$$

Hodnoty f se pohybují v rozmezí 1,01 až 1,05.

- Minimální objem vlhkého vzduchu pro spálení 1kg paliva. [18]:

(Pro výpočet volen součinitel obsahu vodní páry $f=1,016$ pro 20°C a $\varphi=70\%$)

$$V_{VV}^{Min} = V_{VS}^{Min} \cdot f = 1,994 \cdot 1,0168 = 2,027 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}} \quad (4.2-5)$$

- Minimální objem vodní páry, [18]
 - pára z hořlaviny paliva (vodíku), z vlhkosti paliva a vlhkosti spalovacího vzduchu.

$$V_{H_2O} = V_{VV}^{Min} - V_{VS}^{Min} = (f - 1) \cdot V_{VS}^{Min} \quad (4.2-6)$$

$$V_{H_2O} = (1,0168 - 1) \cdot 1,994 = 0,0319 \frac{\text{m}_{H_2O}^3}{\text{kg}_{pal}}$$

- Skutečné množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva s ohledem na součinitel přebytku vzduchu, [18]

$$V_{VV}^{skut} = V_{VV}^{Min} \cdot \alpha = 2,027 \cdot 2 = 4,053 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}} \quad (4.2-7)$$

4.3 Stanovení objemu spalin při spalování

- Minimální objem suchých spalin, který vzniká při dokonalém spálení 1kg paliva je složen z částí objemů vzniklých plynných složek, viz [18].

$$V_{SS}^{Min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

- Objem oxidu uhličitého ve spalinách:

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{VS}^{Min} \quad (4.3-1)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,2164 + 0,0003 \cdot 1,994 = 0,4071 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Objem oxidu siřičitého ve spalinách:

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0005 = 0,000033 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad (4.3-2)$$

- Objem dusíku ve spalinách:

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{VS}^{Min} \quad (4.3-3)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,00107 + 0,7805 \cdot 1,994 = 1,5574 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Objem argonu ve spalovacím vzduchu:

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{SS}^{Min} = 0,0092 \cdot 1,994 = 0,0183 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (4.3-4)$$

- Objem suchých spalin

$$V_{SS}^{Min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

$$V_{SS}^{Min} = 0,4071 + 0,000033 + 1,5574 + 0,0183 = 1,9776 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}}$$

- Objem vodní páry ve spalinách, viz [18]

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,81}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,41}{18,016} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{VS}^{Min} \quad (4.3-5)$$

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,02715 + \frac{22,41}{18,016} \cdot 0,558 + (1,016 - 1) \cdot 1,994$$

$$V_{H_2O}^S = 1,0274 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}}$$

- Minimální objem vlhkých spalin, [18]

$$V_{SV}^{Min} = V_{SS}^{Min} + V_{H_2O}^S = 1,9776 + 1,0274 = 3,005 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}} \quad (4.3-6)$$

EÚ FSI VUT v Brně

- Objem vlhkých spalin při spalování s přebytkem vzduchu α , viz [18]

$$V_{SV} = V_{SV}^{Min} + (\alpha - 1) \cdot V_{VV}^{Min} = 3,0052(2 - 1) \cdot 2,026 \quad (4.3-7)$$

$$V_{SV} = 5,031 \frac{m^3}{kg_{pal}}$$

4.3.1 Hustota spalin

Je dána jednotlivým zastoupením složek spalin a hustotou jejich složek ve výsledné směsi spalin. [18]

$$\rho_{SP} = (x_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + x_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2} + x_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + x_{Ar} \cdot \rho_{Ar} + x_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + x_{vzduch} \cdot \rho_{vz}) \quad (4.3.1-1)$$

$$CO_2: \quad x_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SV}} = \frac{0,4017}{5,031} = 0,0798 \quad (4.3.1-2)$$

$$SO_2: \quad x_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SV}} = \frac{0,000033}{5,031} = 6,519E - 6 \quad (4.3.1-3)$$

$$N_2: \quad x_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SV}} = \frac{1,557}{5,031} = 0,30955 \quad (4.3.1-4)$$

$$Ar: \quad x_{Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{SV}} = \frac{0,0183}{5,031} = 0,00364 \quad (4.3.1-5)$$

$$H_2O: \quad x_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SV}} = \frac{1,027}{5,031} = 0,2042 \quad (4.3.1-6)$$

$$\begin{aligned} Vzduch: \quad x_{vzduch} &= 1 - (x_{CO_2} + x_{SO_2} + x_{N_2} + x_{Ar} + x_{H_2O}) \\ &= 1 - (0,0798 + 6,519E - 6 + 0,30955 + 0,00364 + 0,2042) = 0,403 \end{aligned} \quad (4.3.1-7)$$

- Objemové části tříatomových plynů. [18]

$$r_{RO_2} = \frac{V_{SO_2} + V_{CO_2}}{V_{SV}} = \frac{0,000033 + 0,4017}{5,031} = 0,0798 \quad (4.3.1-8)$$

$$r_{HO_2} = \frac{V_{HO_2}}{V_{SV}} = \frac{1,0273}{5,031} = 0,203 \quad (4.3.1-9)$$

$$r_{SV} = r_{RO_2} + r_{HO_2} = 0,0798 + 0,203 = 0,283 \quad (4.3.1-10)$$

EÚ FSI VUT v Brně

Po dosazení vypočtených hodnot do vztahu pro celkovou hustotu spalín dostáváme:

$$\rho_{SP} = (x_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + x_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2} + x_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + x_{Ar} \cdot \rho_{Ar} + x_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + x_{vzduch} \cdot \rho_{vz})$$

hustoty veličin		
ρ_{CO_2}	1,9768	kg/m ³
ρ_{SO_2}	2,9262	kg/m ³
ρ_{N_2}	1,25047	kg/m ³
ρ_{Ar}	1,78385	kg/m ³
ρ_{H_2O}	0,8058	kg/m ³
ρ_{vzduch}	1,293	kg/m ³

Tab. 10 hustoty jednotlivých veličin spalín [19]

$$\rho_{SP} = 0,0798 \cdot 1,976 + 6,519E - 6 \cdot 2,926 + 0,309 \cdot 1,25 + 0,00364 \cdot 1,78 + 0,204 \cdot 0,804 + 0,4027 \cdot 1,293$$

$$\rho_{SP} = 1,237 \text{ kg/m}^3$$

4.4 Hmotové množství vzduchu a spalín

- Hmotové minimální množství spalovacího kyslíku [18]

$$G_{O_2min} = 32 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (4.4-1)$$

$$G_{O_2min} = 32 \cdot \left(\frac{0,2164}{12,01} + \frac{0,02715}{4,032} + \frac{0,005}{32,06} - \frac{0,19198}{32} \right) = 0,600 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

- Hmotové minimální množství suchého spalovacího vzduchu na 1kg spáleného paliva [18]

$$G_{vSmin}^s = \frac{1}{0,2331} \cdot G_{O_2min} = 2,575 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \quad (4.4-2)$$

- Hmotové minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu [18]

$$G_{vVmin}^s = G_{vSmin}^s + (f - 1) \cdot \frac{1}{0,21} \cdot 0,804 \cdot V_{O_2min} \quad (4.4-3)$$

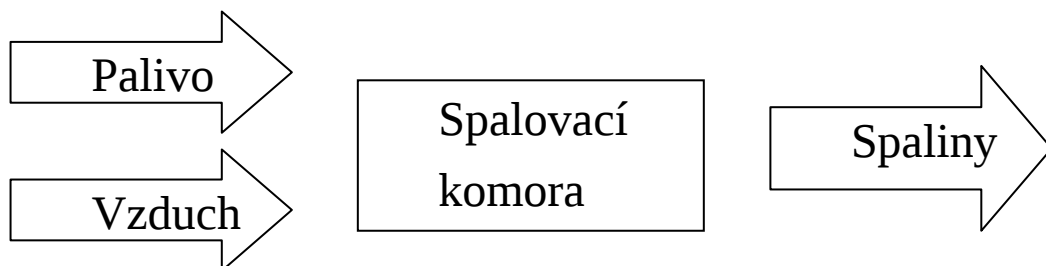
Pozn.: 0,804 kg/m³ reprezentuje měrnou hmotu vodní páry při 0°C a 0,101 MPa

$$G_{vVmin}^s = 2,575 + (1,0168 - 1) \cdot \frac{1}{0,21} \cdot 0,804 \cdot 0,600 = 2,601 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

4.5 Tepelná bilance ohniště

Tepelná bilance ohniště nám stanoví množství tepla uvolněného ve spalovací komoře. Z tohoto tepla lze následně vypočítat teplotu nechlazeného plamene, která nám představuje teplotu spalovací komory.

Schematicky lze tepelnou bilanci ohniště popsat následujícím obrázkem, kde vstupuje do spalovací komory množství paliva a jeho výhřevnost, množství spalovacího vzduchu a odchází nám teplo spalin, vzniklé spálením paliva v komoře za současného uvolnění tepla.



➤ **Teplo obsažené v palivu [20]**

$$Q_{pal} = Q_{ir} \cdot M_{pal} \cdot \eta \quad (4.5-1)$$

$$Q_{pal} = 6723 \cdot 0,0136 \cdot 0,75 = 68,9 \frac{kJ}{s}$$

$$\text{Kde } M_{pal} = 49,2 \text{ kg/hod} \rightarrow 0,0136 \text{ kg/s}$$

Pozn.: Vzhledem k výhřevnosti paliva viz 4.1-2 je entalpie samotného paliva před spálením zanedbatelná. Proto entalpii paliva obsaženou v palivu neuvažují.

➤ **Teplo obsažené ve spalovacím vzduchu [20]**

- Pro zjednodušení výpočtu uvažují se ztrátou mechanickým a chemickým nedopalem do 5%, tuto hodnotu jsem získal po konzultaci s Ing. Martinem Lisým.

$$Q_{vzduch} = (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{VV} \cdot i_{VV}$$

$$Q_{vzduch} = (1 - 0,05) \cdot 4,584 \cdot 1,297 \cdot 25 = 141,2 \frac{kJ}{kg} \quad (4.5-2)$$

➤ **Teplo obsažené ve spalinách [20]**

$$Q_{spaliny} = M_{pal} \cdot (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{SV} \cdot i_{SV} \quad (4.5-3)$$

$$Q_{spaliny} = 0,0136 \cdot (1 - 0,95) \cdot 5,031 \cdot X$$

-entalpii spalin neznáme, proto budeme vycházet z bilanční rovnice, viz 4.5-4.

Bilanční rovnice ve spalovací komoře

Bilanční rovnice ohniště nám charakterizuje stav mezi vstupními a výstupními produkty spalovacího procesu. Vyjadřuje rovnováhu mezi stavy před spálením paliva a po spálení za současného uvolnění tepla. [20]

EÚ FSI VUT v Brně

$$Q_{pal} + Q_{vzduch} = Q_{spaliny} \quad (4.5-4)$$

$$Q_{ir} \cdot M_{pal} \cdot \eta + (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{VV} \cdot i_{VV} = M_{pal} \cdot (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{SV} \cdot i_{SV}$$

4.6 Teplota nechlazeného plamene

Při tepelné bilanci kotlů a spalínových výměníků je třeba vyjadřovat teplo, které je spalínám odebíráno. K tomuto účelu je vhodné využít entalpii spalín lépe než jejich měrnou tepelnou kapacitu, která se s teplotou výrazně mění. Pro zjednodušení bilančních vztahů je výhodnější nepracovat s měrnou entalpií spalín vztaženou na jednotku jejich objemu nebo hmotnosti, ale jako základní vztažnou jednotku brát objem spalín, který přísluší spálení jednotkového množství paliva. Jednotkou entalpie spalín je pak kJ/m^3 . [19]

Z bilanční rovnice ohniště (4.5-4) lze vyseparováním entalpie spalín zjistit množství tepla uvolněného uvnitř spalovací komory.

Entalpii vlhkého vzduchu i_{VV} nahradíme vztahem $c_{VV} \cdot t_{VV}$

$$i_{SV} = \frac{Q_{ir} \cdot \eta + (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{VV} \cdot i_{VV}}{(1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{SV}} \quad (4.6-1)$$

$$i_{SV} = \frac{Q_{ir} \cdot \eta + (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{VV} \cdot c_{VV} \cdot t_{VV}}{(1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{SV}} \quad (4.6-2)$$

$$i_{SV} = \frac{6723.3 \cdot 0,75 + (1 - 0,05) \cdot 4,053 \cdot 1,297 \cdot 25}{(1 - 0,05) \cdot 5.031}$$

$$i_{SV} = 1081,1 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Teplotu spalín lze získat z tabulky závislosti entalpie složek spalín, které obsahují spaliny na teplotě. Složky spalín jsou přepočítány dle poměru zastoupení v celkovém množství spalín pro danou teplotu. Níže je tabulka vyjadřující tyto závislosti.

	entalpie [kJ/m3]							
	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
CO ₂	357	559	772	994	1225	1462	1705	1952
SO ₂	392	610	836	1070	1310	1550	1800	2052
H ₂ O	304	463	626	795	969	1149	1334	1526
N ₂	260	392	527	666	804	948	1094	1241
vzduch	267	407	551	699	850	1004	1160	1318
Ar	186	278	372	465	557	650	743	835
I _{sp}	279,2804	425,45996	575,8817	731,0928	888,9386	1051,558	1217,102	1385,506

Tab. 11 Entalpie složek spalín v závislosti na teplotě [18]

EÚ FSI VUT v Brně

➤ Určení entalpie směsi spalin pro 700°C :

$$\begin{aligned}
 i_{sp700} &= x_{CO_2} \cdot 1461 + x_{SO_2} \cdot 1550 + x_{H_2O} \cdot 1149 + x_{N_2} \cdot 948 + x_{vz} \cdot 1160 \\
 &+ x_{Ar} \cdot 743 = \\
 i_{sp700} &= 0,0798 \cdot 1461 + 6,5198E-6 \cdot 1550 + 0,204 \cdot 1149 \\
 &+ 0,309 \cdot 948 + 0,402 \cdot 1160 + 0,00364 \cdot 743 = \mathbf{1051,56 \text{ kJ/m}^3}
 \end{aligned}
 \tag{4.6-3}$$

➤ Určení entalpie směsi spalin pro 800°C :

$$\begin{aligned}
 i_{sp800} &= x_{CO_2} \cdot 1705 + x_{SO_2} \cdot 1800 + x_{H_2O} \cdot 1334 + x_{N_2} \cdot 1094 + x_{vz} \cdot 1160 \\
 &+ x_{Ar} \cdot 743 \\
 i_{sp800} &= 0,0798 \cdot 1705 + 6,5198E-6 \cdot 1800 + 0,204 \cdot 1334 + 0,309 \cdot 1094 \\
 &+ 0,402 \cdot 1160 + 0,00364 \cdot 743 = \mathbf{1217,10 \frac{kJ}{m^3}}
 \end{aligned}
 \tag{4.6-4}$$

Pro hodnotu získané entalpie spalin $i_{SV} = 1081,1 \frac{kJ}{m^3}$ (3.6-2) hledáme teplotu spalin v rozmezí mezi 700-800°C. Přesnou hodnotu určíme lineární interpolací.

$$T_{sp} = 700 + (i_{SV} - i_{700^\circ C}) \cdot \frac{800 - 700}{i_{800^\circ C} - i_{700^\circ C}}
 \tag{4.6-5}$$

$$T_{sp} = 700 + (1081,10 - 1051,56) \cdot \frac{800 - 700}{1217,10 - 1051,56}$$

$$\mathbf{T_{sp} = 717,8 \text{ } ^\circ\text{C} = \text{Teplota nechlazeného plamene}}$$

4.6.1 I-t diagram spalin bez recirkulace

Podobně jako u stechiometrického výpočtu je i entalpie spalin svázána s konkrétním složením paliva. Změna paliva má za následek změnu entalpie. I-t diagram spalin graficky znázorňuje závislost entalpie spalin na teplotě a přebytku vzduchu. Tento diagram pak umožňuje vzájemný převod těchto veličin mezi sebou.

Entalpii spalin o teplotě t [°C], které vzniknou spálením 1kg tuhého paliva s přebytkem vzduchu α je dáno vztahem: [19]

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \left[\frac{kJ}{kg} \right] \text{ resp. } \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad (4.7.1-1)$$

➤ Entalpie spalin při dané teplotě (pracovní bod 100°C) [19]

$$I_{Smin}^t = i_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + i_{SO_2} \cdot V_{SO_2} + i_{N_2} \cdot V_{N_2} + i_{Ar} \cdot V_{Ar} + i_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop} \quad (4.7.1-2)$$

Pozn.: vliv popílku ve spalinách zanedbáváme z důvodu velmi malého ovlivnění celkové entalpie spalin.

$$I_{Smin}^t = 170 \cdot 0,4549 + 191 \cdot 0,000037 + 129 \cdot 2,8913 + 93 \cdot 0,03407 + 151 \cdot 1,0221$$

$$I_{Smin}^t = 608 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Měrné teplo vzduchu

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 9,949 \frac{g}{kg} \quad (4.7.1-3)$$

$$c = c_s + 0,0016 \cdot d = 1,300 + 0,0016 \cdot 9,949 = 1,316 \frac{kJ}{m^3 K} \quad (4.7.1-4)$$

➤ Entalpie vzduchu při dané teplotě (pracovní bod 100°C)

$$I_{Vmin}^t = V_{Vmin} \cdot (c \cdot t)_{vz} \quad (4.7.1-5)$$

$$I_{Vmin}^t = 1,994 \cdot 1,316 \cdot 100 = 262 \frac{kJ}{kg}$$

➤ Celková entalpie spalin $\alpha=2$, $t=100^\circ\text{C}$, $f=1,016$

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad (4.7.1-6)$$

$$I_S^{t,\alpha} = 608 + 262 = 9689 \frac{kJ}{kg}$$

EÚ FSI VUT v Brně

teplota	Entalpie spalin					Měrné teplo vzduchu	
t	i CO ₂	i SO ₂	i N ₂	i Ar	i H ₂ O	c _s	c _v
[°C]	[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[kJ/m ³]
100	170	191	129	93	151	1,300	1,316
200	357	394	260	186	305	1,307	1,323
300	559	610	392	278	463	1,317	1,333
400	772	836	526	372	626	1,329	1,345
500	994	1070	664	465	795	1,343	1,359
600	1225	1310	804	557	968	1,356	1,372
700	1462	1554	947	650	1149	1,371	1,387
800	1705	1801	1093	743	1335	1,384	1,400
900	1952	2052	1241	835	1526	1,398	1,414
1000	2203	2304	1392	928	1723	1,410	1,426
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1,433	1,449
1400	3239	3323	2009	1300	2559	1,453	1,469
1600	3769	3587	2325	1577	3002	1,471	1,487

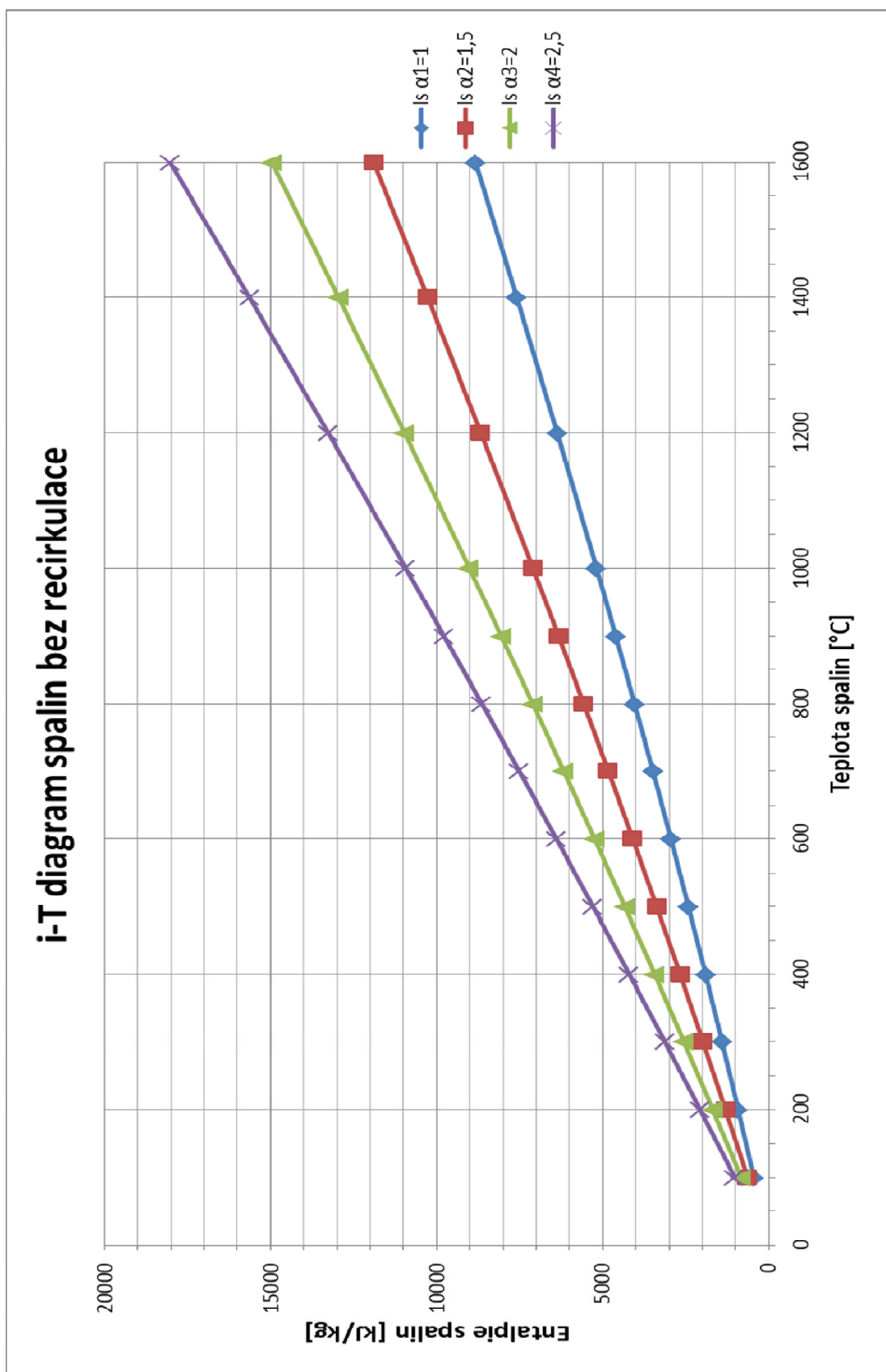
Tab. 12 Závislost Entalpie složek spalin na teplotě[19]

Pro zjednodušení práce při opakovaném výpočtu pro rozdílné teploty byla složena tabulka 12. a graf, který zachycuje závislost entalpie spalin na teplotě a přebytku spalovacího vzduchu. Tabulka a graf umožňuje snadnější orientaci a převod veličin mezi sebou bez dodatečného výpočtu. Při odečítání z grafu počítejme s nepřesností a pro odečtení hodnot je přesnější použít tabulku. Tyto závislosti byly vytvořeny pomocí programu Excel za pomoci rovnic z kapitoly 3.7.1.

t	I _{Smin}	I _{Vmin}	I _s	I _s	I _s	I _s
[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	$\alpha_1=1$	$\alpha_2=1,5$	$\alpha_3=2$	$\alpha_4=2,5$
100	426	339	426	595	765	934
200	865	681	865	1206	1546	1887
300	1316	1030	1316	1831	2346	2860
400	1779	1385	1779	2472	3165	3857
500	2259	1750	2259	3134	4008	4883
600	2749	2120	2749	3809	4869	5928
700	3255	2500	3255	4505	5755	7005
800	3773	2884	3773	5214	6656	8098
900	4300	3277	4300	5939	7577	9215
1000	4840	3672	4840	6676	8512	10348
1200	5947	4477	5947	8185	10424	12662
1400	7083	5295	7083	9731	12379	15026
1600	8249	6126	8249	11312	14375	17438

Tab. 13 Závislost Entalpie spalin na teplotě a přebytku vzduchu

Obr. 11 Graf závislosti Entalpie spalin na teplotě a přebytku vzduchu bez recirkulace



4.6.2 Měrná tepelná kapacita spalin

Ze závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě všech složek spalin lze vypočítat celkovou měrnou tepelnou kapacitu výsledné směsi spalin pro dané teploty

	cp [kJ/m ³ K]							
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
CO ₂	1,6696	1,7863	1,8626	1,9298	1,9892	2,0419	2,0889	2,1311
SO ₂	1,8631	1,9427	2,001	2,0725	2,1227	2,1688	2,2063	2,224
H ₂ O	1,5062	1,5227	1,5425	1,5648	1,5891	1,6147	1,6413	1,6684
N ₂	1,2951	1,2994	1,3069	1,3167	1,3281	1,3404	1,3533	1,3664
vzduch	1,3	1,307	1,317	1,329	1,343	1,356	1,371	1,384
cp_{sp}	1,365364	1,382203	1,3986883	1,41647503	1,435348	1,453827	1,473046	1,4912407

Tab. 14 Závislost měrné tep. kapacity na teplotě složek spalin[18]

➤ Určení měrné tepelné kapacity směsi spalin pro 700°C :

$$\begin{aligned}
 c_{p700} &= x_{CO_2} \cdot 2,0889 + x_{SO_2} \cdot 2,2063 + x_{H_2O} \cdot 1,6413 + x_{N_2} \cdot 1,3533 \\
 &+ x_{vz} \cdot 1,371 = 0,0798 \cdot 2,0889 + 6,5198E-6 \cdot 2,2063 + 0,204 \\
 &\cdot 1,6413 + 0,309 \cdot 1,3533 + 0,403 \cdot 1,371 = \mathbf{1,4730 \text{ kJ/m}^3\text{K}}
 \end{aligned}
 \quad (4.6.2-1)$$

➤ Určení měrné tepelné kapacity směsi spalin pro 800°C :

$$\begin{aligned}
 c_{p800} &= x_{CO_2} \cdot 2,1311 + x_{SO_2} \cdot 2,224 + x_{H_2O} \cdot 1,668 + x_{N_2} \cdot 1,366 \\
 &+ x_{vz} \cdot 1,384 = 0,0798 \cdot 2,1311 + 6,5198E-6 \cdot 2,224 + 0,204 \\
 &\cdot 1,668 + 0,309 \cdot 1,366 + 0,403 \cdot 1,356 = \mathbf{1,4912 \text{ kJ/m}^3\text{K}}
 \end{aligned}
 \quad (4.6.2-2)$$

Pro hodnotu získané teploty spalin $T_{sp} = 717,8^\circ\text{C}$ hledáme měrnou tepelnou kapacitu ve sloupci rozmezí teplot 700-800°C. Přesnou hodnotu měrné tepelné kapacity celkové směsi spalin určíme lineární interpolací hodnot směsi spalin pro tyto teploty.

$$c_{p717,8} = (c_{p800} - c_{p700}) \cdot \frac{717,8 - 700}{100} + c_{p700}
 \quad (4.6.2-3)$$

$$c_{p717,8} = (1,4912 - 1,4730) \cdot \frac{17,8}{100} + 1,4730 = \mathbf{1,4764 \text{ kJ/m}^3\text{K}}
 \quad (4.6.2-4)$$

Pozn.: Tabulka 14. neobsahuje poměrné zastoupení Argonu ve spalinách. Je to z důvodu zjednodušení a zanedbatelného množství v celkové směsi spalin.

4.7 Závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti

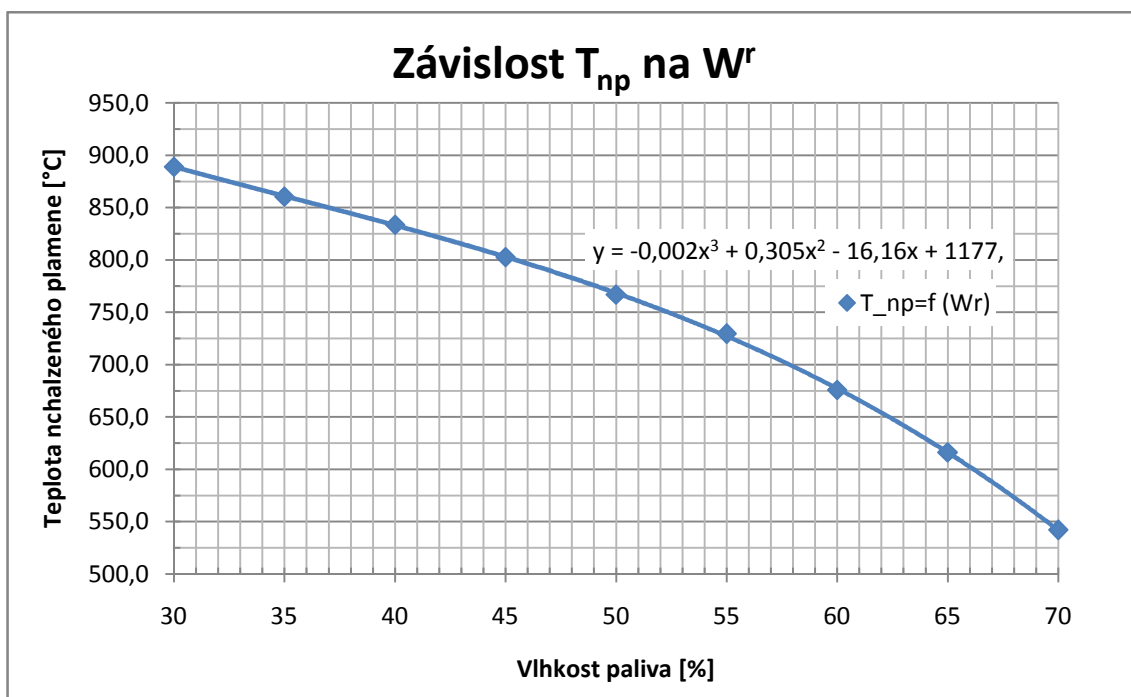
Výpočet a stanovení závislosti teploty nechlazeného plamene podléhá cyklickému výpočtu rovnic 4.1.1 až 4.6.5 pro jednotlivou vlhkost paliva, která je volena krokem 5% v intervalu 30-70% vlhkosti ve vzorku dřevní biomasy.

Vzhledem k výsledkům v tabulce 15, kde jsou vypočteny teploty nechlazeného plamene vzhledem k vlhkosti biomasy, lze konstatovat, že s rostoucí vlhkostí biomasy klesá exponenciálně i teplota nechlazeného plamene.

Pozn.: důležité parametry výpočtu: $\alpha=2$; $f=1,016$; $W^T=30-70\%$; $T_{VV}=25^\circ\text{C}$

W^r [%]	T [$^\circ\text{C}$]
30	888,8
35	860,5
40	833,5
45	802,7
50	766,8
55	729,4
60	675,7
65	616,1
70	542,0

Tab. 15 Závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti bez recirkulace



Obr. 12 Graf závislosti teploty nechlazeného plamene na vlhkosti bez recirkulace

4.8 Regulace teploty vzduchu

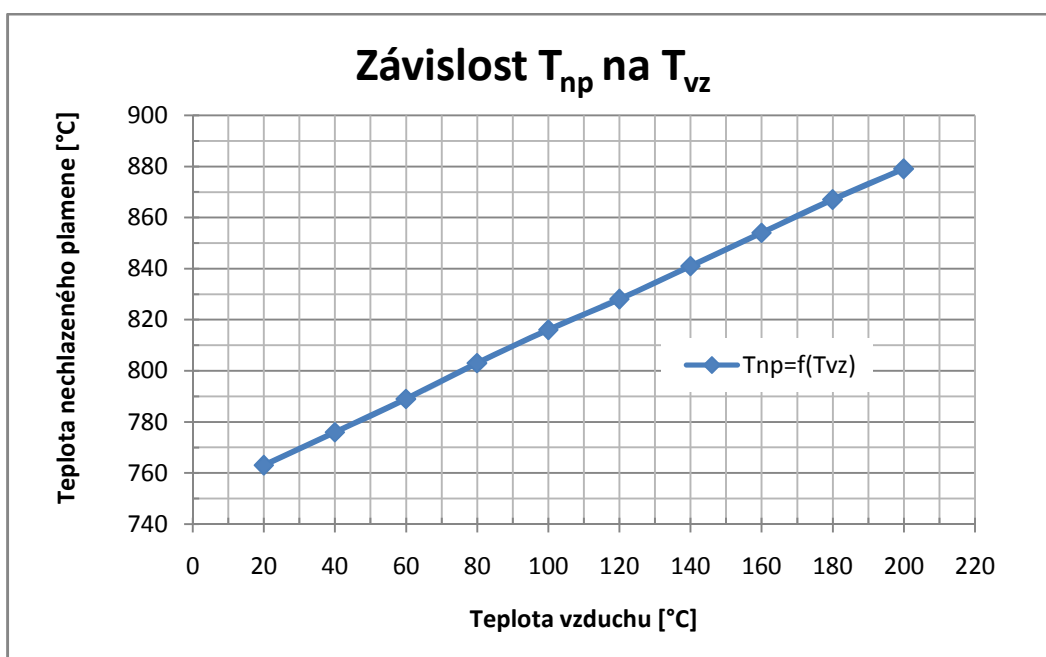
Stanovení závislosti změny teploty vzduchu na teplotě nechlazeného plamene je provedeno za použití cyklického výpočtu rovnic 4.5-2 až 4.6-5, kde se uvažuje změna teploty nasávaného vzduchu v rozmezí 20-200°C s krokem 20°C. Tabulka a graf vyjadřující tuto závislost je sestavena v programu Excel.

V případě optimalizace procesu spalování ve spalovací komoře by bylo možné teplotu nasávaného vzduchu měnit podle závislosti v tabulce 16 resp. v obr. 14.

Pozn.: důležité parametry výpočtu: $\alpha=2$; $f=1,016$; $W^T=55,8\%$; $T_{VV}=20-200^\circ\text{C}$

Vzduch	T_{np}
[°C]	[°C]
20	763
40	776
60	789
80	803
100	816
120	828
140	841
160	854
180	867
200	879

Tab. 16 Tabulka závislosti ohřevu spalovacího vzduchu na teplotě nechlazeného plamene



Obr. 13 Graf závislosti ohřevu spalovacího vzduchu na teplotě nechlazeného plamene

4.9 Recirkulace spalin

Recirkulace spalin znamená návrat části proudu spalin zpět do ohniště. Využívá se především v uhelných práškových kotlích. Svým principem slouží k vysoušení paliva před přípravou paliva nebo účelného vysoušení paliva s cílem co nejvíce využít energetický potenciál spalovaného paliva. K tomu je třeba využít spaliny s co možná nejvyšší teplotou, která je vhodná pro konkrétní navrhovaný případ.

V současné době je recirkulace spalin využívána k potlačení tvorby NO_x druhotně také CO a u fluidních kotlů pro regulaci teploty ve fluidní vrstvě. Zásobování spalin je řešeno speciálním spalinovým ventilátorem.

Charakteristickým znakem je **poměr recirkulace r** . Je to poměr objemu mezi spalinami, které odchází nazpět k roštu a objemu celkového množství spalin uvolněných spálením paliva.[19]

$$r = \frac{V_S^r}{V_{SVod}} [-] \quad (4.9-1)$$

Poměr recirkulace zvolen: $r=0,1$

$$V_S^r - \text{Objem spalin odebíraných na recirkulaci} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

$$V_{SVod} - \text{Objem spalin naměřený v místě odběru spalin} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

- Objem spalin na konci kotle od místa zavedení spalin až do místa jejich odběru [19]

$$V_{SVr} = V_{SV} + r \cdot V_{SVod} \quad (4.9-2)$$

$$V_{SVr} = 5,031 + 0,1 \cdot 5,031 = 5,534 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{SV} - \text{Objem spalin v daném bodě bez vlivu recirkulace} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

- Entalpie spalin v místě jejich zavedení do traktu po smísení [19]

$$i_{SVr} = i_{SV} + r \cdot i_{SVod} \quad (4.9-3)$$

$$i_{SVr} = 1081,1 + 0,1 \cdot 540,3 = 1135,9 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$i_{SV} - \text{pro teplotu nechlazeného plamene } t = 717,8^\circ\text{C}$$

$$i_{SVod} - \text{pro teplotu odchozích spalin o teplotě } t = 200^\circ\text{C}$$

$$I_{SVod} = I_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin} \quad (4.9-4)$$

$$i_{SVod} = \frac{I_{SVmin}}{V_{SVmin}} + (\alpha - 1) \cdot \frac{I_{Vmin}}{V_{Vmin}}$$

$$i_{SVod} = \frac{865}{3,001} + (2 - 1) \cdot \frac{528}{2,026} = 548,3 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

EÚ FSI VUT v Brně

- Celkové měrné teplo spalín z 1 kg paliva po smíšení [19]

$$(V_{SV} \cdot c)_{SVr} = (V_{SV} \cdot c)_{SV} + r \cdot (V_{SV} \cdot c)_{SVod} \quad (4.9-5)$$

$$(V_{SV} \cdot c)_{SVr} = 5,031 \cdot 1,476 + 0,1 \cdot 5,031 \cdot 1,382 = 7,43 + 0,67$$

$$(V_{SV} \cdot c)_{SVr} = 8,12 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$(V_{sp} \cdot c)_{sp}$ – celkové měrné teplo v místě zavedení spalín před smíšením

$(V_{sp} \cdot c)_{spod}$ – celkové měrné teplo spalín, které zůstávají na místě odběru

- Teplota spalín po smíšení [19]

$$T_{SVr} = \frac{i_{SVr} \cdot V_{SVr}}{(V_{SV} \cdot c)_{SVr}} = \frac{1135,9 \cdot 5,534}{8,12} = 772,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.9-6)$$

4.9.1 Entalpie vzduchu a spalín s recirkulací

- Množství vzduchu na konci kotle [19]

$$V_{VV} = (\alpha - 1) \cdot V_{VVmin} = (2,05 - 1) \cdot 2,026 = 2,026 \frac{m^3}{kg} \quad (4.9.1-1)$$

- Vzduch v ohništi [19]

$$V_{VV}^r = (\alpha - 1) \cdot V_{VVmin} + r \cdot V_{VV} \quad (4.9.1-2)$$

$$V_{VV}^r = (2,05 - 1) \cdot 2,026 + 0,1 \cdot 4,053 = 2,229 \frac{m^3}{kg}$$

- Podíly složek spalín [19]

$$x_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}^r}{V_{SVr}} = \frac{0,442}{5,534} = 0,0798 \quad (4.9.1-3)$$

$$V_{CO_2}^r = V_{SV} \cdot r \cdot x_{CO_2} + V_{SV} \cdot x_{CO_2}$$

$$V_{CO_2}^r = 5,534 \cdot 0,1 \cdot 0,0789 + 5,534 \cdot 0,0789 = 0,442 \frac{m^3}{kg} \quad (4.9.1-4)$$

$$x_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}^r}{V_{SVr}} = \frac{3,608E - 5}{5,534} = 6,51 E - 6 \quad (4.9.1-5)$$

$$V_{SO_2}^r = V_{SV} \cdot r \cdot x_{SO_2} + V_{SV} \cdot x_{SO_2}$$

$$V_{SO_2}^r = 5,534 \cdot 0,1 \cdot 6,51E - 6 + 5,534 \cdot 6,51E - 6 = 3,608E - 5 \frac{m^3}{kg} \quad (4.9.1-6)$$

$$x_{N_2} = \frac{V_{N_2}^r}{V_{SVr}} = \frac{1,173}{5,534} = 0,309 \quad (4.9.1-7)$$

$$V_{N_2}^r = V_{SV} \cdot r \cdot x_{N_2} + V_{SV} \cdot x_{N_2} \quad (4.9.1-8)$$

EÚ FSI VUT v Brně

$$V_{N_2}^r = 5,534 \cdot 0,1 \cdot 0,309 + 5,534 \cdot 0,309 = 1,713 \frac{m^3}{kg}$$

$$x_{Ar} = \frac{V_{Ar}^r}{V_{SVr}} = \frac{0,0202}{5,534} = 0,0036 \quad (4.9.1-9)$$

$$V_{Ar}^r = V_{SV} \cdot r \cdot x_{Ar} + V_{SV} \cdot x_{Ar}$$

$$V_{Ar}^r = 5,534 \cdot 0,1 \cdot 0,0036 + 5,534 \cdot 0,0036 = 0,0202 \frac{m^3}{kg} \quad (4.9.1-10)$$

$$x_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}^r}{V_{SVr}} = \frac{1,130}{5,534} = 0,204 \quad (4.9.1-11)$$

$$V_{H_2O}^r = V_{SV} \cdot r \cdot x_{H_2O} + V_{SV} \cdot x_{H_2O}$$

$$V_{H_2O}^r = 5,534 \cdot 0,1 \cdot 0,204 + 5,534 \cdot 0,204 = 1,130 \frac{m^3}{kg} \quad (4.9.1-12)$$

- Podíl vzduchu v recirkulovaných spalínách [19]

$$x_{VV} = \frac{V_{VV}^r}{V_{SVr}} = \frac{4,345}{5,534} = 0,402 \quad (4.9.1-13)$$

$$V_{VV}^r = V_{SV} \cdot r \cdot x_{VV} + V_{SV} \cdot x_{VV}$$

$$V_{VV}^r = 5,534 \cdot 0,1 \cdot 0,402 + 5,534 \cdot 0,402 = 2,229 \frac{m^3}{kg} \quad (4.9.1-14)$$

- Entalpie spalín ve spalovacím prostoru např. pro teplotu 500°C

$$i_{SV500}^r = \sum x_i \cdot i_i \quad (4.9.1-15)$$

$$x_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + x_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + x_{N_2} \cdot i_{N_2} + x_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + x_{Ar} \cdot i_{Ar} + x_{VV} \cdot i_{VV}$$

$$i_{SV500}^r = 0,0798 \cdot 994 + 3,608E-5 \cdot 1070 + 0,309 \cdot 664 + 0,0036 \cdot 465 + 0,204 \cdot 795 + 0,402 \cdot 1,359 = 722,60 \frac{kJ}{m^3}$$

Pozn.: Kvůli sestavení I-t diagramu spalín se zahrnutou recirkulací spalín je nutné sestavit tabulku entalpie spalín v závislosti na teplotě. K tomuto výpočtu nám poslouží program Excel, který provede cyklický výpočet v rozsahu teplot 100-1600°C a příslušných entalpií složek spalín v závislosti na teplotě dle rovnice (3.9.1-15).

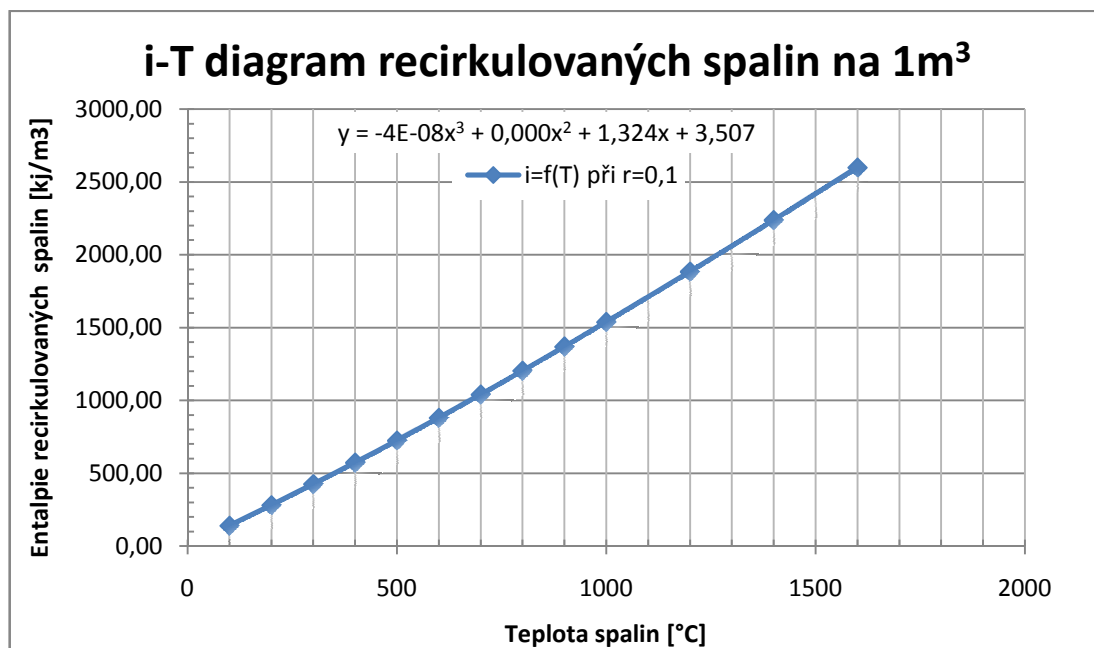
4.9.2 i-T diagram spalin s recirkulací

Na základě rovnice 4.9.1-15 a závislosti entalpie složek spalin na teplotě (viz tab. 11), byl proveden cyklický výpočet celkové teploty spalin s recirkulací $r=0,1$. Recirkulované spaliny byly v tomto případě odebírány z tahu kotle o navolené teplotě 200°C , což by bylo možné využít k samotnému vysoušení paliva a snížení NO_x .

Pozn.: důležité parametry výpočtu: $\alpha=2$; $f=1,016$; $W^T=50\%$; $T_{VV}=20^{\circ}\text{C}$, $r=0,1$; $T_{sv}^{\text{od}}=200^{\circ}\text{C}$

t	r=0,1
[$^{\circ}\text{C}$]	[kJ/m^3]
100	137,68
200	278,51
300	422,59
400	570,32
500	722,60
600	877,92
700	1037,89
800	1200,86
900	1367,19
1000	1536,32
1200	1882,18
1400	2236,07
1600	2597,60

Tab. 17 Závislost entalpie recirkulovaných spalin na teplotě.



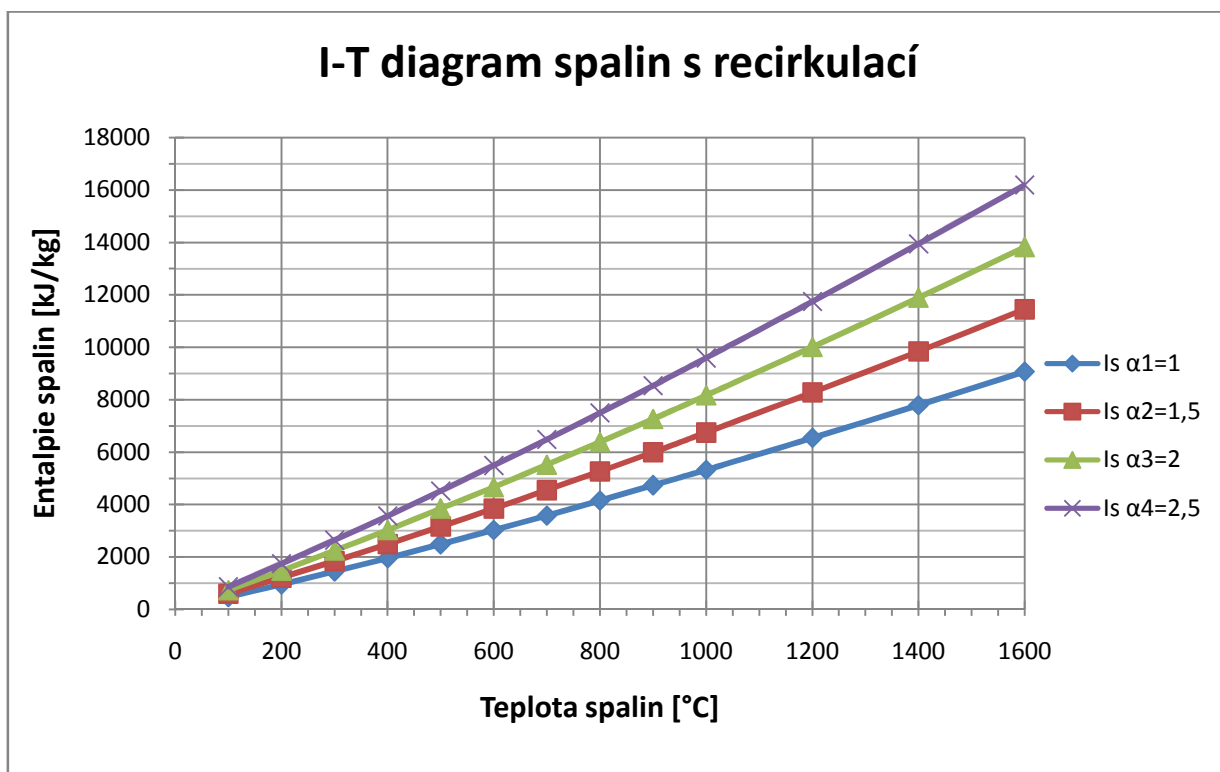
Obr. 14 Graf závislosti entalpie recirkulovaných spalin na teplotě.

EÚ FSI VUT v Brně

Vypočtené hodnoty entalpie spalin v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tabulce 17. Hodnoty entalpie jsou vypočítány v programu Excel pro hodnoty rozdílného přebytku vzduchu $\alpha=1-2,5$ po kroku 0,5. Následně z těchto vypočtených hodnot je sestaven I-T diagram spalin s recirkulací v obr. 14.

T	I_{smin}	I_{vmin}	I_s	I_s	I_s	I_s
[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	$\alpha_1=1$	$\alpha_2=1,5$	$\alpha_3=2$	$\alpha_4=2,5$
100	469	262	469	600	731	862
200	952	528	952	1215	1479	1743
300	1447	798	1447	1846	2245	2644
400	1957	1073	1957	2494	3030	3567
500	2485	1355	2485	3162	3840	4517
600	3024	1642	3024	3845	4666	5487
700	3580	1936	3580	4548	5516	6485
800	4150	2234	4150	5267	6383	7500
900	4730	2538	4730	5999	7268	8537
1000	5324	2844	5324	6746	8168	9590
1200	6541	3468	6541	8275	10009	11743
1400	7792	4101	7792	9842	11893	13944
1600	9073	4745	9073	11446	13818	16191

Tab. 18 Tabulka pro I-T diagram spalin s recirkulací



Obr. 15 Graf I-T diagram spalin s recirkulací

5 OVĚŘENÍ TEPLOT V OHNIŠTI

Kapitola s názvem ověření teplot v ohništi se zabývá zjištěním a popisem reálného provozního stavu spalovací komory ZKG 110. Ověření teplot v ohništi slouží k porovnání výpočtového stavu s experimentálním provozem zařízení Gemos CZ, ZKG 110 uskutečněném v prostorách NETME Centre v areálu Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2.

5.1 Měřicí zařízení a analýza spalín

Pro záznam dat z provozu spalovací komory a celého zařízení je použit systém LabVIEW 2012 současně s množstvím čidel a měřících sond, termočlánků průtokoměrů a servomotorů. Ke zpětné kontrole poskytuje systém LabVIEW možnost zálohy dat ze všech umístěných čidel a periférií v reálném čase až do konce chtěného záznamu.

Ke stanovení množství emisí je použit analyzátor spalín od společnosti Siemens a to verze ULTRAMAT 22 a ULTRAMAT 21. Doplňkovým měřícím přístrojem byl zařazen přístroj InfraLyt 5000.

Měřicí rozsahy přístrojů ULTRAMAT 22 a 21 a Infalyt 5000

- **ULTRAMAT 21**- Analyzátor plynů O_2 a CO
 O_2 : 0-2500 ppm
CO: 0-5000 ppm
- **ULTRAMAT 22** - Analyzátor plynů NO_x a S
 NO_x : 0-1500mg/m³
S : 0-5000 mg/m³
- **InfraLyt 5000** - analyzátor plynů CO, CO₂, O₂
CO : 0-20 %
CO₂ : 0-20%
O₂ : 0-20 %

Pro měření spalín byla použita vytápěná odběrová hadice a připojena na analyzátory spalín, přičemž oba mají funkci autokalibrace. Pro správnou funkci je také důležité, aby spaliny nebyly kontaminovány pevnými částicemi, které by mohly znesnadnit přístrojům správné měření. Zamezení průniku pevných částic zajišťuje série filtrů za sebou. Odběrné místo spalín je umístěno v kouřovodu v oblasti, kde teplota spalín dosahuje přibližně 200°C. Odtah spalín z kouřovodu je zajištěn spalínovým ventilátorem.



Obr. 16 Analyzátor spalín Siemens ULTRAMAT 21 a 22

EÚ FSI VUT v Brně



Obr. 17 Analyzátor spalin Infralyt 5000

Analýza spalin a jejich složek nám udává zpětnou vazbu na podmínky spalování uvnitř komory. Jedná se o analýzu jednotlivých složek. Díky analyzátorům spalin můžeme pak vykreslit závislosti jednotlivých složek spalin na teplotě, času a na parametrech, které jsou potřeba.

Díky vyhodnoceným datům z měření spalin lze následně určit, v jaké emisní třídě pracuje zařízení Gemos CZ ZKG pro jednotlivá zkušební paliva a zda vyhovují dnešním podmínkám a emisním normám dle ČSN EN 303-5.

5.1.1 Mezní hodnoty emisí dle normy ČSN EN 303-5

V níže uvedené tabulce je znázorněn výstřižek z normy ČSN EN 303-5, který popisuje mezní hodnoty produkce emisí pro jednotlivá spalovací zařízení dle výkonu, dodávky paliva a typu paliva. Norma zde uvádí maximální přípustné hodnoty hlavně oxidu uhelnatého, který spadá do tří emisních tříd dle jeho koncentrace. Posuzovanou jednotkou je zde mg/m^3 , který značí hmotnost oxidu uhelnatého v 1 m^3 vzduchu při referenční hodnotě kyslíku (10%).

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10% O ₂ ^a								
		kW	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
		3	4	5	3	4	5	3 ^b	4	5	
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosilní paliva	≤ 50	5 000			150			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			125		
samočinná	biopaliva	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosilní paliva	≤ 50	3 000			100			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			125		

Obr. 18 Výňatek z normy ČSN-EN 303-5 o mezních hodnotách emisí [22]

EÚ FSI VUT v Brně

V přílohách jsou doloženy záznamy z měření pro jednotlivé režimy přehřevu vzduchu paliva o dvou různých vlhkostech a to 35% a 55,8%. Snímané hodnoty měřicím zařízením, viz kap 5.1, byly zaznamenávány v procentech, proto bylo nutné převést všechna data na porovnávací veličinu mg/m^3 .

Pro přepočet z procentuálního zastoupení na mg/m^3 bylo nutné využít vztahy, které předepisuje norma ČSN EN 303-5. [22]

$$CO_{avg} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = CO_{avg}(\%) \cdot d_{CO} \cdot 10\,000 \quad (5.5.1-1)$$

Kde d_{CO} je hustota oxidu uhelnatého při srovnávacích podmínkách, $d_{CO} = 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Hodnota CO se přepočítá na referenční hodnotu kyslíku dle vztahu, viz [22] :

$$CO = CO_{avg} \cdot \frac{21-10}{21-O_{avg}} (\%) \quad (5.5.1-2)$$

5.2 Podmínky měření

K zahájení samotné zkoušky a získávání dat z měření bylo nutné zabezpečit pomalé nahřívání celého spalovacího zařízení a prohřátí na provozní teploty a správnou funkci celé chladicí soustavy, aby bylo možné vzniklý tepelný výkon uchladit.

Měření bylo spouštěno po ustálení všech hodnot v hodinových intervalech s různým nastavením primárního, sekundárního a terciárního vzduchu vzhledem k jeho teplotě. Tímto způsobem byla snaha vytěžit ze spalovacího procesu co možná nejlepší podmínky při zachování tepelného výkonu vzhledem k dodržení emisních limitů, které stanovuje norma ČSN EN 303-5 [22].

5.2.1 Použité palivo

Spalovací komora ZKG 110 byla podrobena zkoušce spalování dvou rozdílných paliv a to z hlediska vlhkosti. Ke spalování bylo použito palivo o stejné energetické výhřevnosti ve formě dřevní biomasy-pilin. Pro kontinuální měření bylo použito palivo o těchto parametrech:

- Dřevní biomasa o vlhkosti 35%, Výhřevnost: 11041 kJ/kg
- Dřevní biomasa o vlhkosti 55,8%, Výhřevnost: 6723 kJ/kg



Obr. 19 Ukázka použitého paliva pro spalovací komoru ZKG.

5.2.2 Podávací zkouška paliva

Jelikož spalovací systém Gemos CZ ZKG a KWH je opatřen zásobníkem paliva přičemž přivádějícím zařízením paliva do kotle je šnekový podavač, byla pro kontrolu průtoku paliva provedena podávací zkouška paliva. Zkouška spočívala v nastavení rozdílných frekvencí šnekového podavače po stejný časový interval zkoušené biomasy ve formě pilin o vlhkosti 55,8%. Po každém časovém intervalu a nastavení frekvence bylo zváženo palivo, které šnekový podavač dodal do odměrné nádoby. Časový interval pro zkoušku byl nastaven na 2minuty a výsledné hodnoty zkoušky jsou zobrazeny v následující tabulce.

Dávkování paliva					
Hz	kg/2 min	kg/2min	kg/2min	průměr	kg/hod
0	0	0	0	0	0
8,5	1,6	1,66	1,66	1,64	49,2
9,5	1,86	1,84	1,78	1,83	54,8
10,5	1,96	2,14	2,16	2,09	62,6

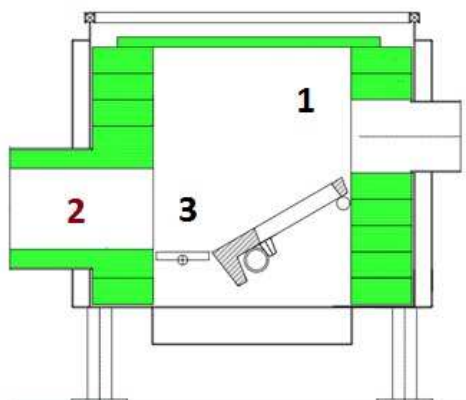
Tab. 19 Dávkování paliva

Hmotnostní průtok paliva byl nastaven šnekovým podavačem na 8,5 Hz, výjimečně na 9 Hz. Při zvyšování hmotnostního průtoku paliva by mohlo dojít k zahlcování spalovací komory a tak nedostatečnému prohořívání paliva, což by se negativně promítlo do výsledků experimentálního měření.

5.3 Měření teplot pro biomasu o $W^r=35\%$

Pro měření dřevní biomasy o vlhkosti 35% byly celkem použity 3 spalovací režimy, které obsahovaly změny teplot spalovacího vzduchu. Tato změna byla použita za účelem co nejvíce přispět k maximálnímu výkonu a co nejvyšší účinnosti při spalování. K tomuto bodu jsem se snažil docílit za pomoci nastavení spalovacího vzduchu o hodnotě okolí vzduchu, vzduchu o hodnotě 100°C a 200°C.

Ovládací software LabVIEW 2012 starající se o regulaci a řízení poskytuje desetisekundové zálohy dat každého z měřících čidel a tak dává zpětnou vazbu pro možné závislosti. Z těchto dat jsem sestavil tabulku průměrných hodnot při třech provozních režimech spalování dřevních pilin o vlhkosti 35%. Každý režim charakterizuje změnu spalovacího vzduchu, viz tabulka 20.



Obr. 20 rozložení snímačů teplot spalín[16]

ZKG - Dřevní biomasa $W^r=35\%$				
Měření		1. režim	2. režim	3. režim
cíl	[°C]	25°C	100°C	200°C
I. Vzduch	[°C]	23,7	99,0	199,5
II. Vzduch	[°C]	24,5	102,3	198,8
III. Vzduch	[°C]	24,9	27,5	32,4
Množství I. Vzduchu	[kg/h]	240,0	238,0	237,5
Množství II. vzduchu	[kg/h]	82,8	81,1	84,5
Množství III. vzduchu	[kg/h]	94,8	92,7	91,6
1. teplota v komoře	[°C]	808,5	850,3	913,0
2. teplota v hrdle	[°C]	887,5	929,8	959,4
3. teplota v komoře	[°C]	838,2	904,3	964,6
Teplota výstupní vody	[°C]	71,4	72,7	70,2
Teplota vratky	[°C]	62,8	63,5	61,2
Teplota spalín	[°C]	175,3	178,1	178,8
Vstupní teplota paliva	[°C]	21,4	22,3	24,2
Výkon	[kW]	93,6	99,0	97,2

Tab. 20 Provozní stav komory ZKG pro 35% vlhkost paliva

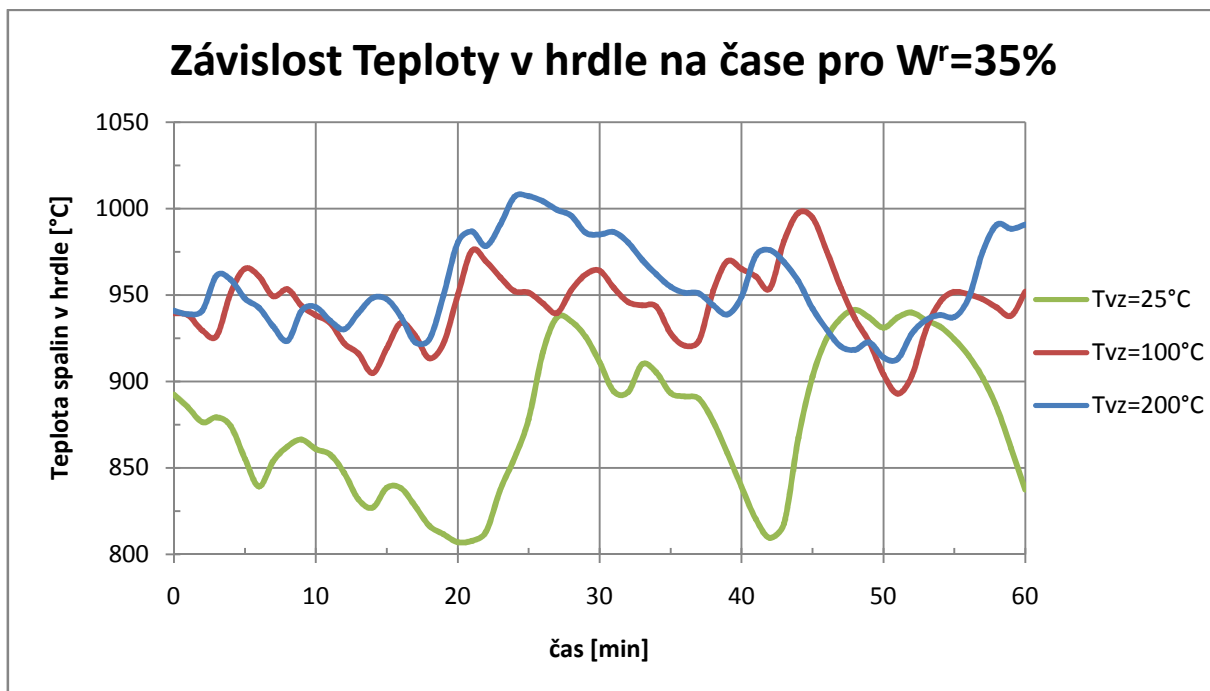
V tabulce 20. Nalezneme průměrné provozní hodnoty důležitých parametrů spalovací komory ZKG, které vychází z měření pro dřevní biomasu o vlhkosti 35%.

Mezi provozními režimy 1-3 bylo nutné vyčkat pro ustálení všech parametrů, jelikož

EÚ FSI VUT v Brně

změna mezi provozními režimy měla určitou setrvačnost a nebylo možné začít zaznamenávat data ihned po regulaci některé z veličin ovlivňující spalovací proces.

Důležitou poznámkou je změna teploty nasávaného vzduchu, která se týkala pouze primárního a sekundárního vzduchu. Tato změna vyvolala zvýšení teplot v ohništi, což se projevilo také na zvýšení výkonu.

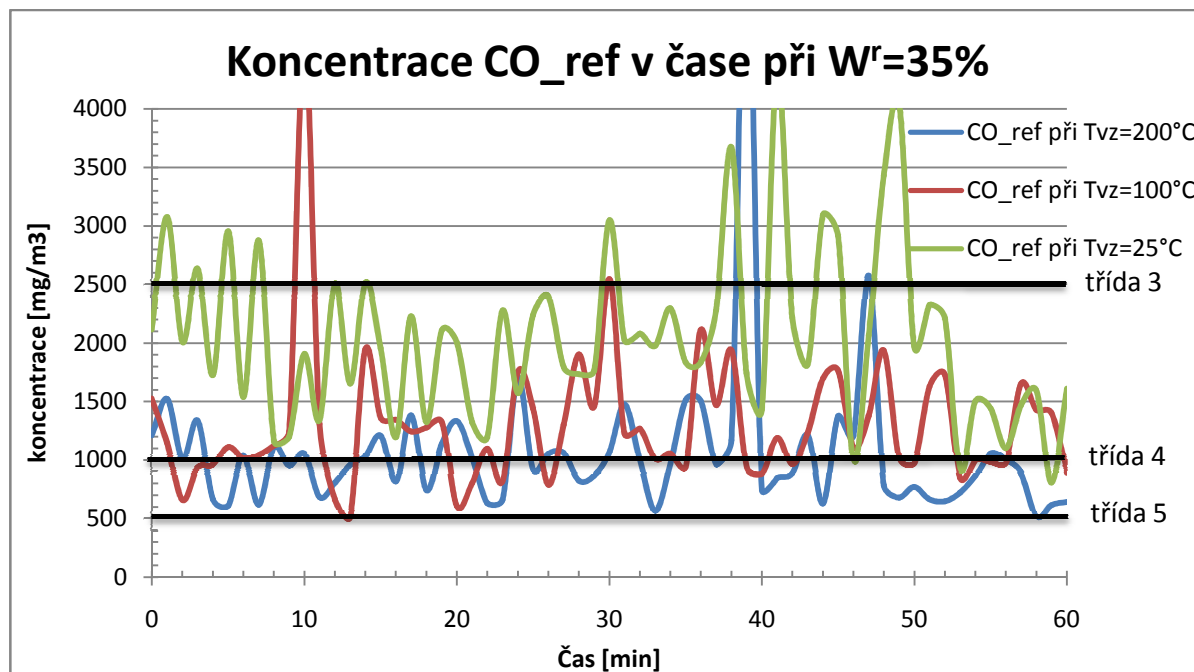


Obr. 21 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=35\%$

5.4 Měření spalin pro biomasu o $W^r= 35\%$

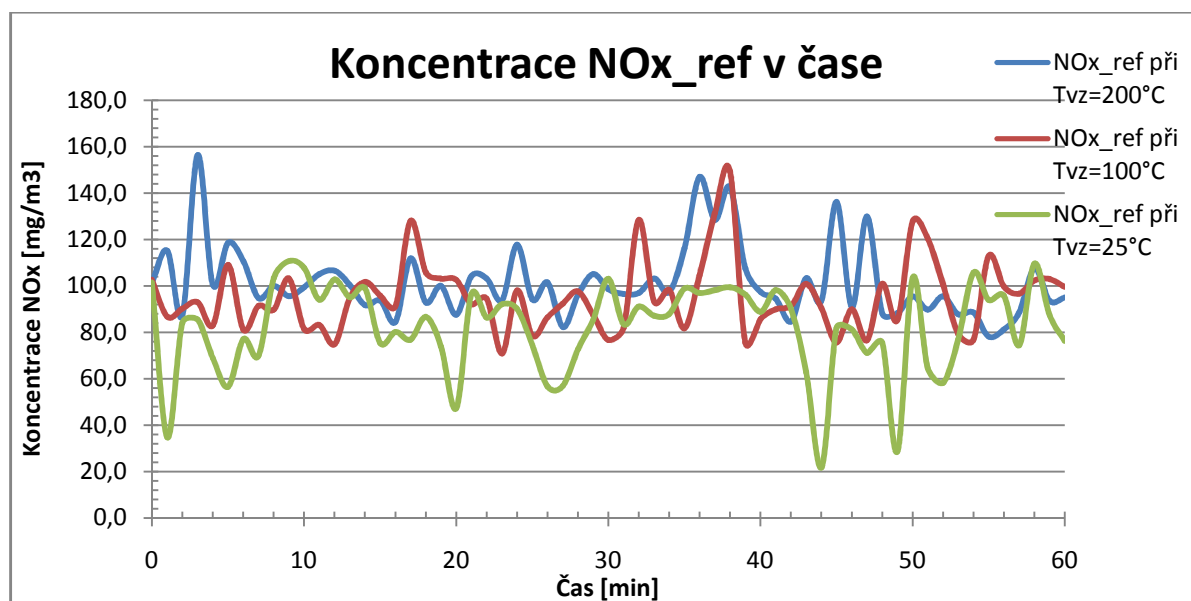
Na základě měření emisí pro jednotlivé režimy ohřevu vzduchu pro biomasu o vlhkosti 35%, jsem sestavil v programu Excel závislosti koncentrace oxidu uhelnatého, při referenčním kyslíku, na čase měření. V grafu jsou uvedeny průběhy všech tří režimů ohřevu vzduchu, aby byly porovnatelné hodnoty mezi sebou.

Pro lepší orientaci jsem zanesl do grafu také mezní hodnoty emisí CO, které stanovuje norma ČSN EN 303-5, podle nichž se vyhodnocuje emisní třída.

Obr. 22 Graf závislosti koncentrace CO v čase pro palivo o $W^r=35\%$

Z grafu lze konstatovat, že pro všechny režimy regulace teploty vzduchu vyhovují emisní třídě 3. Vyobrazené vrcholy pravděpodobně pochází z efektu utržení vrstvy paliva na šikmém roštu a následného padnutí do prostoru výsyvky. To má za následek zavírání a úlet částic do prostoru výměňkové části a společně se spaliny odchod kouřovodem, kde tyto anomálie zachytila otáčená sonda na měření emisí.

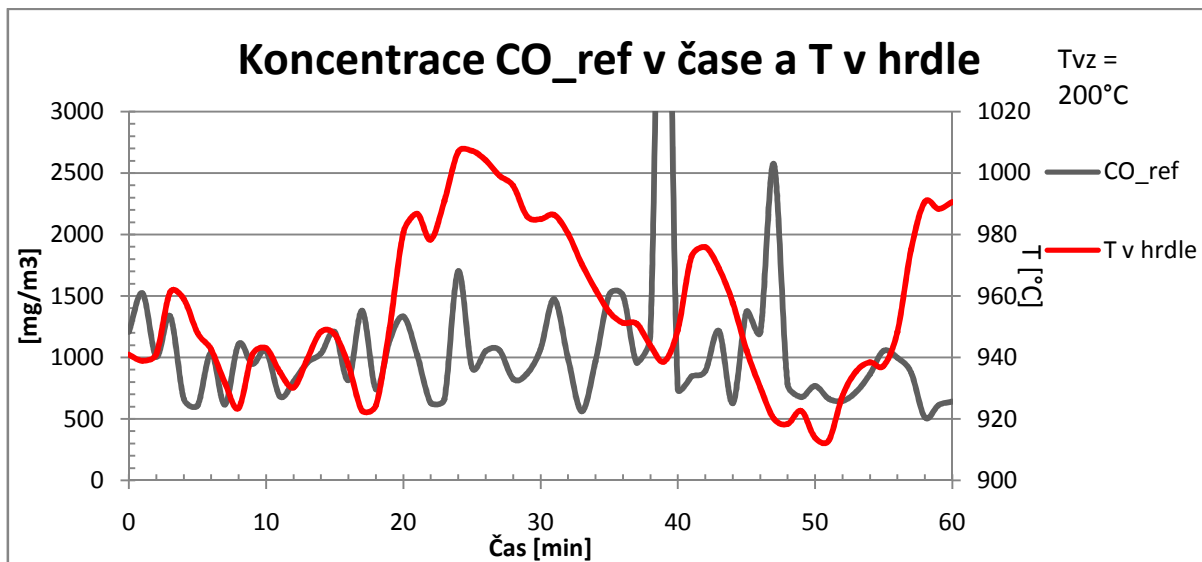
V případě, že bychom chtěli posoudit spalování vzhledem k přísnější třídě emisí, jediná vhodná konfigurace se jeví pouze při nastavení režimu předehřevu vzduchu na 200°C pro palivo o vlhkosti 35%. Tento režim spalování se svou průměrnou hodnotou velmi těsně přibližuje emisní třídě 4.

Obr. 23 Graf závislosti koncentrace Nox v čase pro palivo o $W^r=35\%$

EÚ FSI VUT v Brně

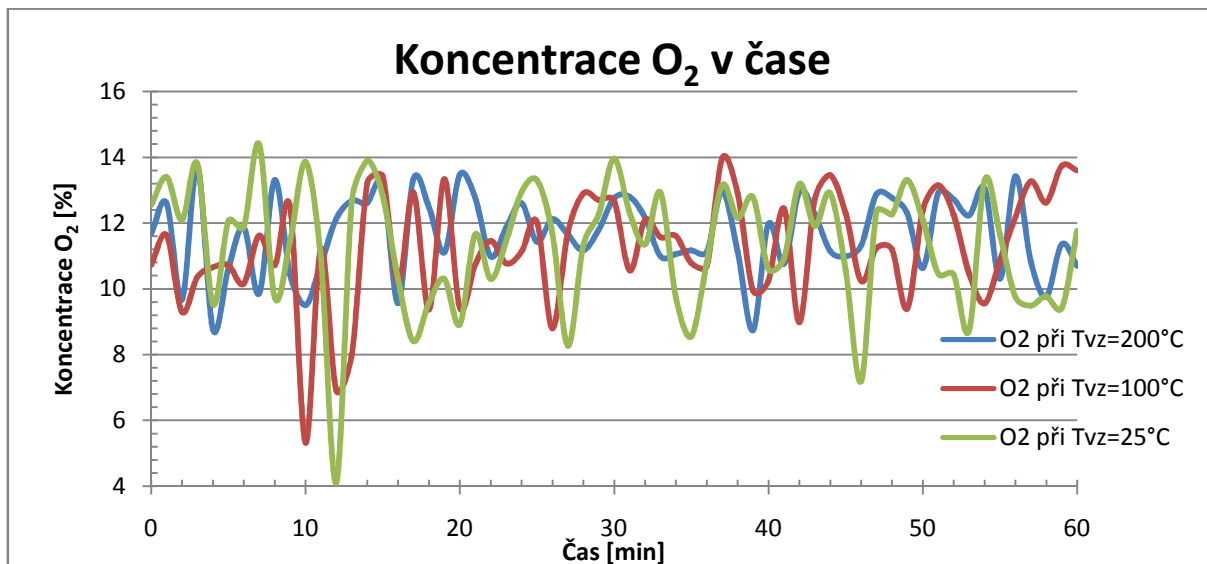
Koncentrace ve všech režimech předehřevu vzduchu se drží pod hranicí 600 mg/m^3 při 11% O_2 , kterou stanovuje vyhláška 415/2012, viz [23].

Na obrázku č 24. Je vyobrazen jeden z režimů nastavení teploty spalovacího vzduchu, který ovlivňuje koncentraci CO v závislosti na čase a teplotě v hrdle komory ZKG. V případě opomenutí vrcholů se koncentrace drží v intervalu $500\text{-}1500 \text{ mg/m}^3$ a teplota v hrdle kolísá v intervalu $900\text{-}1000^\circ\text{C}$.



Obr. 24 Graf závislosti koncentrace CO na čase při $T_{vz} = 200^\circ\text{C}$

Na obr. 25 je znázorněn průběh koncentrace kyslíku při spalování biomasy o vlhkosti 35% při jednotlivých nastavení teploty spalovacího vzduchu.



Obr. 25 Graf závislosti koncentrace O₂ v čase pro palivo o $W=35\%$

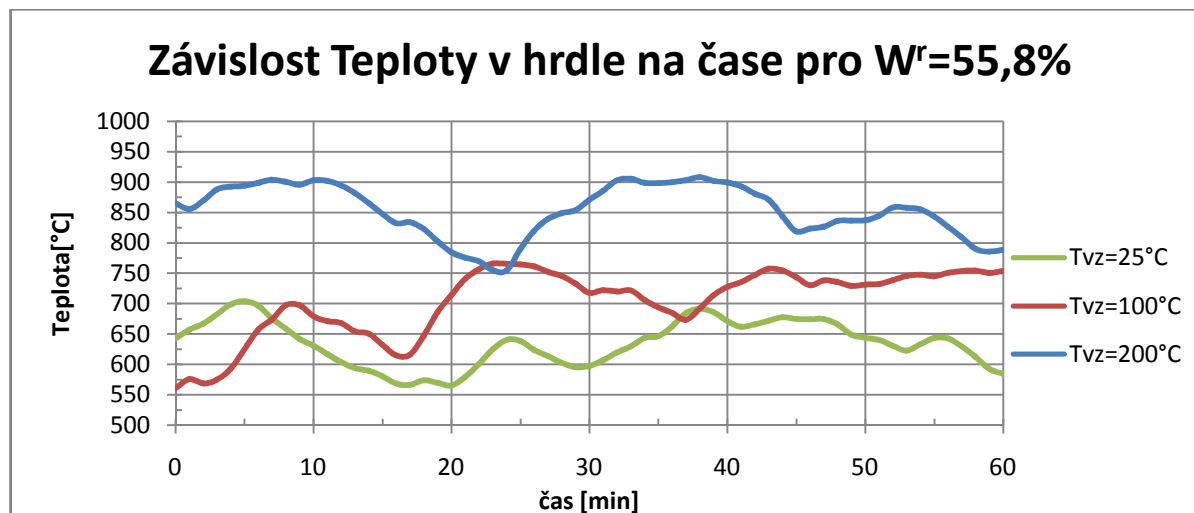
5.5 Měření teplot pro biomasu o $W^r=55,8\%$

Měření pro biomasu o vlhkosti 55,8% vycházelo z použití 3 spalovacích režimů, které obsahovaly změnu teploty spalovacího vzduchu s myšlenkou vysoušet palivo pod roštem a příznivě ovlivnit spalovací podmínky v komoře s ohledem na množství vody, které obsahuje spalované palivo. Palivo použité pro měření byla dřevní biomasa ve formě pilin o relativní vlhkosti 55,8% a výhřevnosti 6723 kJ/kg.

Měření bylo provedeno ve třech režimech, ovládací systém LabVIEW 2012 zaznamenával data. Z těchto dat byla sestavena tabulka průměrných hodnot, které byly zpracovány následně v programu Excel. Průměrné hodnoty byly vyhodnoceny pro všechny 3 režimy spalování.

ZKG - Dřevní biomasa $W^r=55,8\%$				
Měření		1. režim	2. režim	3. režim
cíl	[°C]	25°C	100°C	200°C
I. Vzduch	[°C]	23,4	104,7	203,6
II. Vzduch	[°C]	23,9	101,5	205,3
III. Vzduch	[°C]	24,8	104,7	204,4
Množství I. Vzduchu	[kg/h]	246,7	237,1	232,8
Množství II. vzduchu	[kg/h]	66,5	63,5	61,2
Množství III. vzduchu	[kg/h]	52,6	76,0	82,8
1. teplota v komoře	[°C]	462,5	567,8	644,0
2. teplota v hrdle	[°C]	597,2	784,3	857,6
3. teplota v komoře	[°C]	589,1	670,4	726,8
Teplota výstupní vody	[°C]	63,9	75,8	77,5
Teplota vratky	[°C]	58,0	67,1	68,6
Teplota spalin	[°C]	146,1	217,5	223,1
Vstupní teplota paliva	[°C]	20,9	22,3	24,8
Výkon	[kW]	50,0	86,7	94,1

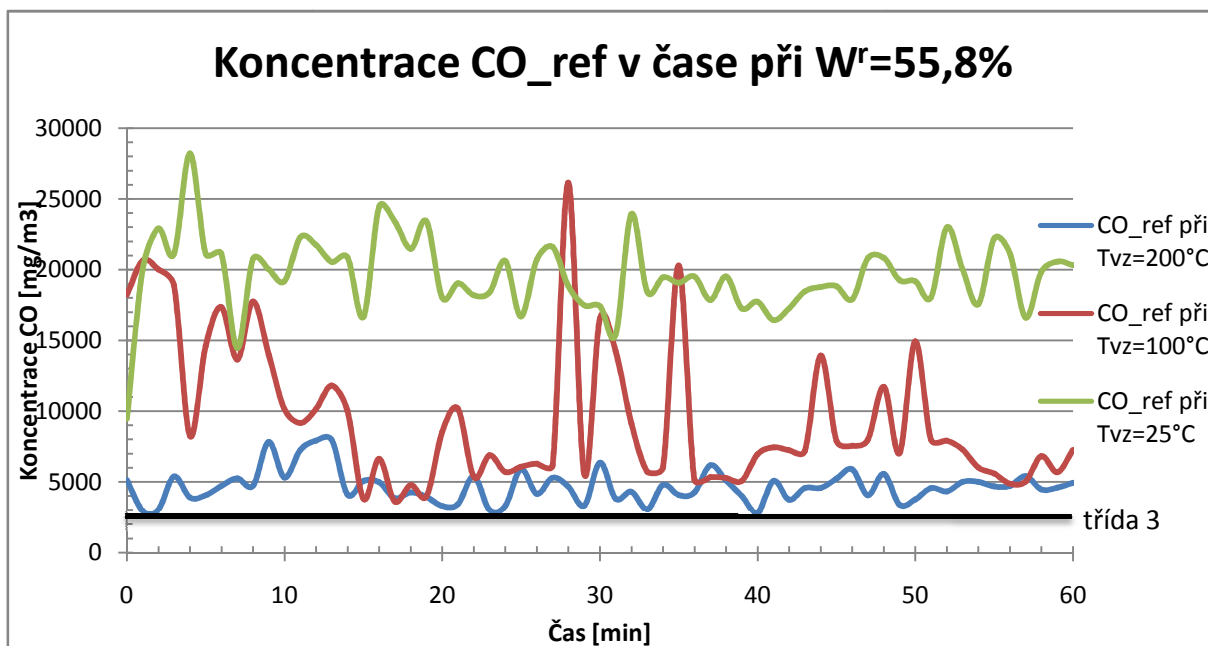
Tab. 21 Provozní stav komory ZKG při změně nasávaného vzduchu pro 55,8%



Obr. 26 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=55,8\%$

5.6 Měření spalin pro biomasu o $W^r = 55,8\%$

Obdobný postup jako u kapitoly 5.5.2 jsem aplikoval na použité palivo o vlhkosti 55,8%, kde jsem znovu pomocí programu Excel sestavil závislosti tří režimů spalování paliva s předehřevem vzduchu. Do těchto závislostí jsem znovu zanesl mezní hodnotu emisní třídy č. 3. Další emisní třídy č. 4 a 5 v tomto grafu nejsou znázorněny, protože výsledná data v grafu neumožňují zvýraznění přísnějších emisních limitů.

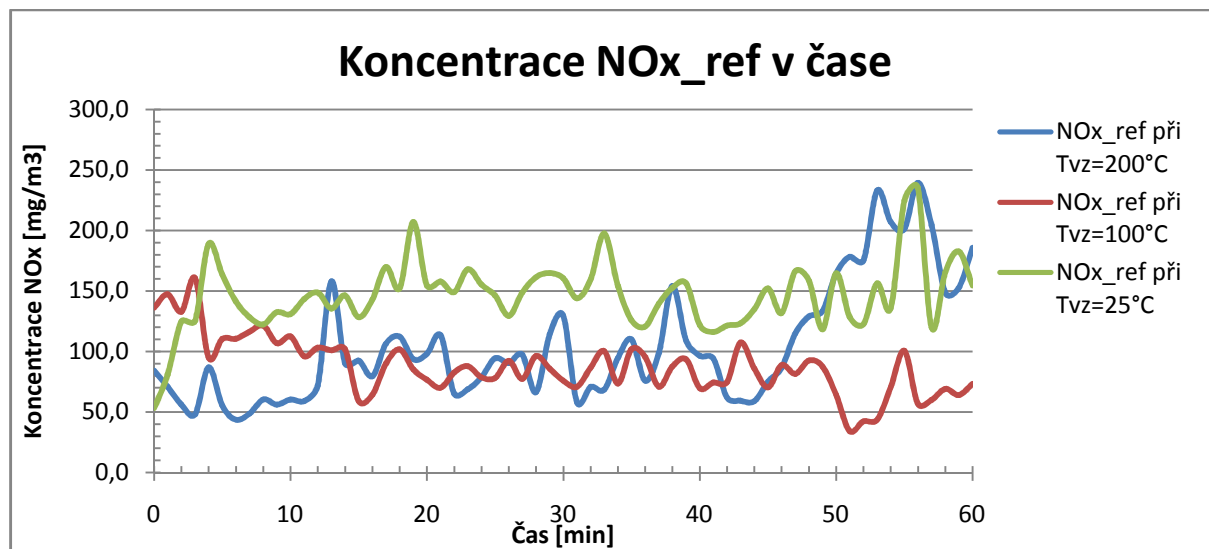


Obr. 27 Graf závislosti koncentrace CO v čase pro palivo o $W^r=55,8\%$

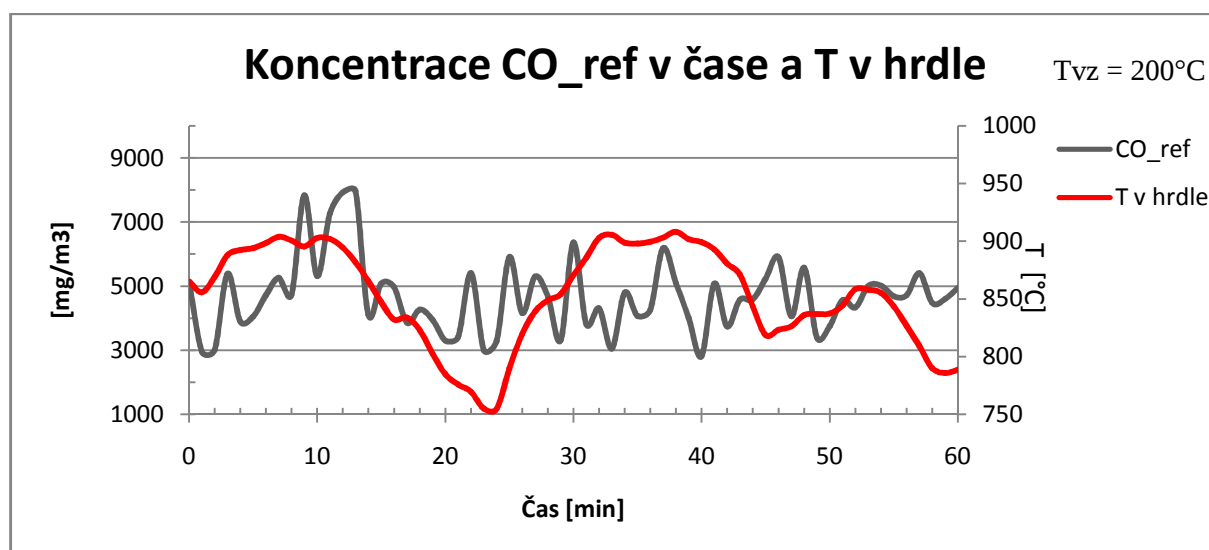
Z grafu lze konstatovat, že všechny 3 režimy regulace teploty nasávaného vzduchu nedosahují takových parametrů vzhledem k emisním normám, aby splňovaly dnešní požadavky na spalovací zařízení dle normy ČSN EN 303-5. Nejpříznivější hranicí je zde emisní třída 3 pro nejvyšší možné technické ohřátí spalovacího vzduchu. Ostatní nastavení spalovacího vzduchu jsou nežádoucí pro spalovací komoru ZKG s použitým palivem o vlhkosti 55,8%.

V obrázku 27. je znázorněn průběh koncentrace oxidu uhelnatého (mg/m^3) v čase pro jednotlivé režimy regulace spalovacího vzduchu. Na základě tohoto průběhu lze říci, že u použitého spalovacího vzduchu o teplotě 25°C a 100°C je koncentrace mimo použitelné hodnoty pro reálný provoz zařízení. Pro nastavení vzduchu o hodnotě 200°C můžeme říci, že se průběh blíží k emisní třídě 3, ale přesto je velmi vzdálen svou průměrnou hodnotou na skoro dvojnásobek limitu emisní třídy 3.

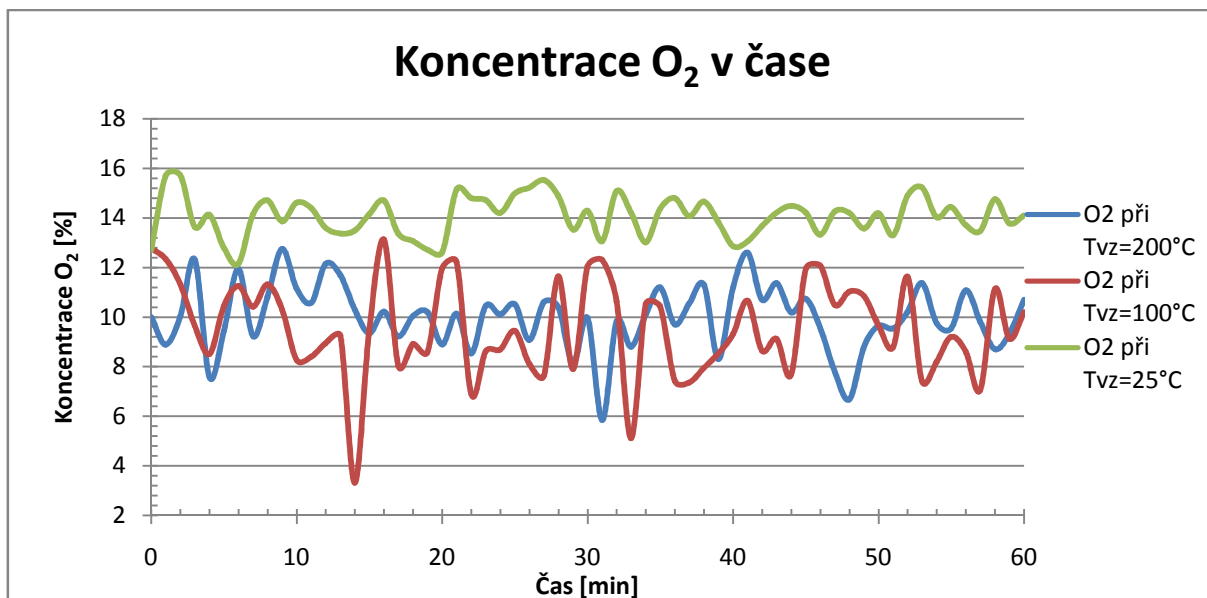
Na základě těchto naměřených dat je možné říci, že ve spalovací komoře ZKG společnosti Gemos CZ při současné konstrukci a nastavení **nelze spalovat** biomasu ve formě pilin o vlhkosti 55,8% a výše.

Obr. 28 Graf závislosti koncentrace NO_x na čase pro palivo o $W=55,8\%$

Na obr. 28 je znázorněna koncentrace NO_x při režimech nastavení teploty nasávaného vzduchu. Koncentrace nepřesahuje maximální limit 600 mg/m³ při 11% O₂, kterou stanovuje vyhláška 415/2012, viz [23].

Obr. 29 Graf závislosti koncentrace CO na čase při $T_{vz} = 200^{\circ}\text{C}$

Pro představu jsem vybral ze tří režimů nastavení spalovacího vzduchu tento graf závislosti koncentrace CO na čase, který reprezentuje teplotu spalovacího vzduchu 200°C. Je zde vidět nestabilní průběh teploty v intervalu 800–950°C. Tento trend je patrný i z pohledu na koncentraci CO v intervalu 3000–7000 mg/m³.



Obr. 30 Graf závislosti koncentrace O₂ na čase pro palivo o $W^r=55,8\%$

Na obr. 30 je znázorněn graf závislosti koncentrace O₂ na čase pro jednotlivé režimy spalování, kde při nastavení spalovacího vzduchu na teplotu okolního prostředí je vidět výraznější přebytek vzduchu a s rostoucí teplotou spalovacího vzduchu se tato hodnota ustálila v oscilačním intervalu 10-12% O₂

6 VYHODNOCENÍ

Díky poznatkům z měření emisí v předchozí kapitole a to pro dvě paliva s různou vlhkostí vyplývá několik závěrů.

Na základě numerického výpočtu pomocí programu Excel byl proveden výpočet teploty nechlazeného plamene, který reprezentuje teplotu v hrdle spalovací komory ZKG. Tento výpočet byl proveden pro palivo o vlhkosti 55,8 % a výhřevnosti Q_i^f : 6723 kJ/kg a pro palivo o vlhkosti 35% a výhřevnosti Q_i^f : 11041 kJ/kg, včetně regulace teploty nasávaného vzduchu. Kvůli porovnání byla sestavena tabulka průměrných teplot v hrdle z měření zkušebních paliv z kapitoly 5. a vypočtených teplot dle programu Excel.

	$W^f=35\%$		$W^f=55,8\%$	
	výpočet	měření	výpočet	měření
Tvz	Tnp	T v hrdle	Tnp	T v hrdle
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
25	860	888	717	597
100	912	930	765	784
200	978	959	831	858

Tab. 22 Srovnání naměřených teplot s výpočtovými

Z hlediska porovnání výpočtových a naměřených teplot nechlazeného plamene se v případě použití paliva o 35% vlhkosti teploty více méně shodují. V dalším případě, při použití paliva o vlhkosti 55,8%, je odchylka větší, což se podepisuje na větším množství vzniku emisí, nekonstantním výkonu, který se s teplotou přehřívání vzduchu zvyšuje.

Dalším ukazatelem je emisní norma, kterou by měla spalovací komora vykazovat. V kapitole 5 je detailně popsán problém tvorby oxidu uhelnatého při spalování v komoře ZKG. Výsledkem tohoto zkoumání je nevhodnost použití stávající konfigurace, spalovací teploty a vnitřní konstrukce pro spalování velmi vlhkých paliv.

Z hlediska palin je jednoznačně prokazatelné, že spalování biomasy s obsahem vody více než 35% je ve spalovací komoře nerealizovatelné, neboť toto spalování nesplňuje emisní normu ČSN EN 303-5, přesněji tedy třídu 3, viz obr. 18 v kapitole 5.1.1.

Snaha o zlepšení podmínek spalování pro velmi vlhké palivo vede k přehřevu spalovacího vzduchu. Tímto krokem by se měly ovlivnit i emise. Díky naměřeným datům a vyhodnocení obrázkem 27. v kapitole 5.6 se ukazuje, že i přehřev vzduchu pro spalovací komoru ZKG nepostačuje ke zlepšení podmínek pro spalování velmi vlhkého paliva.

Díky těmto poznatkům je jasné, že při stávajících podmínkách a konstrukci není možné velmi vlhké palivo spalovat v komoře ZKG a to právě z hlediska emisních limitů, které jsou v rozporu s normou ČSN-EN 303-5. Je třeba hledat problém v konstrukci spalovací komory. K řešení tohoto problému může pomoci modelování spalovací komory pomocí metody kontrolních objemů a tak možné stanovení kritických míst, která mohou ovlivnit proces spalování biomasy ve spalovací komoře ZKG.

6.1 Modelování komory ZKG

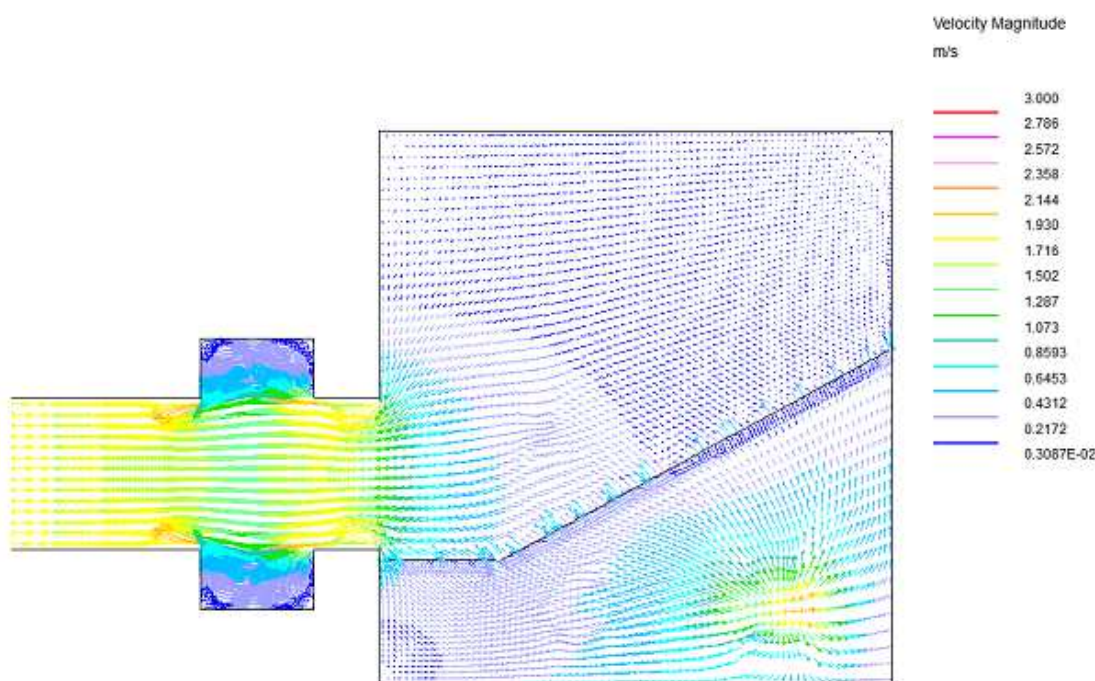
Všechny geometrické údaje o spalovací komoře ZKG společnosti Gemos byly základem pro vytvoření numerické sítě metodou kontrolních objemů ve zprávě Výzkumného Ústavu Organických Syntéz Rybitví. Spalovací komora ZKG byla v této zprávě zkoumána z hlediska proudění rychlosti vzduchu a koncentrace v celé komoře. Modelování bylo zhotoveno na požadavek řešení problému nedokonalého spalování v úzké spolupráci s Energetickým ústavem VUT v Brně. Snahou tohoto zkoumání bylo odhalit případné problémy a navrhnout opatření pro zkvalitnění celého procesu spalování

6.2 Geometrické parametry komory ZKG

Kapitola zahrnuje takové geometrické a provozní charakteristiky, aby bylo možné popsat spalovací komoru co nejpřesněji s ohledem na požadovaný výstup.

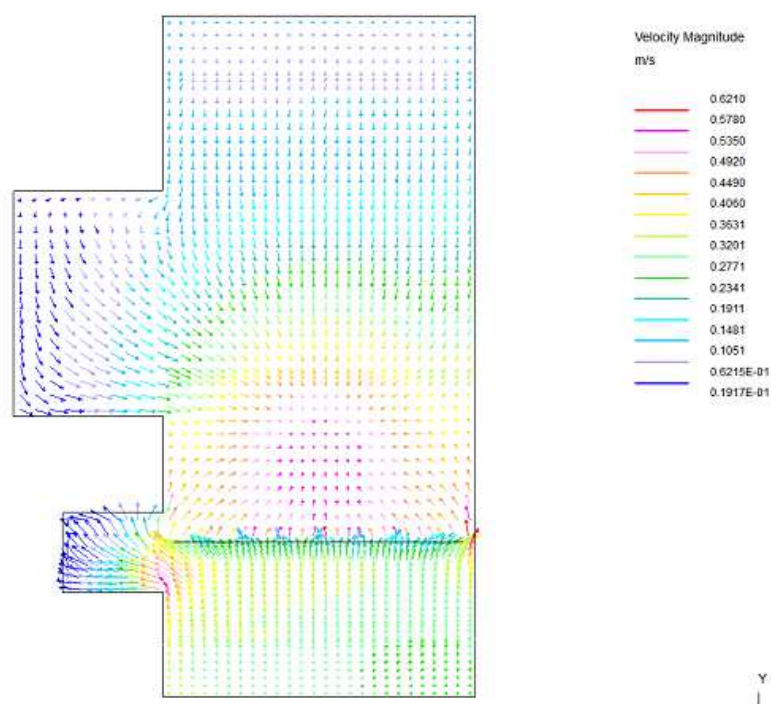
- Štěrby mezi roštěm a čelní a zadní stěnou, 10 mm
- Štěrby mezi roštěm a bočními stěnami, 12 a 3 mm
- Štěrba mezi rošty, 7mm
- Kapsa u ovládacího táhla spodního roštu

Parametry průtoku 1°vzduchu byly zadány o hodnotě 200kg/hod a $T=15^{\circ}\text{C}$ při izotermním řešení a bz obsahu paliva na roštu. [21]



Obr. 31 Rychlostní pole vzduchu pro vertikální řez komorou. [21]

EÚ FSI VUT v Brně



Obr. 32 Rychlostní pole pro příčný řez v polovině dohořívacího roštu včetně kapsy.[21]

Na obr. 31 a 32 je znázorněno rychlostní pole spalovacího vzduchu bez vrstvy paliva na šikmém roštu spalovací komory ZKG. Z těchto modelací je zřejmé, že část vzduchu prochází místy kudy má, tedy roštem a část vzduchu prochází kapsou pro táhlo roštu. Výsledná modelace je znázorněna bez vrstvy paliva, jelikož nebyla známa tlaková diference vrstvy paliva na šikmém roštu.

Kvůli stanovení vlastností modelového paliva bylo nutné experimentálně ověřit ztrátu reálného paliva na roštu. Pro stanovení tlakové ztráty byly použity biomasové piliny o vlhkosti 45%. Tyto údaje byly následně použity pro optimalizaci modelu a simulaci vrstvy paliva na šikmém roštu, aby bylo možné použít model vrstvy paliva do metody kontrolních objemů a tak znázornění proudění vzduchu přes vrstvu paliva na roštu.

		Rychlost vzduchu	0,09	0,11	0,13	0,15
		[m/s]				
Výška vrstvy	[cm]	5	33	43	54	--
		10	115	135	161	--
		15	193	247	277	--
		20	229	283	323	359
		25	279	337	393	445

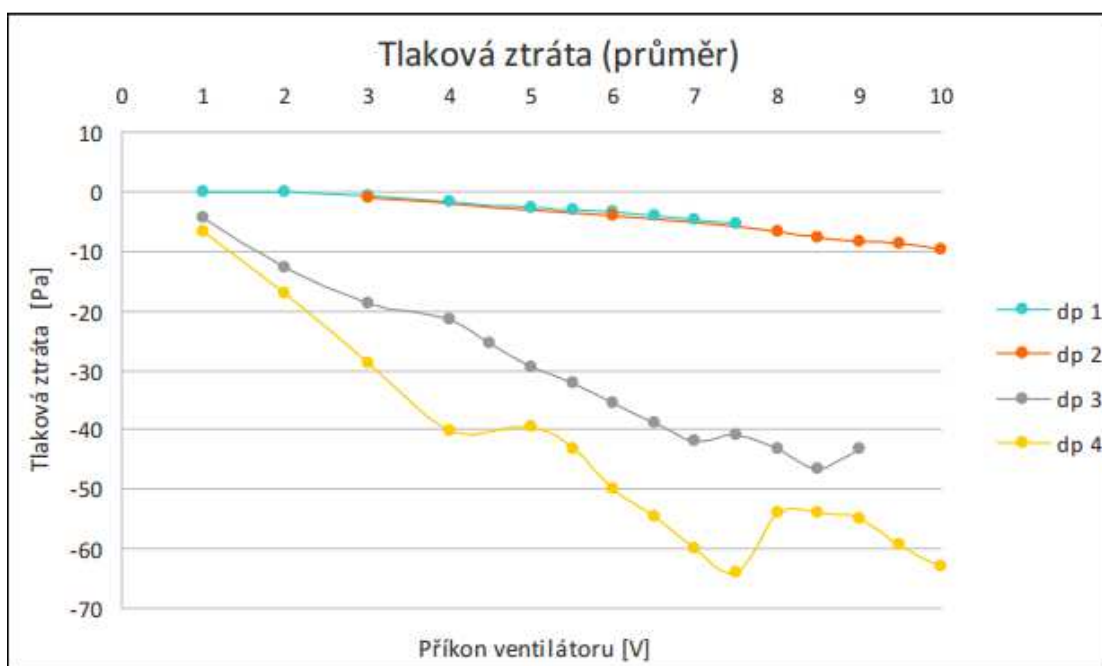
Tab. 23 Tlaková ztráta vrstvy pilin (Pa) [24]

Pozn.: -- znázorňuje nesmyslné hodnoty tlakové ztráty, protože došlo k proražení vrstvy proudícím vzduchem

EÚ FSI VUT v Brně

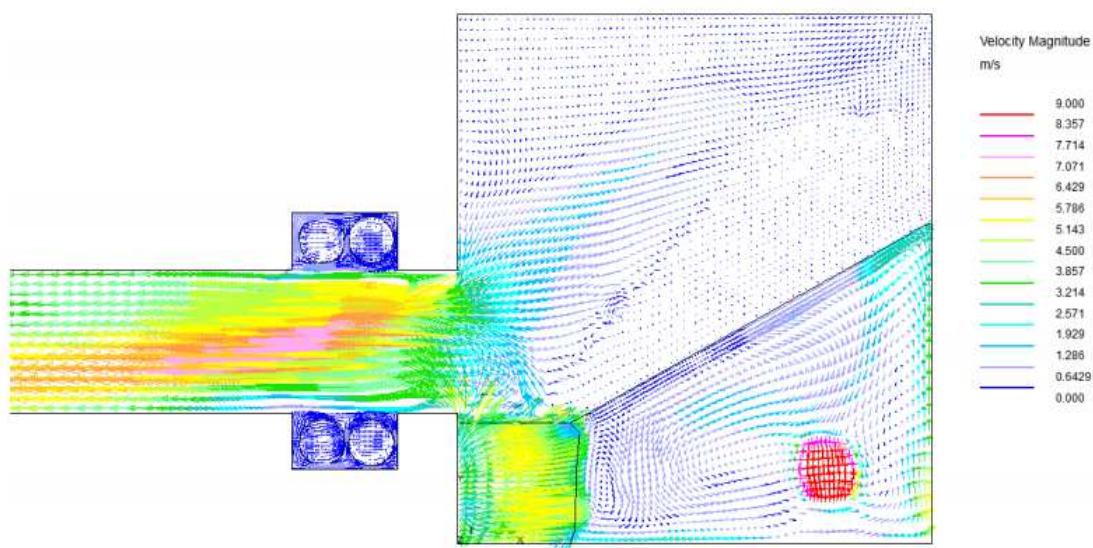
Na základě naměřených údajů o tlakové ztrátě vrstvy paliva, vypočítaného způsobu formování vrstvy paliva na šikmém roštu, byly stanoveny matematickým modelem 4 varianty typů vrstvy paliva na šikmém roštu.

1. dp 1 : varianta s původním roštem a vulemi okolo něj bez paliva
2. dp 2 : varianta se zatěsněním vůlí roštu bez paliva
3. dp 3 : varianta dp 2 doplněná o „kopec“ vrstvy paliva
4. dp 4 : varianta 2 doplněná o rovnoměrnou 5 cm vrstvu paliva



Obr. 33 Tlaková ztráta jednotlivých typů vrstev paliva na roštu.[24]

Z modelování a výsledků průběhu tlakové ztráty roštu je zřejmé, že vrstva pilin klade významný odpor proti proudění vzduchu přes šikmý rošt a tak znesnadňuje správné spalování v místech k tomu určených.



Obr. 34 Rychlostní pole vzduchu s modelovou vrstvou paliva na roštu. [21]

Díky poznatkům z předchozího modelování tlakové ztráty roštu bylo následně možné zakomponovat vrstvu paliva do matematického modelu celé spalovací komory a tak následně určit rychlostní pole a proudění spalovacího vzduchu přes šikmý rošt s vrstvou paliva. Tento efekt je znázorněn v obr. 34.

6.3 Výsledek modelování

Na základě modelování a vytvoření rychlostních polí 1° vzduchu je zřejmé, že vzduch proudí místy, kudy nemá. Problematická místa jsou u kapsy, kterou prochází táhlo roštu. Při provozu touto kapsou prochází významné množství primárního vzduchu, což ovlivňuje spalovací proces a následné dohořívání v převáděcím kanále mezi výměníkovou částí a spalovací komorou. Tento problém bylo doporučeno vyřešit zaplněním kapsy pro táhlo až do úrovně kotle. Dalším problémem se jeví mezery mezi roštem a stěnou kotle, kudy zase uniká část primárního vzduchu. To způsobuje malou tlakovou diferenci v prostoru pod roštem a nad roštem. Řešením tohoto problému je ucpání mezer mezi roštem a stěnou komory.

V případě zakomponování matematického modelu vrstvy paliva do modelu spalovací komory ZKG, viz obr. 34, nedochází k prostupu spalovacího vzduchu přes vrstvu paliva, jelikož se vzduch snaží uniknout přímo do převáděcího kanálu. Tento efekt je podpořen odhoříváním paliva na konci roštu. V případě předeřevu vzduchu tak dochází k neefektivnosti vysoušení paliva na roštu, jelikož značná část vzduchu se neúčastní předsoušení celé vrstvy paliva.

7 NÁVRH OPATŘENÍ

Díky získaným poznatkům z měření spalovací komory ZKG pro dřevní biomasu o relativní vlhkosti 55,8%, které jsou popsány v kapitole 5, včetně výsledků proudění vzduchu uvnitř komory ZKG, vycházejících z modelování v kapitole 6, je nutné navrhnout taková opatření, aby spalování v komoře ZKG bylo ve všech ohledech příznivé pro biomasu s vyšší relativní vlhkostí než 35 %. To znamená, aby spalovací teploty dosahovaly alespoň výpočtových stavů a vzniklé emise respektovaly emisní třídy, které udává norma ČSN-EN 303-5.

➤ Důvody návrhu opatření:

1. Při najíždění do provozního stavu a po ustálení teplot a hodnot emisí se zjistilo, že ve spalovací komoře ZKG se projevuje rozdílná teplota než výpočtová na sledovaném místě v okolí převáděcího hrdla a to pro palivo o vlhkosti 55,8 %.
2. Při samotném provozování spalovací komory s použitým palivem o vlhkosti 55,8% se zkoumaly koncentrace emisí a to zejména složek CO a NOx. Za použití nastavení množství spalovacího vzduchu a teploty včetně tří režimů předehřevu vzduchu se ukázaly velmi vysoké hodnoty koncentrace CO pro použité palivo. Za těchto podmínek a s množstvím produkce emisí, není možné komoru ZKG na velmi vlhké palivo provozovat na základě ČSN-EN 303-5.

➤ Potvrzení návrhu opatření:

1. Na základě výsledku modelování pomocí metody kontrolní objemu bylo zjištěno, že dochází k významným ztrátám množství spalovacího vzduchu. Výsledkem je zkratový proud primárního proudu vzduchu pod roštem, který nezabezpečí správné spálení přivedeného množství paliva na šikmý rošt.
2. Díky modelování proudění vzduchu uvnitř komory se ukázalo, že se množství primární spalovacího vzduchu nedostává pod palivo. Významné množství tak uniká tzv. cestou nejmenšího odporu a to neutěsněnými místy a neúčastní se tak reakce s palivem. Tento efekt dokládá tlaková ztráta vrstvy paliva, kdy nedochází k prostupu vzduchu palivem a tak vzduch uniká do převáděcího hrdla.
3. Z výsledku modelování taktéž vyplývá, že kritickými místy kudy uniká primární vzduch, je vytvořená kapsa pro táhlo roštu a spodní vodorovný dohořivací rošt. Tento rošt má otočnou funkci pro případné čištění a výsyp popelu. Štěrbiny mezi roštem a otvory v roštu prochází množství vzduchu, které se neúčastní spalování a odchází převáděcím hrdlem do teplovodního kotle KWH.

➤ Model řešení:

1. Vytvoření šikmé příčky uvnitř komory, která má za následek několik funkcí. Prodlouží setrvání spalin uvnitř komory a tak lepšímu promíchání se sekundárním vzduchem. Zamezí se tak úniku primárního vzduchu přímo do převáděcího hrdla a hlavně svým umístěním v prostoru příčka napomůže vysoušení čerstvého paliva, kde se využívá odrazu a sálání tepla na vrstvu paliva.
2. Ke správnosti funkce a účelu primárního vzduchu je zapotřebí utěsnit vzniklé štěrby

EÚ FSI VUT v Brně

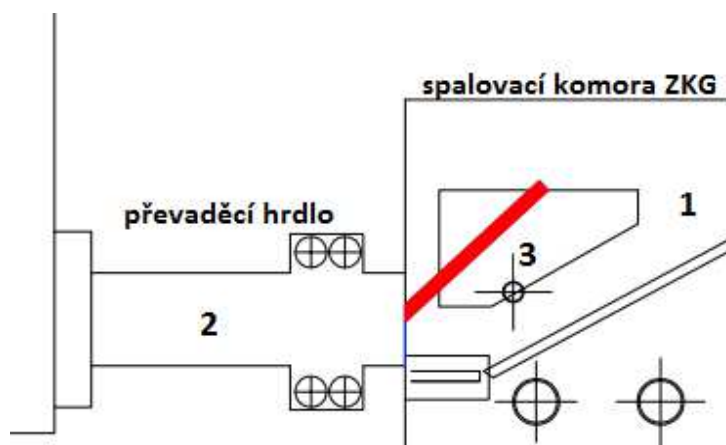
v okolí spalovacího roštu a kapsy u táhla roštu, kudy unikal primární vzduch. Těmito způsoby je nutné zabezpečit, aby se vzduch dostával co nejvíce pod rošt a nuceně putoval přes vrstvu spalovaného paliva.

3. Pomocným způsobem k zajištění spalování velmi vlhkého paliva bude také nastavení teploty spalovacího vzduchu jak u primárního tak sekundárního vzduchu, které by mělo napomoci vysoušení paliva přes vrstvu nově příchozího paliva šnekovým podavačem. V kombinaci s předchozími návrhy by mělo dojít ke zkvalitnění podmínek spalování a tak k lepším výsledkům, než-li ve stávajícím provozním stavu bez úprav.



Obr. 35 Upravená komora kotle Gemos ZKG

Vzhledem k úpravě komory s přidáním příčky byla poupravena pozice snímače teploty č. 3, kde snímač je umístěn pod příčkou spalovací komory ZKG, viz obr 36.



Obr. 36 Spalovací komora ZKG s úpravou a rozložením snímačů teplot spalín [16]

8 OVĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ OPATŘENÍ

Tato kapitola je věnována srovnání provozních a výpočtových stavů, které se týkají spalovací komory ZKG společnosti Gemos CZ. V závislosti na provedených úpravách komory představit měření veličin charakterizující spalovací komoru a vyhodnocení této úpravy vzhledem k předchozímu měření komory bez úprav.

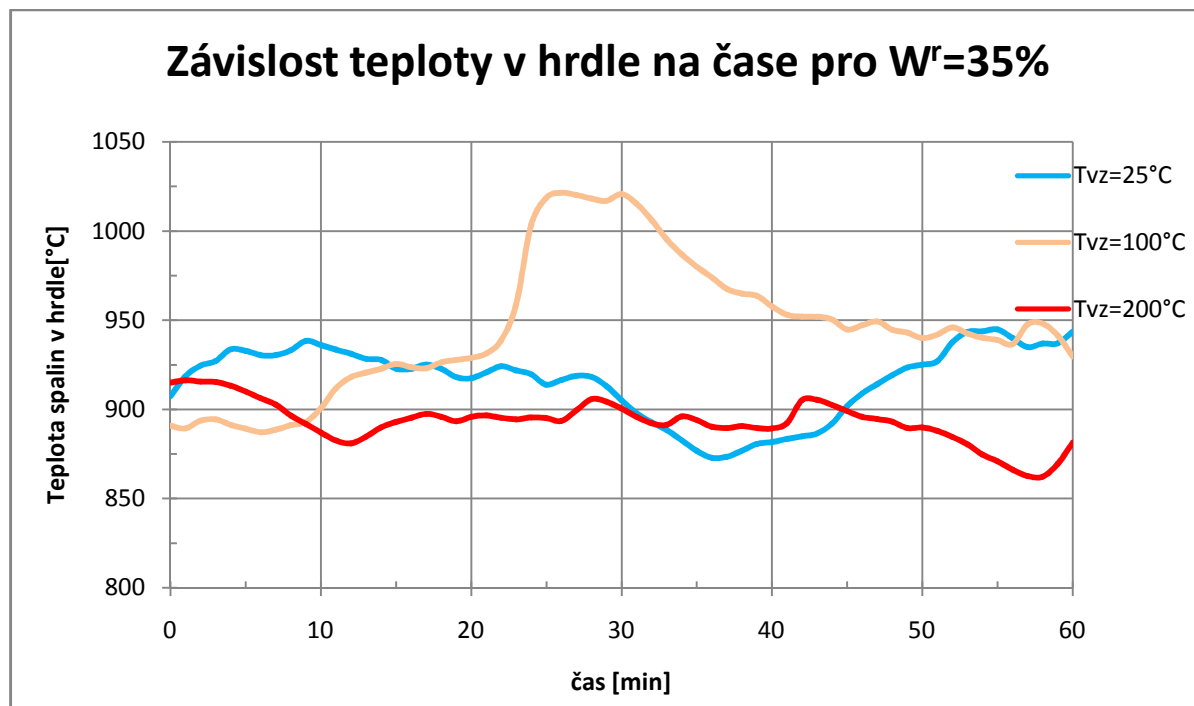
8.1 Měření teplot pro biomasu o $W^r=35\%$ s úpravou komory

Na základě provedených úprav uvedených v předchozí kapitole byla provedena zkouška spalovací komory dle následujícího nastavení. Palivem pro zkoušku byla použita stejná dřevní biomasa o vlhkosti 35% viz kap. 5.3. Stejným způsobem byly použity 3 režimy spalování vzhledem k teplotě spalovacího vzduchu a to: okolní teplota vzduchu, předehřev vzduchu na teplotu 100°C a 200°C. Ovládací systém LabVIEW 2012 se znovu staral o minutovou zálohu dat ze všech čidel a snímačů umístěných na měřicím zařízení uvnitř spalovací komory. Z těchto hodnot je znovu sestavena tabulka průměrných hodnot ve třech režimech spalování.

ZKG - Dřevní biomasa $W^r=35\%$, příčka				
Měření		1. režim	2. režim	3. režim
cíl	[°C]	25°C	100°C	200°C
I. Vzduch	[°C]	24,1	109,5	201,8
II. Vzduch	[°C]	25,3	114,0	201,9
III. Vzduch	[°C]	27,0	32,1	37,4
Množství I. Vzduchu	[kg/h]	283,5	279,2	275,2
Množství II. vzduchu	[kg/h]	64,5	81,1	61,6
Množství III. vzduchu	[kg/h]	0,2	0,2	0,2
1. teplota v komoře	[°C]	917,1	946,2	923,7
2. teplota hrdle	[°C]	902,5	903,1	866,2
3. teplota v komoře	[°C]	1154,9	1177,2	1143,9
Teplota výstupní vody	[°C]	71,4	67,7	65,5
Teplota vratky	[°C]	62,8	63,5	59,1
Teplota spalin	[°C]	187,6	187,6	180,6
Vstupní teplota paliva	[°C]	22,7	21,4	25,7
Výkon	[kW]	76,8	75,2	70,7

Tab. 24 Provozní stav komory ZKG s úpravou pro 35% vlhkost paliva

Z pohledu na vývoj teplot v převáděcím hrdle a výkonu spalovací komory ZKG v tab. 24 je zřejmé, že za zvyšujícího se předehřevu vzduchu klesá výkon i teplota pro 3. režim spalování s nastavením předehřevu vzduchu na teplotu 200°C. Teplota v hrdle pro předehřev vzduchu na teplotu 100°C se v průměru nezvýšila oproti teplotě v hrdle při použití režimu spalování č.1. Příčinou tohoto jevu může být rozdílné množství paliva v komoře, změněná regulace teploty chladicí vody. Další příčinou může být nehomogenita v palivu, o kterou se spaliny mohly ochladit při cestě delším kanálem, který je prodloužen po instalaci příčky v komoře.



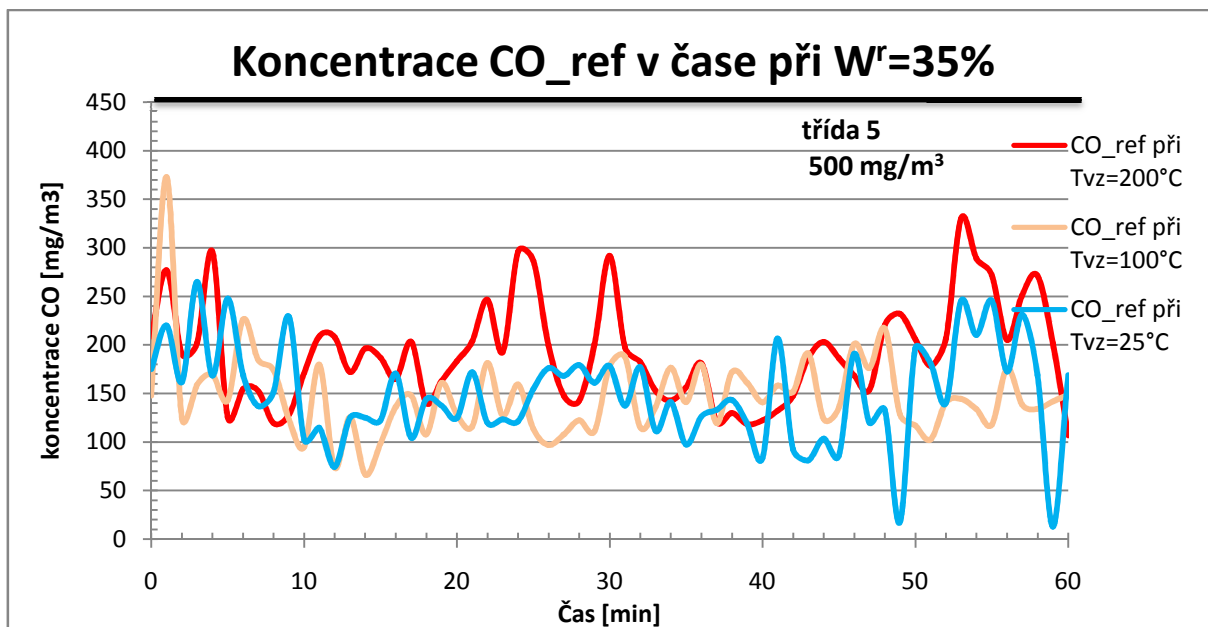
Obr. 37 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=35\%$ s úpravou komory

Na obr. 37 je sestaven v programu Excel graf závislosti teploty spalin v hrdle na čase při použití paliva o relativní vlhkosti 35%. Je zřejmé, že při žádaném předehřevu vzduchu se teploty v komoře nezvyšují. Viditelný skok teploty v převáděcím hrdle je při použití předehřevu vzduchu při teplotě 100°C a následný návrat na průměrnou teplotu. Vyobrazený skok je možné přisoudit změně množství paliva vstupujícího do komory, kdy výkon, který byl v čase zobrazován v ovladatelném prostředí LabVIEW, nebyl dostačující. Tato změna se chvilkově projevila zvýšením teploty, ale následně se vrátila zpět na teplotu pod 950°C. Anomálii je možné také hledat v regulaci mixu chladící vody, jelikož tato regulace je bez zpětnovazebního členu, který by zajistil stálý rozdíl teploty vstupní a výstupní vody. Dalším činitelem, který by mohl ovlivnit teploty by mohla být nehomogenita paliva.

8.2 Měření spalin pro biomasu o $W^r=35\%$ s úpravou komory

Měření emisí pro palivo o relativní vlhkosti 35% proběhlo znovu ve třech režimech spalování s nastavením vzduchu o hodnotě okolí, 100°C a 200°C. V programu Excel byla vyhodnocena data emisí, která zobrazovala měřidla, viz kap. 5.1. Tyto výsledky jsou zobrazeny grafem v obrázku č. 38, kde je jednoznačně zobrazen průběh koncentrace oxidu uhelnatého pro všechny tři režimy spalování s rozdílným nastavením vzduchu.

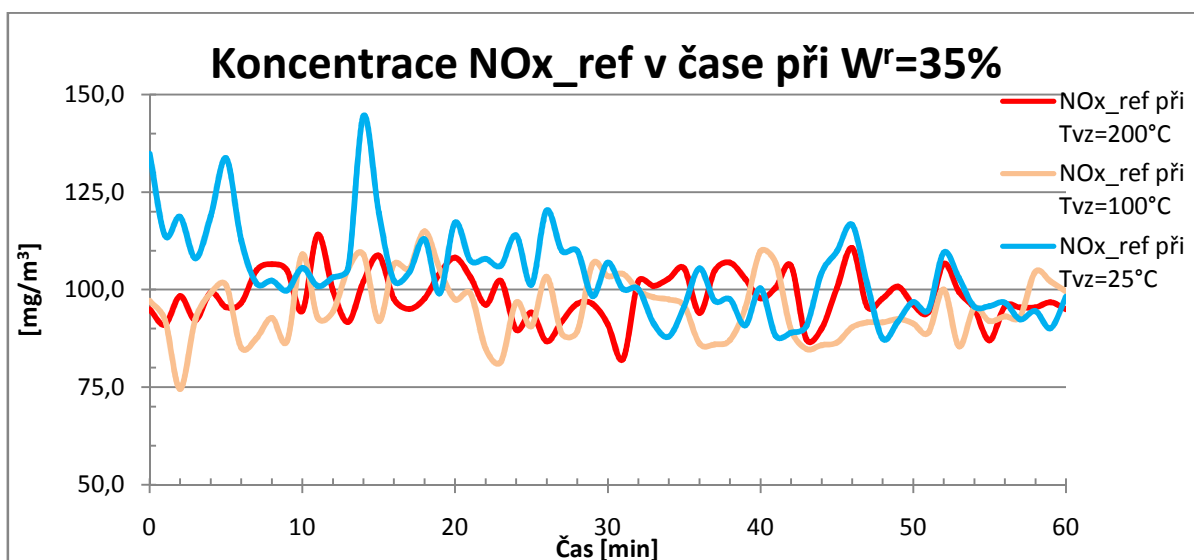
V obrázku č. 38 je zanesena maximální koncentrační mez oxidu uhelnatého s hodnotou 500mg/m³. Tato mez respektuje emisní třídu 5 dle normy ČSN-EN 303-5.



Obr. 38 Graf závislosti koncentrace CO v čase pro palivo o $W^r=35\%$, úprava komory

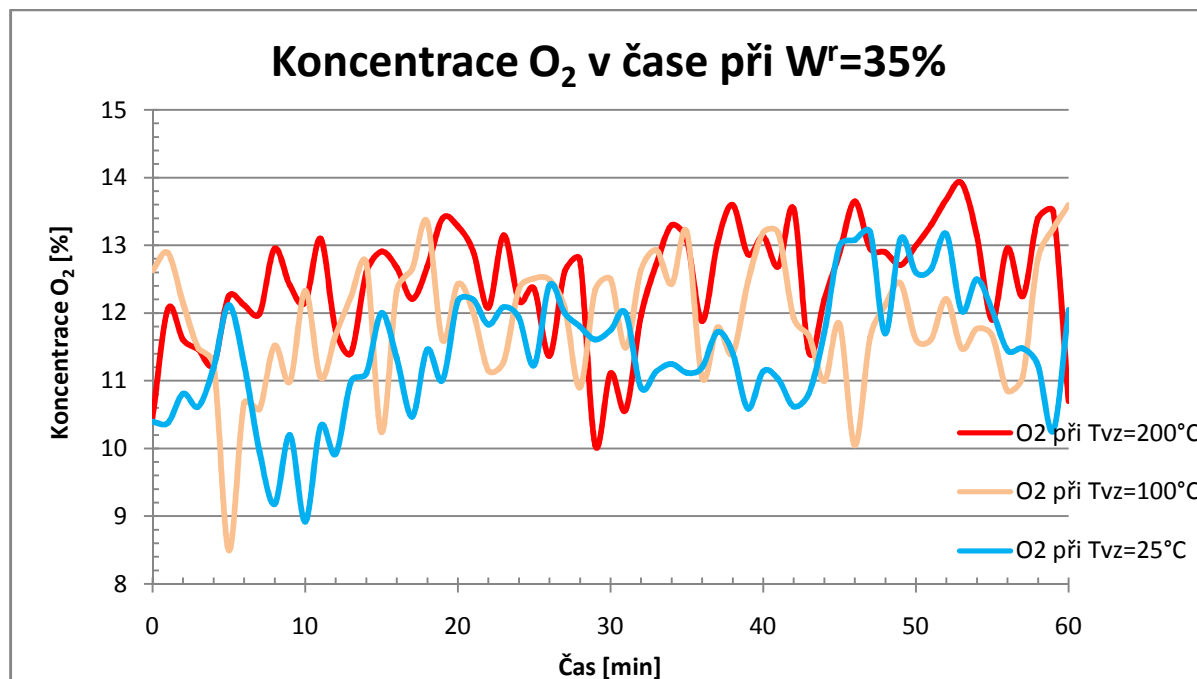
Z grafu na obrázku č. 38, lze usoudit, že pro všechny tři typy regulace nastavení spalovacího vzduchu vyhovují emisní třídě 5. Proto lze s touto konfigurací spalovací komory a nastavením spalovacího vzduchu provozovat zařízení Gemos ZKG, jež respektuje emisní třídu 5 koncentrace CO (mg/m³) ve spalinách.

Vyobrazené vrcholy zaznamenané v grafu mohou pocházet z utržení vrstvy paliva na šikmém roštu a tak úletů pevných částic do prostoru výměníkové části, případně z chyb, které se mohly vyskytnout při měření a vyhodnocení koncentrace CO měřidly ULTRAMAT 20 a 21.



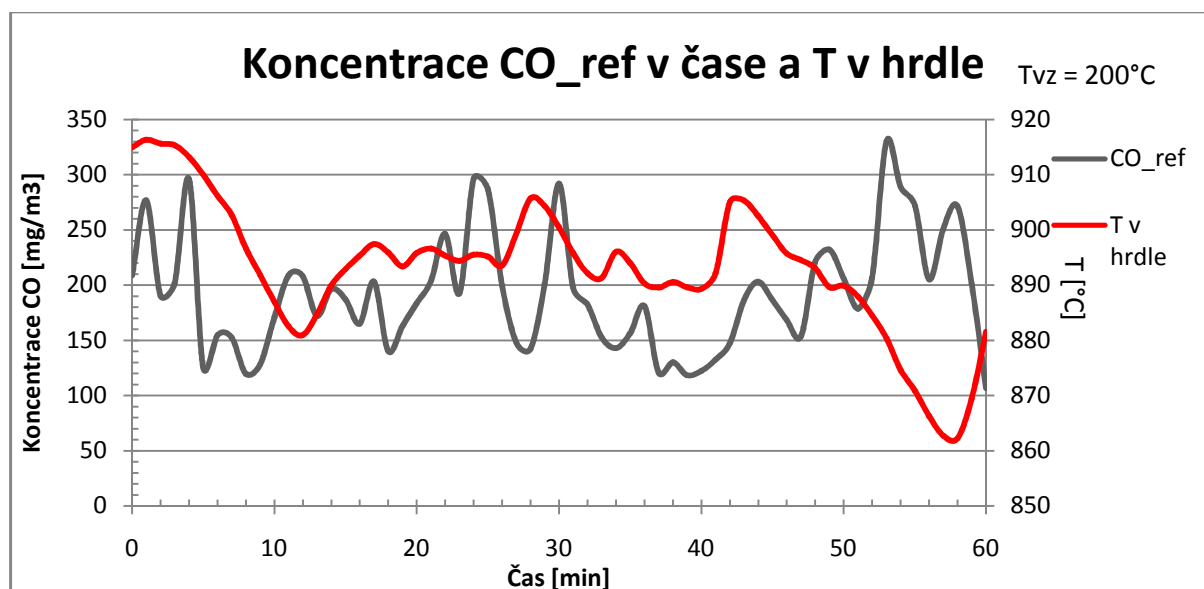
Obr. 39 Graf závislosti koncentrace NOx na čase a T v hrdle při $W^r=35\%$, úprava komory

Koncentrace NOx ve všech režimech spalování dodržuje emisní limit koncentrace 600 mg/m³ při 11% O₂, kterou stanovuje vyhláška 415/2012, viz [23].



Obr. 40 Graf závislosti koncentrace O_2 v čase a T v hrdle při $W^r=35\%$, úprava komory

Na obrázku č. 41 je vyobrazena závislost koncentrace oxidu uhelnatého a teploty v převáděcím hrdle na čase, při nastavení režimu spalovacího vzduchu o hodnotě 200°C . Průběh teploty lze pouze charakterizovat jako oscilaci hodnot teploty v rozmezí $860\text{--}900^\circ\text{C}$, kde střední část zkoušky se projevuje stabilněji. Koncentrace CO osciluje v rozmezí $100\text{--}300\text{ mg/m}^3$.



Obr. 41 Graf závislosti koncentrace CO na čase a T v hrdle při $W^r=35\%$, $T_{vz}=200^\circ\text{C}$

8.3 Měření teplot pro biomasu o $W^r=55,8\%$ s úpravou komory

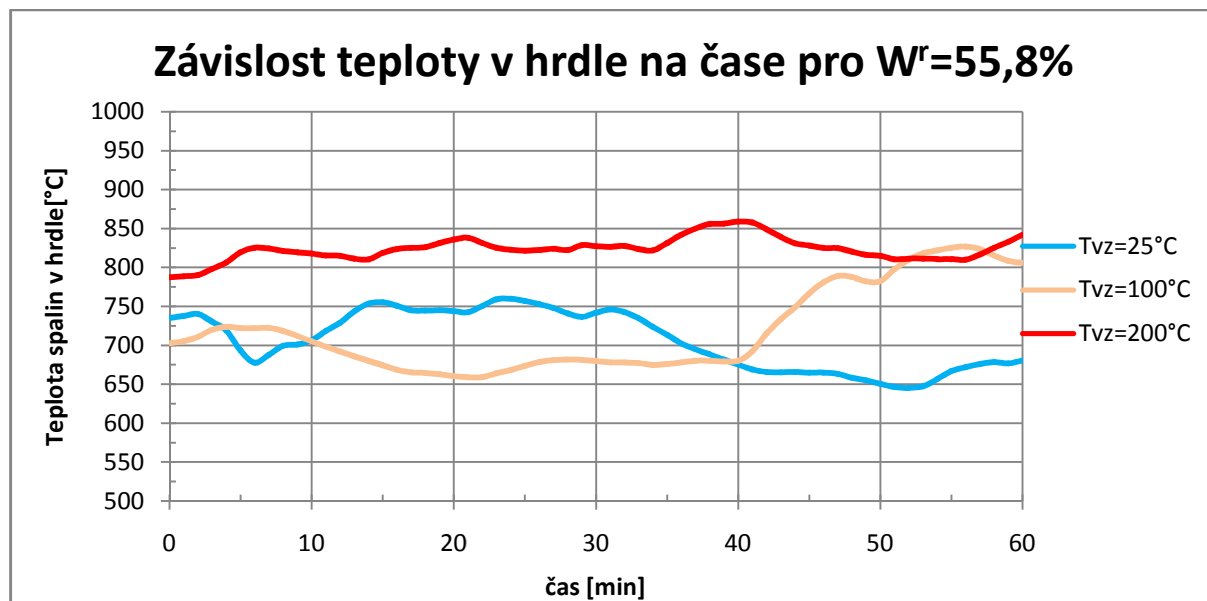
Výsledky měření spalovací komory pro použité palivo při relativní vlhkosti 55,8% jsou zaznamenány v tab. 25. Hodnoty jsou zaznamenány v hodinovém intervalu pro každý režim měření, který obsahoval změnu nasávaného vzduchu a tak změnu spalovacích podmínek uvnitř komory. Tato myšlenka zvýšení spalovacího vzduchu spolu s vhodnou úpravou spalovací komory ZKG by měla vést ke zlepšení spalovacích podmínek, jak vzhledem k teplotě uvnitř spalovací komory, tak hlavně k tvorbě emisí uvolňovaných do ovzduší

Podobně jako v předchozích kapitolách je sestavena tabulka průměrných hodnot při třech režimech nastavení spalovacího vzduchu. Pomocí záznamového softwaru LabVIEW 2012, který poskytl minutové zálohy hodnot ze všech čidel, byla sestavena tabulka průměrných hodnot pomocí programu Excel.

ZKG - Dřevní biomasa $W_r=55,8\%$, příčka				
Měření		1. režim	2. režim	3. režim
cíl	[°C]	25°C	100°C	200°C
I. Vzduch	[°C]	26,0	96,5	199,0
II. Vzduch	[°C]	26,7	111,0	202,0
III. Vzduch	[°C]	28,3	32,0	38,0
Množství I. Vzduchu	[kg/h]	283,6	283,6	278,5
Množství II. vzduchu	[kg/h]	69,1	68,8	66,5
Množství III. vzduchu	[kg/h]	0,17	0,17	0,17
1. teplota v komoře	[°C]	754,6	771,2	849,8
2. teplota v hrdle	[°C]	742,0	740,2	824,1
3. teplota v komoře	[°C]	906,8	915,4	1006,8
Teplota výstupní vody	[°C]	69,0	67,5	71,9
Teplota vratky	[°C]	62,7	61,4	64,8
Teplota spalin	[°C]	192,6	190,1	201,6
Vstupní teplota paliva	[°C]	22,6	23,4	25,2
Výkon	[kW]	71,0	69,8	79,6

Tab. 25 Provozní stav komory ZKG s úpravou pro 55,8% vlhkost paliva

Na základě průměrných teplot spalin a dat naměřených v tab. 25, lze konstatovat, že se zvyšující se teplotou primárního a sekundárního vzduchu nám roste i teplota v komoře v části převáděcího hrdla a také teplota 1 v části nad roštem. To má za následek chtěný jev v podobě vysoušení paliva a vyšší výkon. U režimu 2, při nastavení spalovacího vzduchu je nejednoznačný průběh, jelikož teploty nejsou nikterak rozdílné oproti režimu 2 s nasávaných vzduchem o hodnotě okolní teploty vzduchu. Příčinou tohoto jevu může být nejednoznačná regulace na straně chladicí vody, protože tato regulace je primárně ovládána ručně a tak se pravděpodobně nedařilo nastavit optimální podmínky po dobu celého experimentu. Tento jev má za následek i pokles výkonu u režimu 2.

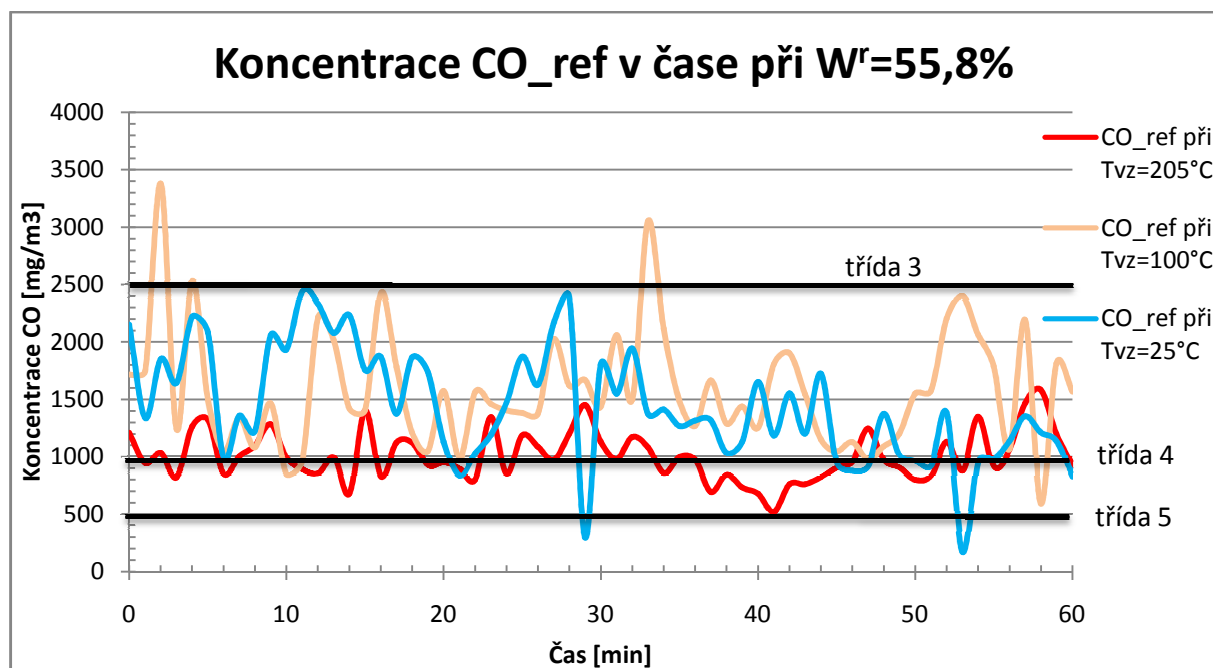


Obr. 42 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=55,8\%$ s úpravou komory

8.4 Spaliny pro biomasu o $W^r=55,8\%$ s úpravou komory

Vyhodnocení průběhu koncentrace spalin pro jednotlivé režimy ohřevu vzduchu, pro zkoušenou vlhkost biomasy o hodnotě 35 %, bylo sestaveno v programu Excel a stanovena závislost koncentrace oxidu uhelnatého na čase zkoušky. Ve stejném grafu jsou zaneseny hodnoty všech 3 zkoušek pro tři režimy nastavení spalovacího vzduchu.

V grafu na obrázku 34 jsou vyznačeny hlavní emisní třídy, které stanovuje emisní norma ČSN-EN 303-5.



Obr. 43 Graf závislosti koncentrace CO v čase, palivo: $W^r=55,8\%$, úprava komory

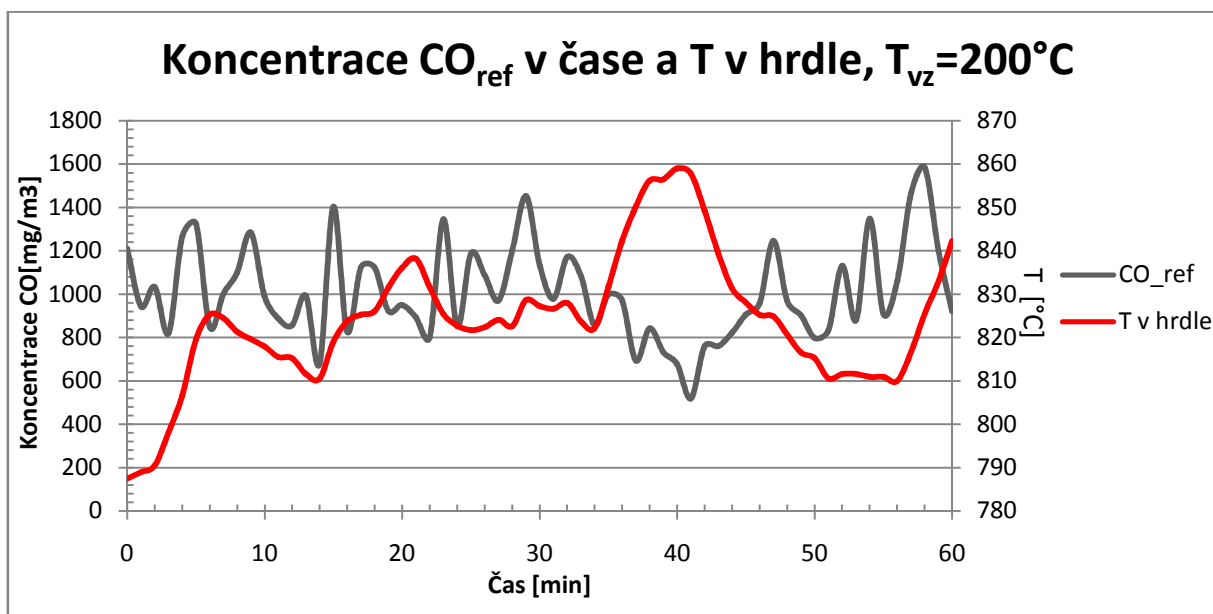
EÚ FSI VUT v Brně

Z naměřených dat analýzy spalin lze vyvodit, že všechny tři režimy spalování splňují emisní třídu 3. Nastavení režimu 2, o hodnotě spalovacího vzduchu 100°C , je z grafu patrné, že hodnoty koncentrace CO jsou velmi rozdílné svou hodnotou a lokálně velmi vysoké. Tento problém byl objasněn v kapitole 8.2.

Zbýlé vyhodnocení spalovacích režimů a koncentrace spalin dokazuje, že čím vyšší teplota předehřevu vzduchu, tím se koncentrace CO snižuje. To tedy vede k přiblížení koncentrace CO k přísnější emisní třídě 4, kterou režim spalování č. 3 atakuje.

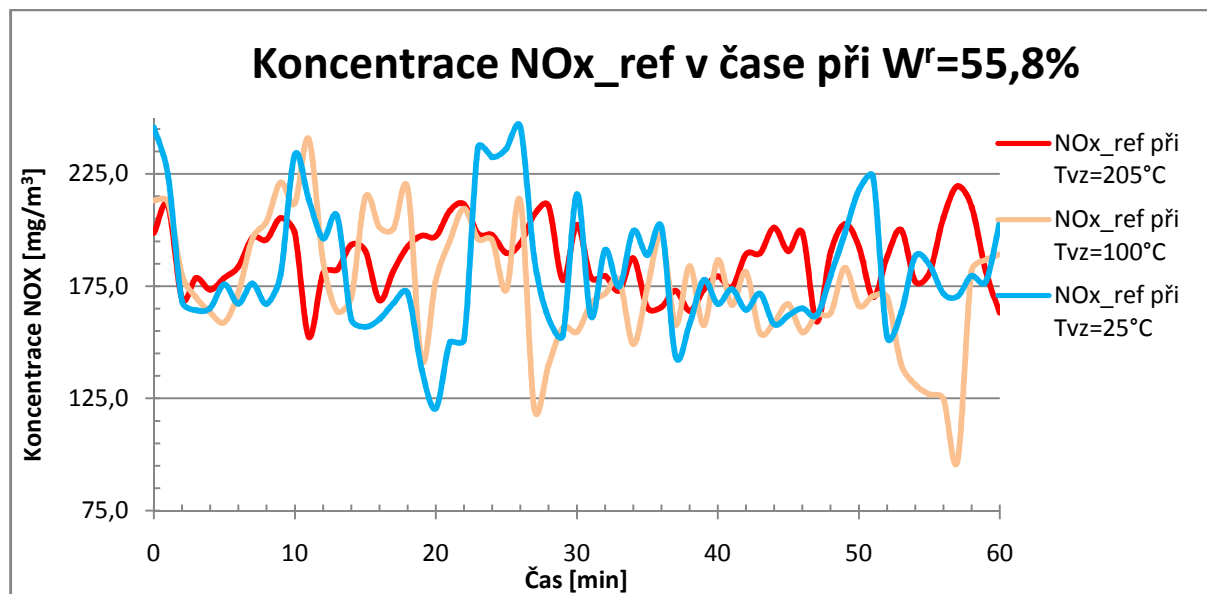
Na obr. 43 je detailně znázorněna koncentrace oxidu uhelnatého (mg/m^3) v závislosti na době trvání měření při jednotlivých nastaveních teploty spalovacího vzduchu. Naměřená data dokazují, že zavedené konstrukční opatření zlepšilo efektivnost spalování a hlavně velmi příznivě ovlivnilo tvorbu oxidu uhelnatého při spalování velmi vlhkého paliva, konkrétně zde použité palivo bylo o vlhkosti 55,8 %. Myšlenka vysoušet palivo včetně konstrukčního opatření vedla ke zdárnému výsledku, který dokazuje průběh koncentrace CO dle režimu nastavení spalovacího vzduchu č.3.

Při nastavení spalovacího vzduchu na hodnotu 200°C se koncentrace emisí drží pod hranicí $2500 \text{ mg}/\text{m}^3$ což splňuje emisní třídu 3. Toto nastavení geometrie spalovací komory a spalovacího vzduchu je nejvýhodnější z pohledu koncentrace CO.



Obr. 44 Graf závislosti koncentrace CO na čase a T v hrdle při $W=55,8\%$, $T_{\text{vz}}=200^{\circ}\text{C}$

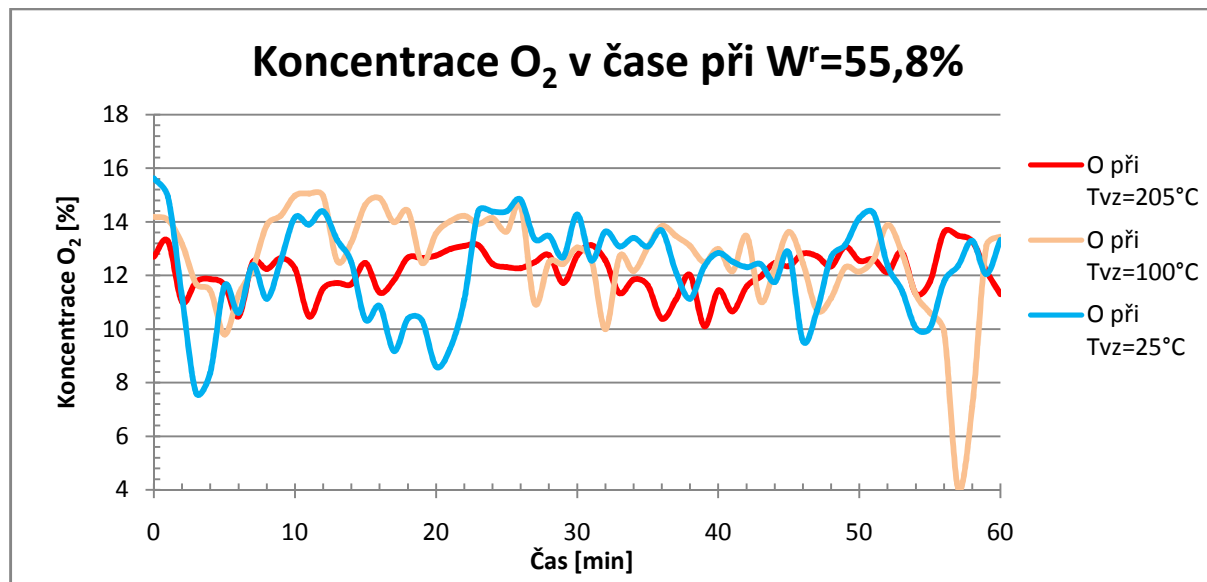
Na obr. 44 je vyobrazena závislost koncentrace oxidu uhelnatého a teploty v převáděcím hrdle na čase, při nastavení režimu spalovacího vzduchu o hodnotě 200°C . Průběh teploty lze pouze charakterizovat jako oscilaci hodnot teploty v rozmezí $550\text{--}860^{\circ}\text{C}$, kde není jednoznačná hladina koncentrace, ale pásmo v rozmezí mezi $800\text{--}1400 \text{ mg}/\text{m}^3$.



Obr. 45 Graf závislosti koncentrace NO_x v čase, palivo: W^r=55,8%, úprava komory

Na obr. 45 je znázorněn graf koncentrace NO_x v čase, který je sestaven v programu Excel z naměřených dat z měřicích zařízení. Hodnoty koncentrace NO_x jsou pod limitní hranicí o hodnotě 600 mg/m³ při 11% O₂, kterou stanovuje vyhláška 415/2012, viz [23]. Vzhledem k naměřeným koncentracím NO_x na obr. 41 a O₂ na obr. 42, se dá konstatovat, že se zvyšující se koncentrací kyslíku stoupá i koncentrace NO_x ve spalínách a naopak.

Obecně platí, že se zvyšující se teplotou roste koncentrace NO_x. Zde máme ale případ s nekonstantním podílem kyslíku a tak se spíše koncentrace NO_x řídí podle množství kyslíku teploty ve spalínách.



Obr. 46 Graf závislosti koncentrace O₂ v čase a T v hrdle při W^r=55,8 %, úprava komory

8.5 Vyhodnocení

Výsledné charakteristické hodnoty spalování a závislosti koncentrací emisí, které vznikly spalováním, jsou vyznačeny v kapitole 8.1-8.4. V této kapitole byla experimentálně testována spalovací komora ZKG společnosti Gemos CZ, kde se účelně spalovala biomasa ve formě dřevních pilin o dvou různých vlhkostech 35% a 55,8%, za účelem spalovat velmi vlhkou biomasu ve stávající upravené komoře. Na základě výsledků z kapitoly 6 a 7, bylo provedeno opatření, které mělo ovlivnit spalovací proces uvnitř komory, protože výsledky s původní geometrií a nastavením spalování nebyly příznivé pro spalování velmi vlhkého paliva.

Srovnání výsledků měření a výpočtu						
35%				55,8%		
Výpočtem	Měření		Výpočtem	Měření		
	Bez úprav	Úprava komory		Bez úprav	Úprava komory	
T_{vz}	T_{np}	T v hrdle	T v hrdle	T_{np}	T v hrdle	T v hrdle
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
25	860	888	902	717	597	742
100	912	930	903	765	784	740
200	978	959	866	831	858	824

Tab. 26 Porovnání výpočtových a naměřených teplot v převáděcím kanále

V tab. 26 jsou shrnuty výsledky experimentálního měření a výpočtového stavu všech režimů předehřevu vzduchu. U biomasy o vlhkosti 35% je teplota spalin vyšší u geometrie komory, která nemá umístěnou příčku a utěsněním roštu uvnitř komory, protože všechny hořící plyny vstupují přímo do převáděcího kanálu a následně do teplovodního kotle KWH. Tento jev je podobný i v případě použití zkušební paliva - biomasové piliny o vlhkosti 55,8%. Teplota v převáděcím hrdle spalované biomasy o vlhkosti 35% s předehřevem vzduchu 200°C je nižší z důvodu velkého přebytku vzduchu, viz tab. 28. Důvodem většího přebytku vzduchu je pravděpodobně nedokonalé spalování vrstvy paliva na roštu, kde nedochází k úplnému prostupu vzduchu palivem a spálení paliva. Tento problém podporuje výška vrstvy paliva na roštu, která zaplňuje komoru mezi příčkou a roštem.

V případě použití opatření ve formě utěsněného roštu a instalace příčky uvnitř komory došlo ke zvýšení teploty pro spalované palivo o vlhkosti 55,8 % v převáděcím hrdle a přiblížení se k výpočtovému stavu, jak je patrné na tab. 26. Navíc je plamen ochlazován o nově přicházející palivo šnekovým dopravníkem, zároveň proud hořících plynů vysušuje palivo a pomáhá tak k lepšímu spalování.

Rozdíly mezi výpočtovým stavem a teplotou plamene v uspořádání spalovací komory s příčkou včetně utěsnění roštu, je možno přisoudit neoptimálním podmínkám při experimentu. Regulace výstupní teploty a vratky je realizována chladicím zařízením, které je regulováno pomocí manuálního nastavení v ovládacím softwaru labVIEW bez zpětnovazebního členu. Nelze opomenout, že se na klesání teplot mohla také podílet nehomogenita spalovaného paliva a množství vzduchu přiváděného do spalovací komory.

EÚ FSI VUT v Brně

Srovnání průměrných výsledků měření emisí						
Původní komora				Komora s úpravou		
$W^r=35\%$				$W^r=35\%$		
T_{vz}	CO_{ref}	NOx_{ref}	O_2	CO_{ref}	NOx_{ref}	O_2
[°C]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
25	2039	82	11,3	149	104	11,4
100	1303	95	11,3	147	95	11,9
200	1071	102	11,7	192	98	12,5
-	$W^r=55,8\%$			$W^r=55,8\%$		
25	19598	147	14,1	1445	181	12,2
100	9535	88	9,6	1584	175	12,6
200	4683	105	14,1	1008	188	12,1

Tab. 27 Srovnání průměrných hodnot složek spalín při měření emisí

Z hlediska koncentrace složek spalín byl zkoumán oxid uhelnatý a NOx . Složky byly měřeny na spalovací komoře, která byla vybavena dodatečnou příčkou a utěsněným roštem. Emise vzniklé spálením biomasy o vlhkosti 35% a 55,8% musí splňovat emisní limity, které předepisuje norma ČSN-EN 303-5 a vyhláška 415/2012 Sb. Vyhláška 415/2012 stanovuje koncentrace NOx v rozsahu výkonů a pro tento případ je použitelný nejnižší rozsah výkonu 0,3-1 MW výkonu s koncentrací 600 mg/m³ NOx . Se zvyšujícím se kritériem výkonu se ve vyhlášce 415/2012 Sb., koncentrace NOx snižuje. V tabulce 27 je vyobrazeno srovnání měření složek spalín obou typů spalovací komory pro dvě vlhkosti paliva. Z měření vyplývá, že v upravené komoře se koncentrace CO-oxidu uhelnatého pro biomasu o vlhkosti 35% pohybuje pod hranicí emisní třídy 5 (500mg/m³) a to pro všechny 3 režimy spalování. Koncentrace NOx – převážně oxidu dusnatého se taktéž pohybuje pod hranicí 600 mg/m³ při 11% O_2 , kterou stanovuje vyhláška 415/2012 Sb., viz [23]. Z tohoto měření plyne, že pro spalování biomasy o vlhkosti 35% není potřeba předehřev vzduchu.

Při spalování biomasy o vlhkosti 55,8% byly znovu měřeny emise CO s koncentrací, která nepřesahuje emisní třídu 3 (2500 mg/m³) a s použitím předehřevu vzduchu na 200°C se dotýká průměrnou hodnotou emisní třídy 4 (1000 mg/m³). Pro emisní třídu 3 by předehřev vzduchu nemusel být použit. Koncentrace NOx se znovu pohybuje pod hranicí 600 mg/m³ při 11% O_2 , vyhláška 415/2012 Sb., viz [23].

přebytek vzduchu			
	1. režim,	2. režim	3. režim
	25°C	100°C	200°C
	bez úpravy komory		
35%	2,17	2,16	2,25
55,8%	3,03	1,84	1,91
-	úprava komory		
35%	2,19	2,30	2,46
55,8%	2,40	2,51	2,37

Tab. 28 Přebytek vzduchu při experimentu spalování biomasy

EÚ FSI VUT v Brně

Výsledné hodnoty emisí mohly být ovlivněny přebytkem vzduchu ve spalovací komoře, který se upravoval dle toho, jaký měla spalovací komora výkon a s tím spjaté emise. V tab. 28 je znázorněn přebytek vzduchu ve spalovací komoře pro všechna experimentální měření na spalovací komoře ZKG. Je patrné, že některé hodnoty jsou vyšší než doporučené společností Gemos, a to přebytek vzduchu 2,1, leč nebylo možné se na tyto hranice dostat, protože by spalovací komora nehořela optimálně a nepodávala požadované výsledky. V souvislosti s přebytkem vzduchu je dobré poukázat také na teplotu nechlazeného plamene, který je právě přebytkem vzduchu ovlivněn. Čím vyšší přebytek vzduchu tím nižší je teplota nechlazeného plamene, tedy teplota v převáděcím hrdle.



Obr. 47 Pohled do spalovací komory s provedenou úpravou při spalování

V případě spalování velmi vlhkého paliva (55,8% vlhkosti) je konstrukční opatření uvedené v kapitole 7 přínosem, to potvrzuje shoda s výpočtovým stavem a sekundárně se toto řešení projevilo také na produkci emisí. Výkonově nebylo možné se dostat na hodnoty vyšší než 70-80 kW při spalování velmi vlhkého paliva. Tento výsledek je úzce spjat s množstvím paliva přicházejícího do spalovací komory. V případě přidání paliva do komory se začala komora ucpávat a „dusit“. Návrhem, který by odstranil tento problém a vedl by ke zvýšení výkonu, by mohla být geometrická úprava velikosti komory.

Geometrická úprava by spočívala ve zvětšení výšky komory a velikosti roštu v řádu několika centimetrů. Důvodem této změny je postupné zahlcování pilinami při provozním stavu kotle ZKG. Zahlcování komory je důsledkem modifikace komory šikmou příčkou, kde je omezený prostor mezi příčkou a roštem. Při posuvu paliva do kotle se tak tento prostoru ucpe a spaliny těžko prochází ven z komory a vznikla by tak tlaková ztráta na straně spalin. Zvýšení komory by umožnilo zvětšení průtoku paliva, průtoku spalin a správnou funkci příčky, která umožňuje předsoušet palivo sáláním na čerstvě přichozí směrem od šnekového podavače. Další geometrickou úpravou by mohl být posun přívodu sekundárního vzduchu do míst konce příčky resp. obratu spalin, kde by došlo k lepšímu promíchání sekundárního vzduchu se spalinami a tak lepší dohoření. V případě této úpravy by bylo možné zredukovat množství vstupů vzduchu z 3 na 2, kde by byl použit pouze primární a sekundární vzduch. To by mělo za následek jednodušší regulaci a s tím i spjaté investiční náklady na regulaci a provedení.

9 ZÁVĚR

Jedním z cílů mé diplomové práce bylo provést stechiometrický výpočet pro spalování velmi vlhkého paliva o relativní vlhkosti do 60%. Tento výpočet byl proveden konkrétně pro palivo s obsahem vlhkosti 55,8%, jako vzorový. Součástí stechiometrického výpočtu byla i bilanční rovnice a výpočty I-t digramu pro rozdílné přebytky vzduchu. Pomocí programu Excel byla sestavena závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti biomasy v intervalu vlhkosti 30-60%. V rámci výpočtu bylo počítáno i s dodatečnou recirkulací spalin pro možné vysoušení velmi vlhkého paliva. Jednodušší a realizovatelnější variantou byl ale předeřev primárního a sekundárního vzduchu a tato možnost byla realizovatelná na experimentálním zařízení Gemos ZKG a KWH. Pro biomasu ve formě pilin byla vypočtena a sestavena závislost předeřevu vzduchu na teplotě nechlazeného plamene. Tato teplota byla referenční teplotou pro porovnávání experimentálního zkoušení a měření.

V další části této diplomové práce byla provedena analýza vlivu vlhkosti paliva na teplotu nechlazeného plamene a průběh spalování. Analýzou bylo sledování průběhu teplot nechlazeného plamene v převáděcím hrdle mezi spalovací komorou Gemos CZ - ZKG a teplovodním kotlem KWH pro jednotlivá nastavení spalovacích podmínek. Spalovacími podmínkami se rozumí nastavení teploty nasávaného vzduchu v rozsahu mezi 25-200°C a změna geometrie spalovací komory. Současně se zkoumáním vlivu teplot uvnitř spalovací komory proběhla analýza spalin pro jednotlivá nastavení průběhu spalování. Na straně spalin byly zkoumány složky CO, NO_x, O₂, kde jednotlivé složky byly zaneseny do grafů pomocí programu Excel. Výsledky koncentrace složek spalin byly vzájemně porovnávány s emisními limity normy ČSN EN 303-5 a vyhlášky 415/2012Sb.

Z výsledků spalin a porovnání výpočtových teplot a experimentálně ověřených vyplynulo, že stávající konstrukce spalovací komory Gemos ZKG není vhodná pro spalování velmi vlhkého paliva. Dalším krokem bylo navržení opatření na základě ověření pomocí modelování komory za použití metody kontrolních objemů, které odhalilo několik kritických míst z hlediska proudění vzduchu a tlakové ztráty vrstvy biomasových pilin na šikmém roštu. Díky výsledkům z modelování proudění vzduchu se navrhla úprava komory s dodanou příčkou a utěsněním roštu po obvodu a ucpání kapsy u táhla roštu. Tato změněná geometrie se znovu experimentálně ověřila na straně teplot v převáděcím hrdle a koncentrace složek spalin pro stejná nastavení teplot spalovacího vzduchu a vlhkosti dřevní biomasy.

Výsledkem analýzy teplot a koncentrace spalin CO, NO_x, O₂ pro použité palivo 35% je, že s nastavením spalovacích podmínek není nutné předeřívat spalovací vzduch za současného dodržení emisních limitů-emisní třídy 5. normy ČSN-EN 303-5 a vyhlášky 415/2012 Sb. Pro použité palivo o relativní vlhkosti 55,8% není třeba předeřívat spalovací vzduch při respektování emisní třídy 3 normy ČSN EN 303-5 a vyhlášky 415/2012 Sb.

Závěrem je nutné konstatovat, že provedená změna geometrie spalovací komory byla velmi výrazným přínosem pro zkvalitnění spalování a dodržení emisních limitů velmi vlhkého paliva ve spalovací komoře ZKG společnosti Gemos CZ.

10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Czech RE Agency [online]. 2009 [cit. 2014-01-10]. Biomasa. Dostupné z WWW:<<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/biomasa>>.
- [2] Tzb info [online]. 2010 [cit. 2012-01-10]. Co je dřevní biomasa. Dostupné z WWW:<<http://energie.tzb-info.cz/biomasa/8011-co-je-drevni-biomasa>>.
- [3] Baláš Marek, Moskalík Jiří: Měření vlhkosti paliv. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“, VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
- [4] Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů [online]. 2009 [cit. 2014-01-10]. Energie z biomasy. Dostupné z WWW:<<http://www.spvez.cz/pages/biomasa.htm>>.
- [5] Vlastnosti biomasy z hlediska vhodnosti při spalování [online]. 2010 [cit. 2014-01-10]. CD Biomasa. Dostupné z WWW:<http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/VlastnostiBiomasy.pdf>.
- [6] Jandačka, J., Malcho, M., Mikulík, M.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina:Juraj Štefúň–GEORG.ISBN 978-80-969161-3-9
- [7] Biomasa-info. [online]. 2010 [cit. 2014-01-11]. Tuhé znečišťující látky a těžké kovy. Dostupné z WWW:<<http://www.biomasa-info.cz/cs/ekotzl.htm>>
- [8] Váňa, Jaroslav: Spalování biomasy s ohledem na životní prostředí a zdraví lidí. *Biom.cz* [online]. 2003-01-07 [cit. 2014-01-11]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/spalovani-biomasy-s-ohledem-na-zivotni-prostredi-a-zdravi-lidi>>. ISSN: 1801-2655.
- [9] P. Kól, Spalovací procesy [online]. 2011 [cit. 2014-01-11] Spalování tuhých paliv, , Dostupné z WWW:<<http://Spalovaci-procesy.wz.cz/TP.html>>
- [10] TZB-info. Baláš Marek, Lisý Martin, Moskalík Jiří [online]. 2012 [cit. 2014-02-05]: Kotle-1 část. Dostupné z WWW:<<http://vytapieni.tzb-info.cz/teorie-vytapieni/8382-kotle-1-cast>>
- [11] Lyčka Zdeněk : Dřevní peleta II. – spalování v malých zdrojích tepla. Krnov 2011 Grafotechna Print s.r.o..ISBN 978-80-904914-1-0
- [12] Biom [online]. 2009 [cit. 2012-02-10]. Dřevní štěpka - zelená, hnědá, bílá. Dostupné z WWW:<<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>>.
- [13] Biom [online]. 2009 [cit. 2012-02-10]. Brikety z biomasy - dřevěné, rostlinné, směsné brikety. Dostupné z WWW:<<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/brikety-z-biomasy-drevene-rostlinne-smesne-brikety>>.
- [14] Biom [online]. 2009 [cit. 2012-02-10]. Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety. Dostupné z WWW:<<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>>.
- [15] EÚ-OEI [online]. 2013 [cit. 2014-03-09]. Přístrojové vybavení. Dostupné z WWW:<<http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetickeho-inzenyrstvi/pristrojove-vybaveni>>.
- [16] Podnikové informace společnosti Gemos s.r.o. Čelákovice.

EÚ FSI VUT v Brně

- [17] SKÁLA Zdeněk, OCHODEK, Tadeáš: energetické parametry biomasy, Brno: Nakladatelství Mantila repro. 2007, 91s, ISBN 978-80-214-3493-6
- [18] BUDAJ, Florian. Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet. 4. vyd. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně. 1992. 200 s. ISBN 80-214-0426-4.
- [19] DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. 3.vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2007. 212s. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [20] Černý, Janeba, Teyssler: Parní kotle, Technický průvodce č. 32, SNTL, 1983, ISBN 04-224-83.
- [21] VUOS – Výzkumný Ústav Organických Syntéz, Rybitví. Výzkumná zpráva 4792 : Výpočtová studie proudění v roštovém kotli s oddělenou dohořivací komorou. 2013
- [22] ČSN EN 303-5: Kotle pro ústřední vytápění, část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW. 72 s.
- [23] Vyhláška 415/2012 Sb. O přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.
- [24] Zpráva VUT-FSI-OEI Č. 017/2013: Intenzifikace a optimalizace zplyňovacích jednotek a dopalovacích komor pro velmi vlhkou odpadní biomasu

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Závislost výhřevnosti na vlhkosti[5]	- 8 -
Obr. 2 Charakteristika ovlivněná vlhkostí biomasy[5]	- 8 -
Obr. 3 Grafické znázornění hořlaviny vody a popeloviny v palivu	- 9 -
Obr. 4 Závislost výšky tělíska na teplotě [9]	- 12 -
Obr. 5 Štěpka bílá [12]	- 14 -
Obr. 6 Štěpka hnědá [12]	- 14 -
Obr. 7 Vzor brikety [13]	- 14 -
Obr. 8 Typy pelet	- 14 -
Obr. 9 Gemos KWH a ZKG [15]	- 15 -
Obr. 10 Schéma zplyňovací komory ZKG s rošty [16]	- 17 -
Obr. 11 Graf závislosti Entalpie spalin na T a přebytku vzduchu bez recirkulace	- 29 -
Obr. 12 Graf závislosti teploty nechlazeného plamene na vlhkosti bez recirkulace	- 31 -
Obr. 13 Graf závislosti ohřevu vzduchu na teplotě nechlazeného plamene.....	- 32 -
Obr. 14 Graf závislosti entalpie recirkulovaných spalin na teplotě.....	- 36 -
Obr. 15 Graf I-T diagram spalin s recirkulací.....	- 37 -
Obr. 16 Analyzátor spalin Siemens ULTRAMAT 21 a 22	- 38 -
Obr. 17 Analyzátor spalin Infracal 5000	- 39 -
Obr. 18 Výňatek z normy ČSN-EN 303-5 o mezních hodnotách emisí [22]	- 39 -
Obr. 19 Ukázka použitého paliva pro spalovací komoru ZKG.	- 40 -
Obr. 20 rozložení snímačů teplot spalin[16]	- 42 -
Obr. 21 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=35\%$	- 43 -
Obr. 22 Graf závislosti koncentrace CO v čase pro palivo o $W^r=35\%$	- 44 -
Obr. 23 Graf závislosti koncentrace NO_x v čase pro palivo o $W^r=35\%$	- 44 -
Obr. 24 Graf závislosti koncentrace CO na čase při $T_{vz}= 200^\circ C$	- 45 -
Obr. 25 Graf závislosti koncentrace O_2 v čase pro palivo o $W^r=35\%$	- 45 -
Obr. 26 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=55,8\%$	- 46 -
Obr. 27 Graf závislosti koncentrace CO v čase pro palivo o $W^r=55,8\%$	- 47 -
Obr. 28 Graf závislosti koncentrace NO_x na čase pro palivo o $W^r=55,8\%$	- 48 -
Obr. 29 Graf závislosti koncentrace CO na čase při $T_{vz}= 200^\circ C$	- 48 -
Obr. 30 Graf závislosti koncentrace O_2 na čase pro palivo o $W^r=55,8\%$	- 49 -
Obr. 31 Rychlostní pole vzduchu pro vertikální řez komorou. [21]	- 51 -
Obr. 32 Rychlostní pole pro řez v polovině dohořívacího roštu včetně kapsy.[21].....	- 52 -

EÚ FSI VUT v Brně

Obr. 33 Tlaková ztráta jednotlivých typů vrstev paliva na roštu.[XX]	- 53 -
Obr. 34 Rychlostní pole vzduchu s modelovou vrstvou paliva na roštu. [21]	- 53 -
Obr. 35 Upravená komora kotle Gemos ZKG	- 56 -
Obr. 36 Spalovací komora ZKG s úpravou a rozložením snímačů teplot spalín [16]. -	56 -
Obr. 37 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=35\%$ s úpravou komory.....	- 58 -
Obr. 38 Graf závislosti koncentrace CO v čase pro palivo $W^r=35\%$, úprava komory -	59 -
Obr. 39 Graf závislosti koncentrace NO_x na čase, T v hrdle, $W^r=35\%$,úprava komory-	59 -
Obr. 40 Graf závislosti koncentrace O_2 v čase, T v hrdle , $W^r=35\%$, úprava komory ..	- 60 -
Obr. 41 Graf závislosti koncentrace CO na čase , T v hrdle, $W^r=35\%$, $T_{vz}= 200^\circ C$...	- 60 -
Obr. 42 Graf závislosti teploty v hrdle na čase pro $W^r=55,8 \%$ s úpravou komory....	- 62 -
Obr. 43 Graf závislosti koncentrace CO v čase, palivo: $W^r=55,8\%$, úprava komory. -	62 -
Obr. 44 Graf závislosti koncentrace CO na čase a T v hrdle, $W^r=55,8\%$, $T_{vz}= 200^\circ C$ -	63 -
Obr. 45 Graf závislosti koncentrace NO_x v čase, palivo: $W^r=55,8\%$, úprava komory-	64 -
Obr. 46 Graf závislosti koncentrace O_2 v čase, T hrdle, $W^r=55,8 \%$, úprava komory -	64 -
Obr. 47 Pohled do spalovací komory s provedenou úpravou při spalování.....	- 67 -

12 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Přehled vlhkosti biomasy [4]</i>	<i>- 7 -</i>
<i>Tab. 2 Prvkové složení dřevní biomasy[6]</i>	<i>- 9 -</i>
<i>Tab. 3 Průměrné zastoupení hořlaviny, vody a popeloviny v dřevní biomase [6].....</i>	<i>- 9 -</i>
<i>Tab. 4 Charakteristická zastoupení alkalických kovů ve vzorcích dřevní biomasy [6]-</i>	<i>- 10 -</i>
<i>Tab. 5 Chemické zastoupení sloučenin chloru v dřevní biomase [8].....</i>	<i>- 10 -</i>
<i>Tab. 6 charakteristické teploty popele zemědělských plodin a dřeva [5]</i>	<i>- 11 -</i>
<i>Tab. 7 Vliv chemických látek na teplotu popele [10]</i>	<i>- 12 -</i>
<i>Tab. 8 Vstupní parametry výpočtu</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Tab. 9 Původní stav vzorku v surovém stavu.....</i>	<i>- 19 -</i>
<i>Tab. 10 hustoty jednotlivých veličin spalin [19]</i>	<i>- 23 -</i>
<i>Tab. 11 Entalpie složek spalin v závislosti na teplotě [18]</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Tab. 12 Závislost Entalpie složek spalin na teplotě[19]</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Tab. 13 Závislost Entalpie spalin na teplotě a přebytku vzduchu</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Tab. 14 Závislost měrné tep. kapacity na teplotě složek spalin[18]</i>	<i>- 30 -</i>
<i>Tab. 15 Závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti bez recirkulace</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Tab. 16 Tabulka závislosti ohřevu vzduchu na teplotě nechlazeného plamene</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Tab. 17 Závislost entalpie recirkulovaných spalin na teplotě.....</i>	<i>- 36 -</i>
<i>Tab. 18 Tabulka pro I-T diagram spalin s recirkulací.....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tab. 19 Dávkování paliva</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Tab. 20 Provozní stav komory ZKG pro 35% vlhkost paliva.....</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Tab. 21 Provozní stav komory ZKG při změně nasávaného vzduchu pro 55,8%</i>	<i>- 46 -</i>
<i>Tab. 22 Srovnání naměřených teplot s výpočtovými</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Tab. 23 Tlaková ztráta vrstvy pilin (Pa)</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Tab. 24 Provozní stav komory ZKG s úpravou pro 35% vlhkost paliva</i>	<i>- 57 -</i>
<i>Tab. 25 Provozní stav komory ZKG s úpravou pro 55,8% vlhkost paliva</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Tab. 26 Porovnání výpočtových a naměřených teplot v převáděcím kanále</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Tab. 27 Srovnání průměrných hodnot složek spalin při měření emisí</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Tab. 28 Přbytek vzduchu při experimentu spalování biomasy</i>	<i>- 66 -</i>

13 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

W^r	%	Relativní vlhkost
A^d	%	Popel v hořavině
H^{daf}	%	Vodík v hořavině
C^{daf}	%	Uhlík v hořavině
N^{daf}	%	Dusík v hořavině
S^{daf}	%	Síra v hořavině
O^{daf}	%	Kyslík v hořavině
A^r	%	Popel ve vzorku paliva
H^r	%	Vodík ve vzorku paliva
C^r	%	Uhlík ve vzorku paliva
S^r	%	Síra ve vzorku paliva
N^r	%	Dusík ve vzorku paliva
α	-	Součinitel přebytku vzduchu
P	W	Výkon
O^r	%	Kyslík ve vzorku paliva
Q_s^r	kJ/kg	Spalné teplo paliva
Q_i^r	kJ/kg	Výhřevnost paliva
Vo_2min	m^3/kg_{pal}	Minimální objem kyslíku
V_{vsmin}		Minimální objem suchého vzduchu
V_{H_2O}	-	Objem vodní páry na 1m ³ vzduchu
φ	%	Relativní vlhkost vzduchu
P^c	Pa	Celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu
P^a	Pa	Absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti
f	-	Zvětšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry
V_{vvmin}	m^3/kg_{pal}	Minimální objem vlhkého vzduchu
V_{H_2O}	m^3H_2O/kg_{pal}	Minimální objem vodní páry
V_{vskut}	m^3/kg_{pal}	Skutečné množství vlhkého vzduchu
V_{CO_2}	Nm^3/kg	Objem oxidu uhličitého ve spalínách
V_{SO_2}	Nm^3/kg	Objem oxidu siřičitého ve spalínách
V_{N_2}	Nm^3/kg	Objem dusíku ve spalínách
V_{Ar}	Nm^3/kg	Objem Argonu ve spalínách
V_{SSmin}	m^3/kg_{pal}	Objem suchých spalín
$V_{H_2O}^s$	m^3/kg_{pal}	Objem vodní páry ve spalínách
V_{SVmin}	m^3/kg_{pal}	Minimální objem vlhkých spalín
V_{SV}	m^3/kg_{pal}	Objem vlhkých spalín s přebytkem vzduchu
x_{CO_2}	-	Měrný podíl oxidu uhličitého ve spalínách
x_{SO_2}	-	Měrný podíl oxidu siřičitého ve spalínách
x_{N_2}	-	Měrný podíl dusíku ve spalínách
x_{Ar}	-	Měrný podíl Argonu ve spalínách
x_{H_2O}	-	Měrný podíl vody ve spalínách
x_{vzduch}	-	Měrný podíl vzduchu ve spalínách
ρ_{CO_2}	kg/m^3	Hustota oxidu uhličitého ve spalínách

EÚ FSI VUT v Brně

ρ_{SO_2}	kg/m^3	Husota oxidu siřičitého ve spalinách
ρ_{N_2}	kg/m^3	Husota Dusíku ve spalinách
ρ_{Ar}	kg/m^3	Husota Argonu ve spalinách
ρ_{H_2O}	kg/m^3	Husota vodní páry ve spalinách
ρ_{vzduch}	kg/m^3	Husota vzduchu
ρ_{sp}	kg/m^3	Celková hustota spalin
G_{O_2min}	kg/kg	Hmotové minimální množství spalovacího kyslíku
G_{vSmin}^S	kg/kg	Hmotové minimální množství suchého spalovacího vzduchu
G_{vVmin}^S	kg/kg	Hmotové minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu
Q_{pal}	kJ/kg	Teplo obsažené v palivu
M_{pal}	kg/s	Množství paliva
η	-	Účinnost spalování
i_{vV}	kJ/m^3	Entalpie vlhkého vzduchu
Q_{vzduch}	kJ/m^3	Teplo obsažené ve vzduchu
$Q_{spaliny}$	kJ/m^3	Teplo obsažené ve spalinách
i_{sv}	kJ/m^3	Entalpie spalin
T_{sp}	$^{\circ}\text{C}$	Teplota spalin
I_{smin}^t	kJ/kg	Entalpie spalin při dané teplotě
d	g/kg	Měrné teplo vzduchu
c	$\text{kJ/m}^3\text{K}$	Měrná tepelná kapacita vzduchu
I_{vmin}^t	kJ/kg	Entalpie vzduchu při dané teplotě
I_s^t	kJ/kg	Entalpie spalin
T_{np}	$^{\circ}\text{C}$	Teplota nechlazeného plamene
r	-	Poměr recirkulace
V_s^r	m^3/kg	Objem spalin odebíraných na recirkulaci
V_{svod}	m^3/kg	Objem spalin naměřený v místě odběru
V_{svr}	m^3/kg	Objem spalin na konci kotle s recirkulací
i_{svr}	kJ/m^3	Entalpie recirkulovaných spalin
i_{svod}	kJ/m^3	Entalpie odebíraných spalin na recirkulaci
$(V_{sp} \cdot c)_{sp}$	kJ/kgK	Měrné teplov místě zavedení spalin
$(V_{sp} \cdot c)_{spod}$	kJ/kgK	Měrné teplo spalin, které zůstávají v místě odběru
T_{svr}	$^{\circ}\text{C}$	Teplota spalin po smísení s recirkulovanými spalinami
V_{vvr}	m^3/kg	Množství vzduchu v ohništi při recirkulaci
$V_{CO_2}^r$	Nm^3/kg	Objem oxidu uhličitého v recirkulovaných spalinách
$V_{SO_2}^r$	Nm^3/kg	Objem oxidu siřičitého v recirkulovaných spalinách
$V_{N_2}^r$	Nm^3/kg	Objem dusíku v recirkulovaných spalinách
V_{Ar}^r	Nm^3/kg	Objem Argonu v recirkulovaných spalinách
$V_{H_2O}^r$	Nm^3/kg	Objem vodní páry v recirkulovaných spalinách
i_{sv500}^r	kJ/m^3	Entalpie spalin při recirkulaci r a dané teplotě
CO_{avg}	%	Množství naměřeného oxidu uhelnatého ve spalinách
CO	%	Množství oxidu uhelnatého při referenčním kyslíku ve spalinách

14 PŘÍLOHY

Technická data z analyzátorů spalin pro původní geometrii spalovací komory ZKG.

Analýza spalin $W_r=35\%$, $T_{vz}=25^\circ\text{C}$									
čas	O ₂	CO	CO	CO _{ref}	CO _{ref}	NO _x	Nox	Nox _{ref}	Nox _{ref}
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	12,55	1300	0,13	0,169	2115	78	0,0059	0,0077	101,5
1	13,4	1700	0,17	0,246	3076	24	0,0018	0,0026	34,7
2	12,1	1300	0,13	0,161	2008	68	0,0051	0,0064	84,0
3	13,8	1380	0,138	0,211	2635	56	0,0042	0,0065	85,5
4	9,53	1440	0,144	0,138	1726	72	0,0055	0,0052	69,0
5	12,06	1920	0,192	0,236	2953	46	0,0035	0,0043	56,6
6	11,88	1020	0,102	0,123	1538	64	0,0048	0,0058	77,1
7	14,4	1380	0,138	0,230	2875	42	0,0032	0,0053	69,9
8	9,73	950	0,095	0,093	1159	106	0,0080	0,0078	103,4
9	11,47	830	0,083	0,096	1198	96	0,0073	0,0084	110,7
10	13,86	990	0,099	0,153	1907	70	0,0053	0,0082	107,8
11	10,95	980	0,098	0,107	1341	86	0,0065	0,0071	94,1
12	4,11	3080	0,308	0,201	2507	158	0,0120	0,0078	102,8
13	12,68	1000	0,1	0,132	1653	72	0,0055	0,0072	95,1
14	13,89	1300	0,13	0,201	2514	64	0,0048	0,0075	98,9
15	12,84	1160	0,116	0,156	1955	56	0,0042	0,0057	75,4
16	10,3	930	0,093	0,096	1195	78	0,0059	0,0061	80,1
17	8,41	2040	0,204	0,178	2228	88	0,0067	0,0058	76,8
18	9,58	1100	0,11	0,106	1324	90	0,0068	0,0066	86,6
19	10,3	1640	0,164	0,169	2107	72	0,0055	0,0056	74,0
20	8,92	1760	0,176	0,160	2003	52	0,0039	0,0036	47,3
21	11,65	900	0,09	0,106	1324	82	0,0062	0,0073	96,4
22	10,3	930	0,093	0,096	1195	84	0,0064	0,0065	86,3
23	11,46	1580	0,158	0,182	2277	80	0,0061	0,0070	92,2
24	12,95	920	0,092	0,126	1571	66	0,0050	0,0068	90,1
25	13,31	1250	0,125	0,179	2235	52	0,0039	0,0056	74,3
26	11,7	1620	0,162	0,192	2395	48	0,0036	0,0043	56,7
27	8,27	1660	0,166	0,143	1793	66	0,0050	0,0043	57,0
28	11,32	1220	0,122	0,139	1733	64	0,0048	0,0055	72,7
29	12,26	1120	0,112	0,141	1762	68	0,0051	0,0065	85,5
30	13,96	1560	0,156	0,244	3047	66	0,0050	0,0078	103,0
31	12,31	1280	0,128	0,162	2025	66	0,0050	0,0063	83,5
32	11,35	1460	0,146	0,166	2080	80	0,0061	0,0069	91,1
33	12,93	1160	0,116	0,158	1976	64	0,0048	0,0066	87,2
34	9,74	1880	0,188	0,184	2296	90	0,0068	0,0067	87,9
35	8,55	1660	0,166	0,147	1833	112	0,0085	0,0075	98,9

EÚ FSI VUT v Brně

36	10,8	1360	0,136	0,147	1833	90	0,0068	0,0073	97,0
37	13,16	1300	0,13	0,182	2280	70	0,0053	0,0074	98,1
38	12,16	2360	0,236	0,294	3671	80	0,0061	0,0075	99,5
39	12,78	1040	0,104	0,139	1740	72	0,0055	0,0073	96,3
40	10,61	1080	0,108	0,114	1429	84	0,0064	0,0067	88,9
41	10,93	3160	0,316	0,345	4315	90	0,0068	0,0074	98,2
42	13,19	1260	0,126	0,177	2218	64	0,0048	0,0068	90,1
43	11,91	1200	0,12	0,145	1815	52	0,0039	0,0048	62,9
44	12,91	1820	0,182	0,247	3093	16	0,0012	0,0016	21,7
45	10,53	2220	0,222	0,233	2915	78	0,0059	0,0062	81,9
46	7,19	1000	0,1	0,080	996	102	0,0077	0,0062	81,2
47	12,35	1300	0,13	0,165	2066	56	0,0042	0,0054	71,2
48	12,26	2180	0,218	0,274	3430	60	0,0045	0,0057	75,5
49	13,31	2260	0,226	0,323	4041	20	0,0015	0,0022	28,6
50	12,08	1280	0,128	0,158	1973	84	0,0064	0,0078	103,5
51	10,46	1782	0,1782	0,186	2325	62	0,0047	0,0049	64,7
52	10,43	1700	0,17	0,177	2211	56	0,0042	0,0044	58,2
53	8,72	820	0,082	0,073	918	86	0,0065	0,0058	77,0
54	13,31	840	0,084	0,120	1502	74	0,0056	0,0080	105,8
55	11,64	980	0,098	0,115	1440	80	0,0061	0,0071	93,9
56	9,75	900	0,09	0,088	1100	98	0,0074	0,0073	95,7
57	9,49	1230	0,123	0,118	1469	78	0,0059	0,0056	74,5
58	9,77	1300	0,13	0,127	1592	112	0,0085	0,0083	109,6
59	9,42	680	0,068	0,065	807	92	0,0070	0,0066	87,3
60	11,77	1080	0,108	0,129	1609	64	0,0048	0,0058	76,2
průměr	11,3	1402	0,14	0,163	2039	72,89	0,0055	0,0062	82,5

Analýza spalín $W_r=35\%$, $T_{vz}=100^\circ\text{C}$									
čas	O ₂	CO	CO	CO _{ref}	CO _{ref}	NO _x	Nox	Nox _{ref}	Nox _{ref}
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	10,73	1140	0,114	0,122	1526	96	0,0073	0,0078	102,7
1	11,63	780	0,078	0,092	1145	74	0,0056	0,0066	86,8
2	9,3	560	0,056	0,053	658	96	0,0073	0,0068	90,2
3	10,36	720	0,072	0,074	930	90	0,0068	0,0070	93,0
4	10,66	720	0,072	0,077	957	78	0,0059	0,0063	82,9
5	10,72	830	0,083	0,089	1110	102	0,0077	0,0083	109,1
6	10,16	800	0,08	0,081	1015	80	0,0061	0,0061	81,1
7	11,62	710	0,071	0,083	1041	78	0,0059	0,0069	91,4
8	10,72	840	0,084	0,090	1124	84	0,0064	0,0068	89,8
9	12,48	770	0,077	0,099	1243	80	0,0061	0,0078	103,2
10	5,32	5230	0,523	0,367	4586	116	0,0088	0,0062	81,3
11	11,22	930	0,093	0,105	1308	74	0,0056	0,0063	83,2

EÚ FSI VUT v Brně

12	6,91	680	0,068	0,053	664	96	0,0073	0,0057	74,9
13	8,02	490	0,049	0,042	519	112	0,0085	0,0072	94,8
14	13,22	1100	0,11	0,156	1944	72	0,0055	0,0077	101,7
15	13,43	750	0,075	0,109	1362	66	0,0050	0,0073	95,8
16	10,16	1060	0,106	0,108	1345	90	0,0068	0,0069	91,3
17	12,93	730	0,073	0,100	1244	94	0,0071	0,0097	128,0
18	9,37	1080	0,108	0,102	1277	112	0,0085	0,0080	105,9
19	13,33	740	0,074	0,106	1327	72	0,0055	0,0078	103,2
20	9,43	510	0,051	0,048	606	108	0,0082	0,0078	102,6
21	10,74	600	0,06	0,064	804	86	0,0065	0,0070	92,1
22	11,46	760	0,076	0,088	1095	82	0,0062	0,0072	94,5
23	10,77	610	0,061	0,066	820	66	0,0050	0,0054	70,9
24	11,13	1260	0,126	0,140	1755	88	0,0067	0,0074	98,0
25	12,03	940	0,094	0,115	1441	64	0,0048	0,0059	78,4
26	8,8	700	0,07	0,063	789	96	0,0073	0,0066	86,5
27	11,72	880	0,088	0,104	1304	78	0,0059	0,0070	92,4
28	12,9	1120	0,112	0,152	1901	72	0,0055	0,0074	97,7
29	12,7	880	0,088	0,117	1458	66	0,0050	0,0066	87,4
30	12,68	1540	0,154	0,204	2545	58	0,0044	0,0058	76,6
31	10,56	930	0,093	0,098	1225	78	0,0059	0,0062	82,1
32	12,1	820	0,082	0,101	1267	104	0,0079	0,0097	128,4
33	11,57	690	0,069	0,080	1006	80	0,0061	0,0071	93,2
34	11,61	720	0,072	0,084	1054	84	0,0064	0,0074	98,3
35	10,78	700	0,07	0,075	942	76	0,0058	0,0062	81,7
36	10,7	1580	0,158	0,169	2109	98	0,0074	0,0079	104,6
37	13,98	750	0,075	0,118	1469	84	0,0064	0,0100	131,5
38	12,91	1140	0,114	0,155	1938	110	0,0083	0,0113	149,5
39	9,95	750	0,075	0,075	933	76	0,0058	0,0057	75,6
40	10,24	690	0,069	0,071	882	84	0,0064	0,0065	85,8
41	12,44	740	0,074	0,095	1189	70	0,0053	0,0068	89,9
42	8,98	840	0,084	0,077	961	100	0,0076	0,0069	91,4
43	12,72	740	0,074	0,098	1229	76	0,0058	0,0076	100,9
44	13,46	930	0,093	0,136	1696	62	0,0047	0,0068	90,4
45	12,28	1120	0,112	0,141	1766	60	0,0045	0,0057	75,6
46	10,24	870	0,087	0,089	1112	88	0,0067	0,0068	89,9
47	11,24	980	0,098	0,110	1381	68	0,0051	0,0058	76,6
48	11,2	1380	0,138	0,155	1936	90	0,0068	0,0076	100,9
49	9,4	850	0,085	0,081	1008	90	0,0068	0,0065	85,3
50	12,4	610	0,061	0,078	975	100	0,0076	0,0097	127,8
51	13,15	930	0,093	0,130	1629	86	0,0065	0,0091	120,4
52	12,25	1100	0,11	0,138	1729	80	0,0061	0,0076	100,5
53	10,47	650	0,065	0,068	849	76	0,0058	0,0060	79,3
54	9,56	830	0,083	0,080	998	80	0,0061	0,0058	76,9

EÚ FSI VUT v Brně

55	10,87	720	0,072	0,078	977	104	0,0079	0,0085	112,8
56	12,18	630	0,063	0,079	982	80	0,0061	0,0076	99,7
57	13,27	930	0,093	0,132	1654	68	0,0051	0,0073	96,7
58	12,62	870	0,087	0,114	1428	78	0,0059	0,0078	102,3
59	13,74	740	0,074	0,112	1402	68	0,0051	0,0078	103,0
60	13,6	480	0,048	0,071	892	67	0,0051	0,0075	99,5
průměr	11,3	921	0,09	0,104	1303	83,46	0,0063	0,0072	95,4

Analýza spalín $W_r=35\%$, $T_{vz}=200^\circ\text{C}$									
čas	O ₂	CO	CO	CO_ref	CO_ref	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	11,68	820	0,082	0,097	1210	86	0,0065	0,0077	101,4
1	12,6	930	0,093	0,122	1522	88	0,0067	0,0087	115,2
2	9,67	830	0,083	0,081	1007	90	0,0068	0,0066	87,3
3	13,69	710	0,071	0,107	1335	104	0,0079	0,0118	156,4
4	8,77	590	0,059	0,053	663	112	0,0085	0,0076	100,7
5	10,62	460	0,046	0,049	609	112	0,0085	0,0090	118,6
6	11,86	690	0,069	0,083	1038	92	0,0070	0,0084	110,6
7	9,86	500	0,05	0,049	617	96	0,0073	0,0072	94,7
8	13,31	620	0,062	0,089	1109	70	0,0053	0,0076	100,1
9	10,42	730	0,073	0,076	949	92	0,0070	0,0072	95,6
10	9,5	880	0,088	0,084	1052	104	0,0079	0,0075	99,4
11	10,75	510	0,051	0,055	684	98	0,0074	0,0080	105,1
12	12,13	520	0,052	0,064	806	86	0,0065	0,0081	106,6
13	12,68	580	0,058	0,077	959	76	0,0058	0,0076	100,4
14	12,61	630	0,063	0,083	1032	70	0,0053	0,0069	91,7
15	13,26	680	0,068	0,097	1208	66	0,0050	0,0071	93,7
16	9,56	680	0,068	0,065	817	88	0,0067	0,0064	84,6
17	13,34	770	0,077	0,111	1382	78	0,0059	0,0085	111,9
18	12,48	460	0,046	0,059	742	72	0,0055	0,0070	92,9
19	11,11	820	0,082	0,091	1140	90	0,0068	0,0076	100,0
20	13,47	730	0,073	0,107	1333	60	0,0045	0,0066	87,6
21	12,77	610	0,061	0,082	1019	78	0,0059	0,0079	104,2
22	10,98	460	0,046	0,050	631	94	0,0071	0,0078	103,1
23	11,86	440	0,044	0,053	662	78	0,0059	0,0071	93,8
24	12,6	1040	0,104	0,136	1702	90	0,0068	0,0089	117,8
25	11,43	640	0,064	0,074	920	82	0,0062	0,0071	94,2
26	12,12	680	0,068	0,084	1053	82	0,0062	0,0077	101,5
27	11,65	720	0,072	0,085	1059	70	0,0053	0,0062	82,3
28	11,17	590	0,059	0,066	825	86	0,0065	0,0073	96,2
29	11,8	580	0,058	0,069	867	88	0,0067	0,0080	105,1
30	12,75	640	0,064	0,085	1067	74	0,0056	0,0075	98,6

EÚ FSI VUT v Brně

31	12,8	880	0,088	0,118	1476	72	0,0055	0,0073	96,5
32	12,16	640	0,064	0,080	995	78	0,0059	0,0073	97,0
33	10,99	410	0,041	0,045	563	94	0,0071	0,0078	103,2
34	11,06	700	0,07	0,077	968	88	0,0067	0,0074	97,3
35	11,17	1080	0,108	0,121	1511	104	0,0079	0,0088	116,3
36	11,13	1080	0,108	0,120	1505	132	0,0100	0,0111	147,0
37	12,96	560	0,056	0,077	958	94	0,0071	0,0097	128,5
38	11,13	840	0,084	0,094	1170	128	0,0097	0,0108	142,5
39	8,74	5230	0,523	0,469	5866	120	0,0091	0,0082	107,6
40	11,97	490	0,049	0,060	746	80	0,0061	0,0074	97,4
41	10,76	630	0,063	0,068	846	88	0,0067	0,0072	94,5
42	12,95	520	0,052	0,071	888	62	0,0047	0,0064	84,7
43	12,28	770	0,077	0,097	1214	82	0,0062	0,0078	103,4
44	11,15	450	0,045	0,050	628	84	0,0064	0,0071	93,7
45	10,99	1000	0,1	0,110	1374	124	0,0094	0,0103	136,2
46	11,32	850	0,085	0,097	1207	80	0,0061	0,0069	90,8
47	12,88	1520	0,152	0,206	2574	96	0,0073	0,0098	130,0
48	12,77	470	0,047	0,063	785	66	0,0050	0,0067	88,1
49	12,29	430	0,043	0,054	679	70	0,0053	0,0067	88,3
50	10,64	580	0,058	0,062	770	90	0,0068	0,0072	95,5
51	12,92	390	0,039	0,053	664	66	0,0050	0,0068	89,8
52	12,72	390	0,039	0,052	648	72	0,0055	0,0072	95,6
53	12,23	460	0,046	0,058	721	70	0,0053	0,0066	87,7
54	13,05	500	0,05	0,069	865	64	0,0048	0,0067	88,5
55	10,31	820	0,082	0,084	1055	76	0,0058	0,0059	78,1
56	13,42	550	0,055	0,080	998	56	0,0042	0,0062	81,2
57	10,84	650	0,065	0,070	880	82	0,0062	0,0067	88,7
58	9,76	420	0,042	0,041	514	110	0,0083	0,0081	107,6
59	11,36	430	0,043	0,049	613	82	0,0062	0,0071	93,5
60	10,7	480	0,048	0,051	641	89	0,0067	0,0072	95,0
průměr	11,7	734	0,07	0,086	1071	86,08	0,0065	0,0077	101,6

Analýza spalín $W_r=35\%$, $T_{vz}=25^\circ\text{C}$									
čas	O ₂	CO	CO _{ref}	CO _{ref}	CO ₂	NO _x	Nox	Nox _{ref}	Nox _{ref}
[min]	[%]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[%]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	12,72	0,57	0,757	9466	9,28	40	0,0030	0,0040	53,1
1	15,7	0,77	1,598	19976	6,07	39	0,0030	0,0061	80,9
2	15,72	0,88	1,833	22917	6,7	60	0,0045	0,0095	124,9
3	13,64	1,13	1,689	21111	9,01	84	0,0064	0,0095	125,4
4	14,13	1,41	2,258	28221	8,44	118	0,0089	0,0143	188,8
5	12,8	1,26	1,690	21128	9,46	122	0,0092	0,0124	163,5
6	12,15	1,36	1,690	21130	10,84	114	0,0086	0,0107	141,6
7	14,15	0,72	1,156	14453	8,03	80	0,0061	0,0097	128,4

EÚ FSI VUT v Brně

8	14,71	0,95	1,661	20767	8,3	70	0,0053	0,0093	122,3
9	13,86	1,04	1,602	20028	8,55	86	0,0065	0,0100	132,4
10	14,62	0,89	1,534	19181	7,72	76	0,0058	0,0099	130,9
11	14,4	1,07	1,783	22292	8,1	86	0,0065	0,0109	143,2
12	13,6	1,17	1,739	21740	9,82	100	0,0076	0,0113	148,5
13	13,37	1,14	1,644	20544	8,2	94	0,0071	0,0103	135,4
14	13,49	1,14	1,670	20872	9,4	100	0,0076	0,0111	146,4
15	14,15	0,83	1,333	16661	8,41	80	0,0061	0,0097	128,4
16	14,7	1,12	1,956	24444	7,55	82	0,0062	0,0108	143,1
17	13,36	1,3	1,872	23397	9,06	118	0,0089	0,0129	169,8
18	13,06	1,24	1,718	21474	9,65	110	0,0083	0,0115	152,3
19	12,72	1,41	1,873	23415	9,96	156	0,0118	0,0157	207,1
20	12,61	1,1	1,442	18027	9,99	118	0,0089	0,0117	154,6
21	15,15	0,81	1,523	19038	8,19	84	0,0064	0,0120	157,8
22	14,8	0,82	1,455	18185	6,75	84	0,0064	0,0113	148,9
23	14,72	0,84	1,471	18392	7,4	96	0,0073	0,0127	168,0
24	14,2	1,02	1,650	20625	7,73	96	0,0073	0,0118	155,2
25	14,99	0,73	1,336	16701	7,3	80	0,0061	0,0111	146,3
26	15,226	0,87	1,657	20718	6,77	68	0,0051	0,0098	129,4
27	15,53	0,86	1,729	21618	6,1	74	0,0056	0,0113	148,7
28	14,87	0,84	1,507	18842	5,96	90	0,0068	0,0122	161,4
29	13,53	0,95	1,399	17487	7,64	112	0,0085	0,0125	164,8
30	14,29	0,85	1,393	17418	7,17	98	0,0074	0,0122	160,5
31	13,06	0,89	1,233	15412	8,24	104	0,0079	0,0109	144,0
32	15,08	1,03	1,914	23923	7,05	86	0,0065	0,0121	159,7
33	14,21	0,91	1,474	18428	7,13	122	0,0092	0,0150	197,5
34	13,019	1,13	1,557	19468	8,59	112	0,0085	0,0117	154,2
35	14,37	0,92	1,526	19080	7,79	76	0,0058	0,0095	126,0
36	14,8	0,88	1,561	19516	7,66	68	0,0051	0,0091	120,6
37	14,07	0,9	1,429	17857	7,25	88	0,0067	0,0106	139,6
38	14,66	0,9	1,562	19519	7,1	88	0,0067	0,0116	152,6
39	13,83	0,9	1,381	17259	8,07	102	0,0077	0,0118	156,4
40	12,86	1,05	1,419	17736	9,57	90	0,0068	0,0092	121,5
41	13,05	0,95	1,314	16431	8,12	84	0,0064	0,0088	116,1
42	13,67	0,92	1,381	17258	8,16	81	0,0061	0,0092	121,5
43	14,22	0,91	1,476	18455	7,84	76	0,0058	0,0093	123,2
44	14,48	0,89	1,502	18769	7,38	80	0,0061	0,0102	134,9
45	14,21	0,93	1,507	18833	7,46	94	0,0071	0,0115	152,2
46	13,32	1	1,432	17904	8,53	92	0,0070	0,0100	131,7
47	14,26	1,02	1,665	20809	8,04	102	0,0077	0,0126	166,3
48	14,2	1,03	1,666	20827	7,66	98	0,0074	0,0120	158,4
49	13,57	1,04	1,540	19246	8,37	80	0,0061	0,0090	118,3
50	14,19	0,95	1,535	19181	7,13	102	0,0077	0,0125	164,6

EÚ FSI VUT v Brně

51	13,3	1,01	1,443	18036	8,76	90	0,0068	0,0097	128,5
52	14,9	1,02	1,839	22992	7,78	68	0,0051	0,0093	122,5
53	15,23	0,84	1,601	20017	6,02	82	0,0062	0,0118	156,2
54	14,03	0,89	1,405	17557	7,59	86	0,0065	0,0103	135,6
55	14,44	1,06	1,777	22218	6,4	134	0,0101	0,0170	224,5
56	13,71	1,12	1,690	21125	7,34	156	0,0118	0,0178	235,2
57	13,47	0,91	1,329	16617	8,75	82	0,0062	0,0091	119,7
58	14,76	0,9	1,587	19832	6,86	94	0,0071	0,0125	165,6
59	13,78	1,08	1,645	20568	7,82	120	0,0091	0,0138	182,7
60	14,1	1,02	1,626	20326	7,81	97	0,0073	0,0117	154,5
průměr	14,06	0,99	1,568	19598	7,96	92,61	0,0070	0,0111	146,7

Analýza spalin $W_r=55,8\%$, $T_{vz}=100^\circ\text{C}$									
čas	O ₂	CO	CO_ref	CO_ref	CO ₂	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[%]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	12,77	1,09	1,457	18211	9,9	102	0,0077	0,0103	136,2
1	12,34	1,3	1,651	20641	9,95	116	0,0088	0,0112	147,2
2	11,32	1,41	1,602	20028	10,1	117	0,0089	0,0101	132,9
3	9,64	1,56	1,511	18882	12,67	166	0,0126	0,0122	160,6
4	8,51	0,75	0,661	8257	13,1	108	0,0082	0,0072	95,0
5	10,45	1,12	1,168	14597	12,6	106	0,0080	0,0084	110,4
6	11,26	1,23	1,389	17364	11,9	98	0,0074	0,0084	110,6
7	10,42	1,05	1,092	13646	11,84	112	0,0085	0,0088	116,4
8	11,32	1,25	1,420	17756	11,62	107	0,0081	0,0092	121,5
9	10,3	1,09	1,121	14007	12,54	104	0,0079	0,0081	106,8
10	8,28	0,94	0,813	10161	13,83	130	0,0098	0,0085	112,3
11	8,41	0,84	0,734	9174	13,99	110	0,0083	0,0073	96,0
12	8,95	0,89	0,812	10156	13,42	113	0,0086	0,0078	103,1
13	9,24	1,01	0,945	11809	13,12	108	0,0082	0,0076	100,9
14	3,32	1,29	0,803	10033	17,72	164	0,0124	0,0077	102,0
15	9,46	0,32	0,305	3813	8,2	62	0,0047	0,0045	59,1
16	13,13	0,38	0,531	6639	7,32	46	0,0035	0,0049	64,2
17	8,04	0,34	0,289	3607	12,44	106	0,0080	0,0068	89,9
18	8,92	0,42	0,382	4781	12,35	112	0,0085	0,0077	101,9
19	8,59	0,359	0,318	3978	12,19	96	0,0073	0,0064	85,0
20	11,97	0,56	0,682	8527	9,72	63	0,0048	0,0058	76,7
21	12,22	0,65	0,814	10179	8,65	56	0,0042	0,0053	70,1
22	6,89	0,55	0,429	5360	14,61	106	0,0080	0,0063	82,6
23	8,62	0,62	0,551	6886	13,56	99	0,0075	0,0067	87,9
24	8,69	0,51	0,456	5697	14,97	88	0,0067	0,0060	78,6
25	9,45	0,51	0,486	6071	11,86	82	0,0062	0,0059	78,0
26	8,12	0,59	0,504	6299	14,21	108	0,0082	0,0070	92,2
27	7,64	0,6	0,494	6175	13,87	94	0,0071	0,0059	77,3

EÚ FSI VUT v Brně

28	11,64	1,78	2,092	26149	11,55	82	0,0062	0,0073	96,3
29	7,9	0,53	0,445	5563	14,04	102	0,0077	0,0065	85,6
30	12,029	1,08	1,324	16553	9,3	62	0,0047	0,0058	76,0
31	12,31	0,9	1,139	14241	9,55	56	0,0042	0,0054	70,8
32	10,62	0,69	0,731	9140	13,56	82	0,0062	0,0066	86,8
33	5,12	0,66	0,457	5715	16,51	145	0,0110	0,0076	100,4
34	10,52	0,46	0,483	6035	10,53	70	0,0053	0,0056	73,4
35	10,43	1,56	1,623	20293	1165	98	0,0074	0,0077	101,9
36	7,42	0,51	0,413	5164	13,83	118	0,0089	0,0072	95,5
37	7,36	0,53	0,427	5343	14,75	88	0,0067	0,0054	70,9
38	7,96	0,5	0,422	5272	13,22	104	0,0079	0,0066	87,7
39	8,54	0,46	0,406	5076	12,76	106	0,0080	0,0071	93,5
40	9,32	0,59	0,556	6946	11,68	74	0,0056	0,0053	69,6
41	10,66	0,56	0,596	7447	11,2	70	0,0053	0,0056	74,4
42	8,65	0,65	0,579	7237	13,52	84	0,0064	0,0057	74,8
43	9,12	0,62	0,574	7176	12,664	116	0,0088	0,0081	107,3
44	7,68	1,35	1,115	13936	14,23	104	0,0079	0,0065	85,8
45	11,94	0,52	0,631	7892	10,29	58	0,0044	0,0053	70,4
46	12,08	0,49	0,604	7553	9,26	72	0,0055	0,0067	88,7
47	10,49	0,61	0,638	7980	11,85	78	0,0059	0,0062	81,6
48	11,03	0,85	0,938	11723	10,51	84	0,0064	0,0070	92,6
49	10,84	0,52	0,563	7037	10,48	81	0,0061	0,0066	87,6
50	9,67	1,23	1,194	14927	12,16	66	0,0050	0,0049	64,0
51	8,79	0,71	0,640	7995	12,86	38	0,0029	0,0026	34,2
52	11,63	0,54	0,634	7924	9,97	36	0,0027	0,0032	42,2
53	7,42	0,72	0,583	7290	13,55	54	0,0041	0,0033	43,7
54	8,2	0,56	0,481	6016	13,09	82	0,0062	0,0053	70,4
55	9,2	0,48	0,447	5593	12,63	108	0,0082	0,0076	100,6
56	8,6	0,44	0,390	4879	11,8	64	0,0048	0,0043	56,7
57	7,06	0,51	0,402	5030	12,26	76	0,0058	0,0045	59,9
58	11,13	0,49	0,546	6826	10,41	62	0,0047	0,0052	69,0
59	9,13	0,49	0,454	5676	13,47	69	0,0052	0,0048	63,9
60	10,2	0,57	0,581	7257	12,9	72	0,0055	0,0056	73,3
průměr	9,56	0,76	0,76	9535	31,11	90,82	0,0069	0,0066	87,6

Analýza spalín $W_r=55,8\%$, $T_{vz}=200^\circ\text{C}$									
čas	O ₂	CO	CO _{ref}	CO _{ref}	CO ₂	NO _x	Nox	Nox _{ref}	Nox _{ref}
[min]	[%]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[%]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	10,01	0,41	0,41	5130	11,17	84	0,0064	0,0064	84,0
1	8,89	0,26	0,24	2952	11,82	78	0,0059	0,0054	70,8
2	10,03	0,24	0,24	3008	10,41	56	0,0042	0,0043	56,1
3	12,32	0,34	0,43	5386	9,22	38	0,0029	0,0036	48,1
4	7,58	0,38	0,31	3893	13,92	106	0,0080	0,0066	86,8

EÚ FSI VUT v Brně

5	9,44	0,34	0,32	4044	11,32	58	0,0044	0,0042	55,1
6	11,95	0,31	0,38	4710	9,55	36	0,0027	0,0033	43,7
7	9,23	0,45	0,42	5257	11,9	52	0,0039	0,0037	48,6
8	10,81	0,35	0,38	4723	10,68	56	0,0042	0,0046	60,4
9	12,75	0,47	0,63	7833	8,67	42	0,0032	0,0042	56,0
10	11,16	0,38	0,42	5310	11,53	54	0,0041	0,0046	60,3
11	10,58	0,55	0,58	7258	11,3	56	0,0042	0,0045	59,1
12	12,15	0,51	0,63	7924	9,1	58	0,0044	0,0055	72,0
13	11,68	0,54	0,64	7967	9,18	134	0,0101	0,0120	158,0
14	10,3	0,32	0,33	4112	12,03	88	0,0067	0,0068	90,4
15	9,35	0,43	0,41	5075	11,19	98	0,0074	0,0070	92,5
16	10,22	0,39	0,40	4974	12,07	78	0,0059	0,0060	79,5
17	9,22	0,33	0,31	3852	11,98	114	0,0086	0,0081	106,4
18	10,04	0,34	0,34	4266	12,44	112	0,0085	0,0085	112,3
19	10,2	0,31	0,32	3947	12,07	92	0,0070	0,0071	93,6
20	8,89	0,29	0,26	3293	11,94	108	0,0082	0,0074	98,0
21	10,14	0,27	0,27	3419	11,12	112	0,0085	0,0086	113,4
22	8,54	0,49	0,43	5407	12,45	74	0,0056	0,0049	65,3
23	10,45	0,23	0,24	2998	11,87	66	0,0050	0,0052	68,8
24	10,11	0,26	0,26	3283	12,79	78	0,0059	0,0060	78,7
25	10,52	0,45	0,47	5904	10,89	90	0,0068	0,0072	94,4
26	9,08	0,36	0,33	4153	12,43	98	0,0074	0,0068	90,4
27	10,61	0,4	0,42	5294	11,44	92	0,0070	0,0074	97,3
28	10,4	0,36	0,37	4670	10,51	64	0,0048	0,0050	66,4
29	8,11	0,31	0,26	3307	12,8	134	0,0101	0,0087	114,3
30	9,97	0,51	0,51	6358	10,73	130	0,0098	0,0098	129,5
31	5,85	0,42	0,30	3812	14,75	80	0,0061	0,0044	58,0
32	9,82	0,35	0,34	4305	10,8	72	0,0055	0,0054	70,8
33	8,8	0,27	0,24	3043	14,4	76	0,0058	0,0052	68,5
34	10,1	0,38	0,38	4794	9,46	94	0,0071	0,0072	94,8
35	11,2	0,29	0,33	4069	10,56	98	0,0074	0,0083	109,9
36	9,7	0,35	0,34	4259	10,35	78	0,0059	0,0057	75,9
37	10,55	0,47	0,49	6184	10,04	94	0,0071	0,0075	98,9
38	11,3	0,36	0,41	5103	9,74	136	0,0103	0,0117	154,1
39	8,3	0,37	0,32	4006	10,39	126	0,0095	0,0083	109,1
40	11,2	0,2	0,22	2806	10,61	86	0,0065	0,0073	96,5
41	12,6	0,31	0,41	5074	8,89	72	0,0055	0,0071	94,2
42	10,7	0,28	0,30	3738	10,26	58	0,0044	0,0047	61,9
43	11,37	0,32	0,37	4569	9,56	52	0,0039	0,0045	59,4
44	10,19	0,36	0,37	4579	11,17	58	0,0044	0,0045	59,0
45	10,74	0,39	0,42	5227	10,21	70	0,0053	0,0057	75,0
46	9,57	0,49	0,47	5895	10,43	90	0,0068	0,0066	86,5
47	7,78	0,39	0,32	4056	12,76	138	0,0104	0,0087	114,7

EÚ FSI VUT v Brně

48	6,68	0,58	0,45	5569	14,2	168	0,0127	0,0098	129,0
49	8,8	0,3	0,27	3381	12,8	148	0,0112	0,0101	133,3
50	9,64	0,31	0,30	3752	11,7	170	0,0129	0,0125	164,5
51	9,54	0,38	0,36	4559	11,09	186	0,0141	0,0135	178,4
52	10,21	0,34	0,35	4333	10,9	172	0,0130	0,0133	175,2
53	11,38	0,35	0,40	5003	9,63	204	0,0154	0,0177	233,1
54	9,75	0,41	0,40	5011	10,13	212	0,0160	0,0157	207,1
55	9,54	0,39	0,37	4679	10,46	210	0,0159	0,0153	201,4
56	11,08	0,34	0,38	4713	9,27	216	0,0164	0,0181	239,3
57	9,81	0,44	0,43	5407	9,88	208	0,0157	0,0155	204,3
58	8,7	0,4	0,36	4472	12,43	166	0,0126	0,0112	148,3
59	9,33	0,39	0,37	4595	11,24	162	0,0123	0,0116	152,6
60	10,7	0,37	0,40	4939	10,21	174	0,0132	0,0141	185,7
průměr	9,99	0,37	0,37	4683	11,13	105,08	0,0080	0,0079	104,7

Technická data z analyzátorů spalín s modifikovanou geometrií spalovací komory ZKG.

Analýza spalín $W_r=35\%$, $T_{vz}=25^\circ\text{C}$, úprava komory									
čas	O ₂	CO	CO	CO_ref	CO_ref	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	10,4	135	0,0135	0,014	175	130	0,0098	0,0102	134,8
1	10,38	170	0,017	0,018	220	110	0,0083	0,0086	113,8
2	10,81	120	0,012	0,013	162	110	0,0083	0,0090	118,7
3	10,62	200	0,02	0,021	265	102	0,0077	0,0082	108,0
4	11,2	120	0,012	0,013	168	106	0,0080	0,0090	118,9
5	12,12	160	0,016	0,020	248	108	0,0082	0,0101	133,7
6	11,25	120	0,012	0,014	169	100	0,0076	0,0085	112,7
7	9,96	110	0,011	0,011	137	102	0,0077	0,0077	101,6
8	9,18	130	0,013	0,012	151	110	0,0083	0,0077	102,3
9	10,2	180	0,018	0,018	229	98	0,0074	0,0076	99,7
10	8,92	90	0,009	0,008	102	116	0,0088	0,0080	105,5
11	10,33	89	0,0089	0,009	115	98	0,0074	0,0076	101,0
12	9,92	60	0,006	0,006	74	104	0,0079	0,0078	103,2
13	10,99	91	0,0091	0,010	125	96	0,0073	0,0080	105,4
14	11,11	90	0,009	0,010	125	130	0,0098	0,0109	144,5
15	12	80	0,008	0,010	122	98	0,0074	0,0091	119,7
16	11,33	120	0,012	0,014	171	90	0,0068	0,0078	102,3
17	10,47	80	0,008	0,008	104	100	0,0076	0,0079	104,4
18	11,46	100	0,01	0,012	144	98	0,0074	0,0086	112,9
19	11,01	100	0,01	0,011	138	90	0,0068	0,0075	99,0
20	12,18	80	0,008	0,010	125	94	0,0071	0,0089	117,1
21	12,2	110	0,011	0,014	172	86	0,0065	0,0081	107,4
22	11,83	80	0,008	0,010	120	90	0,0068	0,0082	107,9
23	12,09	80	0,008	0,010	123	86	0,0065	0,0080	106,1

EÚ FSI VUT v Brně

24	11,93	80	0,008	0,010	121	94	0,0071	0,0086	113,9
25	11,23	110	0,011	0,012	155	90	0,0068	0,0077	101,3
26	12,41	110	0,011	0,014	176	94	0,0071	0,0091	120,3
27	12	110	0,011	0,013	168	90	0,0068	0,0083	109,9
28	11,8	120	0,012	0,014	179	92	0,0070	0,0083	109,9
29	11,61	110	0,011	0,013	161	84	0,0064	0,0074	98,3
30	11,75	120	0,012	0,014	178	90	0,0068	0,0081	106,9
31	12	90	0,009	0,011	138	82	0,0062	0,0076	100,1
32	10,9	130	0,013	0,014	177	92	0,0070	0,0076	100,1
33	11,14	80	0,008	0,009	112	82	0,0062	0,0069	91,4
34	11,25	100	0,01	0,011	141	78	0,0059	0,0067	87,9
35	11,12	70	0,007	0,008	97	86	0,0065	0,0072	95,7
36	11,2	90	0,009	0,010	126	94	0,0071	0,0080	105,4
37	11,72	90	0,009	0,011	133	82	0,0062	0,0074	97,1
38	11,42	100	0,01	0,011	144	85	0,0064	0,0074	97,5
39	10,59	90	0,009	0,010	119	86	0,0065	0,0069	90,8
40	11,14	60	0,006	0,007	84	90	0,0068	0,0076	100,3
41	11,02	150	0,015	0,017	207	80	0,0061	0,0067	88,1
42	10,62	70	0,007	0,007	93	84	0,0064	0,0067	88,9
43	10,82	60	0,006	0,006	81	84	0,0064	0,0069	90,7
44	11,72	70	0,007	0,008	104	88	0,0067	0,0079	104,2
45	12,99	50	0,005	0,007	86	80	0,0061	0,0083	109,8
46	13,08	110	0,011	0,015	191	84	0,0064	0,0088	116,6
47	13,2	68	0,0068	0,010	120	72	0,0055	0,0077	101,5
48	11,7	90	0,009	0,011	133	74	0,0056	0,0066	87,5
49	13,1	10	0,001	0,001	17	66	0,0050	0,0070	91,8
50	12,6	120	0,012	0,016	196	74	0,0056	0,0073	96,8
51	12,65	110	0,011	0,014	181	72	0,0055	0,0072	94,8
52	13,17	80	0,008	0,011	140	78	0,0059	0,0083	109,5
53	12,03	160	0,016	0,020	245	84	0,0064	0,0078	102,9
54	12,5	130	0,013	0,017	210	74	0,0056	0,0072	95,7
55	12,05	160	0,016	0,020	246	78	0,0059	0,0073	95,8
56	11,45	120	0,012	0,014	173	84	0,0064	0,0073	96,7
57	11,48	160	0,016	0,018	231	80	0,0061	0,0070	92,4
58	11,23	120	0,012	0,014	169	84	0,0064	0,0072	94,5
59	10,26	10	0,001	0,001	13	88	0,0067	0,0068	90,1
60	12,05	110	0,011	0,014	169	80	0,0061	0,0074	98,2
průměr	11,4	103	0,01	0,012	149	90,67	0,0069	0,0079	104,2

EÚ FSI VUT v Brně

Analýza spalín $W_r=35\%$, $T_{vz}=100^\circ\text{C}$, úprava komory									
čas	O ₂	CO	CO	CO_ref	CO_ref	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	12,63	90	0,009	0,012	148	74	0,0056	0,0074	97,2
1	12,89	220	0,022	0,030	373	68	0,0051	0,0070	92,2
2	12,15	80	0,008	0,010	124	60	0,0045	0,0056	74,5
3	11,48	110	0,011	0,013	159	80	0,0061	0,0070	92,4
4	11,24	120	0,012	0,014	169	88	0,0067	0,0075	99,1
5	8,5	130	0,013	0,011	143	115	0,0087	0,0077	101,1
6	10,67	170	0,017	0,018	226	80	0,0061	0,0064	85,1
7	10,58	140	0,014	0,015	185	83	0,0063	0,0066	87,6
8	11,52	120	0,012	0,014	174	80	0,0061	0,0070	92,8
9	10,99	90	0,009	0,010	124	79	0,0060	0,0066	86,7
10	12,33	60	0,006	0,008	95	86	0,0065	0,0083	109,0
11	11,05	130	0,013	0,014	180	84	0,0064	0,0070	92,8
12	11,68	50	0,005	0,006	74	80	0,0061	0,0071	94,3
13	12,24	80	0,008	0,010	126	84	0,0064	0,0080	105,4
14	12,73	40	0,004	0,005	67	82	0,0062	0,0083	109,0
15	10,24	77	0,0077	0,008	98	90	0,0068	0,0070	91,9
16	12,33	86	0,0086	0,011	136	84	0,0064	0,0081	106,5
17	12,65	90	0,009	0,012	148	80	0,0061	0,0080	105,3
18	13,35	60	0,006	0,009	108	80	0,0061	0,0087	114,9
19	11,6	110	0,011	0,013	161	90	0,0068	0,0080	105,2
20	12,43	80	0,008	0,010	128	76	0,0058	0,0074	97,5
21	12,01	76	0,0076	0,009	116	81	0,0061	0,0075	99,0
22	11,15	130	0,013	0,015	181	76	0,0058	0,0064	84,8
23	11,28	90	0,009	0,010	127	72	0,0055	0,0062	81,4
24	12,36	100	0,01	0,013	159	76	0,0058	0,0073	96,7
25	12,51	70	0,007	0,009	113	70	0,0053	0,0069	90,6
26	12,49	60	0,006	0,008	97	80	0,0061	0,0078	103,3
27	12,07	70	0,007	0,009	108	72	0,0055	0,0067	88,6
28	10,9	90	0,009	0,010	123	82	0,0062	0,0068	89,2
29	12,34	70	0,007	0,009	111	84	0,0064	0,0081	106,6
30	12,5	110	0,011	0,014	178	80	0,0061	0,0078	103,5
31	11,49	130	0,013	0,015	188	90	0,0068	0,0079	104,0
32	12,637	70	0,007	0,009	115	76	0,0058	0,0076	99,9
33	12,93	80	0,008	0,011	136	72	0,0055	0,0074	98,1
34	12,43	110	0,011	0,014	176	76	0,0058	0,0074	97,5
35	13,2	80	0,008	0,011	141	68	0,0051	0,0073	95,8
36	11,05	130	0,013	0,014	180	78	0,0059	0,0065	86,2
37	11,79	80	0,008	0,010	119	72	0,0055	0,0065	85,9
38	11,4	120	0,012	0,014	172	76	0,0058	0,0066	87,0
39	12,46	100	0,01	0,013	161	74	0,0056	0,0072	95,2

EÚ FSI VUT v Brně

40	13,19	80	0,008	0,011	141	78	0,0059	0,0083	109,8
41	13,18	90	0,009	0,013	158	76	0,0058	0,0081	106,8
42	11,93	100	0,01	0,012	152	74	0,0056	0,0068	89,7
43	11,66	130	0,013	0,015	191	72	0,0055	0,0064	84,7
44	11	90	0,009	0,010	124	78	0,0059	0,0065	85,7
45	11,84	90	0,009	0,011	135	72	0,0055	0,0065	86,4
46	10,05	160	0,016	0,016	201	90	0,0068	0,0068	90,3
47	11,64	120	0,012	0,014	176	78	0,0059	0,0069	91,6
48	12,12	140	0,014	0,017	217	74	0,0056	0,0069	91,6
49	12,44	80	0,008	0,010	129	72	0,0055	0,0070	92,5
50	11,61	80	0,008	0,009	117	78	0,0059	0,0069	91,3
51	11,61	70	0,007	0,008	103	76	0,0058	0,0067	89,0
52	12,21	90	0,009	0,011	141	80	0,0061	0,0076	100,0
53	11,48	100	0,01	0,012	144	74	0,0056	0,0065	85,4
54	11,77	90	0,009	0,011	134	80	0,0061	0,0072	95,3
55	11,67	80	0,008	0,009	118	78	0,0059	0,0070	91,9
56	10,85	130	0,013	0,014	176	86	0,0065	0,0071	93,1
57	11,07	100	0,01	0,011	138	84	0,0064	0,0070	93,0
58	12,8	80	0,008	0,011	134	78	0,0059	0,0079	104,6
59	13,25	80	0,008	0,011	142	72	0,0055	0,0077	102,1
60	13,6	80	0,008	0,012	149	67	0,0051	0,0075	99,5
průměr	11,9	98	0,01	0,012	147	78,61	0,0060	0,0072	95,2

Analýza spalín $W_r=35\%$, $T_{vz}=200^\circ\text{C}$, úprava komory									
čas	O ₂	CO	CO	CO_ref	CO_ref	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	10,46	160	0,016	0,017	209	91	0,0069	0,0072	94,9
1	12,06	180	0,018	0,022	277	74	0,0056	0,0069	91,0
2	11,61	130	0,013	0,015	190	84	0,0064	0,0074	98,3
3	11,46	140	0,014	0,016	202	80	0,0061	0,0070	92,2
4	11,25	210	0,021	0,024	296	88	0,0067	0,0075	99,2
5	12,25	80	0,008	0,010	126	76	0,0058	0,0072	95,5
6	12,12	100	0,01	0,012	155	78	0,0059	0,0073	96,5
7	11,99	100	0,01	0,012	153	86	0,0065	0,0079	104,9
8	12,95	70	0,007	0,010	120	78	0,0059	0,0081	106,5
9	12,41	80	0,008	0,010	128	82	0,0062	0,0079	104,9
10	12,16	110	0,011	0,014	171	76	0,0058	0,0072	94,5
11	13,1	120	0,012	0,017	209	82	0,0062	0,0086	114,1
12	11,75	140	0,014	0,017	208	84	0,0064	0,0076	99,8
13	11,41	120	0,012	0,014	172	80	0,0061	0,0069	91,7
14	12,6	120	0,012	0,016	196	78	0,0059	0,0077	102,1
15	12,91	110	0,011	0,015	187	80	0,0061	0,0082	108,7

EÚ FSI VUT v Brně

16	12,67	100	0,01	0,013	165	74	0,0056	0,0074	97,6
17	12,21	130	0,013	0,016	203	76	0,0058	0,0072	95,0
18	12,68	85	0,0085	0,011	140	74	0,0056	0,0074	97,8
19	13,4	90	0,009	0,013	163	72	0,0055	0,0079	104,1
20	13,28	103	0,0103	0,015	183	76	0,0058	0,0082	108,2
21	12,91	120	0,012	0,016	204	76	0,0058	0,0078	103,3
22	12,08	160	0,016	0,020	247	78	0,0059	0,0073	96,1
23	13,15	110	0,011	0,015	193	73	0,0055	0,0077	102,2
24	12,18	190	0,019	0,024	296	72	0,0055	0,0068	89,7
25	12,36	180	0,018	0,023	286	74	0,0056	0,0071	94,1
26	11,37	140	0,014	0,016	200	76	0,0058	0,0066	86,7
27	12,62	90	0,009	0,012	148	70	0,0053	0,0070	91,8
28	12,79	85	0,0085	0,011	142	72	0,0055	0,0073	96,4
29	10,05	160	0,016	0,016	201	96	0,0073	0,0073	96,4
30	11,11	210	0,021	0,023	292	82	0,0062	0,0069	91,1
31	10,57	150	0,015	0,016	198	78	0,0059	0,0062	82,2
32	11,96	120	0,012	0,015	183	84	0,0064	0,0077	102,1
33	12,72	92	0,0092	0,012	153	76	0,0058	0,0076	100,9
34	13,3	80	0,008	0,011	143	72	0,0055	0,0078	102,8
35	13,08	90	0,009	0,013	156	76	0,0058	0,0080	105,5
36	11,88	120	0,012	0,014	181	78	0,0059	0,0071	94,0
37	13,03	70	0,007	0,010	121	76	0,0058	0,0079	104,8
38	13,6	70	0,007	0,010	130	72	0,0055	0,0081	106,9
39	12,87	70	0,007	0,009	118	76	0,0058	0,0078	102,8
40	13,13	70	0,007	0,010	122	70	0,0053	0,0074	97,8
41	12,69	80	0,008	0,011	132	76	0,0058	0,0076	100,5
42	13,54	80	0,008	0,012	147	72	0,0055	0,0080	106,1
43	11,42	130	0,013	0,015	187	76	0,0058	0,0066	87,2
44	12,2	130	0,013	0,016	203	72	0,0055	0,0068	89,9
45	12,89	110	0,011	0,015	186	74	0,0056	0,0076	100,3
46	13,65	90	0,009	0,013	168	74	0,0056	0,0084	110,7
47	12,95	90	0,009	0,012	154	70	0,0053	0,0072	95,6
48	12,9	130	0,013	0,018	221	72	0,0055	0,0074	97,7
49	12,71	140	0,014	0,019	232	76	0,0058	0,0076	100,8
50	13	120	0,012	0,017	206	70	0,0053	0,0073	96,2
51	13,3	100	0,01	0,014	179	66	0,0050	0,0071	94,2
52	13,68	110	0,011	0,017	207	71	0,0054	0,0081	106,6
53	13,92	170	0,017	0,026	330	64	0,0048	0,0075	99,4
54	13,15	165	0,0165	0,023	289	68	0,0051	0,0072	95,2
55	11,9	180	0,018	0,022	272	72	0,0055	0,0066	87,0
56	12,96	120	0,012	0,016	205	70	0,0053	0,0072	95,7
57	12,25	160	0,016	0,020	251	76	0,0058	0,0072	95,5
58	13,4	150	0,015	0,022	271	66	0,0050	0,0072	95,5

EÚ FSI VUT v Brně

59	13,5	110	0,011	0,016	202	66	0,0050	0,0073	96,7
60	10,7	80	0,008	0,009	107	89	0,0067	0,0072	95,0
průměr	12,5	120	0,01	0,015	192	76,00	0,0058	0,0074	98,2

Analýza spalín $W_r=35\%$, $T_{vz}=25^\circ\text{C}$, úprava komory									
čas	O ₂	CO	CO	CO_ref	CO_ref	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	15,63	840	0,084	0,172	2151	120	0,0091	0,0186	245,6
1	14,93	590	0,059	0,107	1336	124	0,0094	0,0170	224,5
2	11,2	1320	0,132	0,148	1852	150	0,0114	0,0127	168,2
3	7,62	1600	0,16	0,132	1644	200	0,0151	0,0124	164,3
4	8,36	2040	0,204	0,178	2219	190	0,0144	0,0125	165,2
5	11,62	1420	0,142	0,167	2082	150	0,0114	0,0133	175,8
6	10,61	750	0,075	0,079	993	158	0,0120	0,0127	167,1
7	12,39	850	0,085	0,109	1357	138	0,0104	0,0133	176,2
8	11,13	880	0,088	0,098	1226	150	0,0114	0,0127	167,0
9	12,58	1260	0,126	0,165	2058	138	0,0104	0,0136	180,1
10	14,17	960	0,096	0,155	1933	145	0,0110	0,0177	233,4
11	13,9	1260	0,126	0,195	2440	138	0,0104	0,0162	213,6
12	14,39	1120	0,112	0,186	2330	118	0,0089	0,0149	196,2
13	13,32	1160	0,116	0,166	2077	144	0,0109	0,0156	206,1
14	12,5	1380	0,138	0,179	2232	124	0,0094	0,0121	160,3
15	10,35	1360	0,136	0,140	1756	152	0,0115	0,0119	156,9
16	10,85	1380	0,138	0,150	1869	148	0,0112	0,0121	160,3
17	9,18	1180	0,118	0,110	1373	180	0,0136	0,0127	167,4
18	10,39	1440	0,144	0,149	1866	166	0,0126	0,0130	172,0
19	10,32	1350	0,135	0,139	1738	134	0,0101	0,0104	137,9
20	8,6	1020	0,102	0,090	1131	136	0,0103	0,0091	120,6
21	9,28	710	0,071	0,067	833	160	0,0121	0,0114	150,1
22	11,11	740	0,074	0,082	1029	136	0,0103	0,0115	151,1
23	14,41	570	0,057	0,095	1189	142	0,0107	0,0179	236,8
24	14,38	710	0,071	0,118	1475	140	0,0106	0,0176	232,5
25	14,39	900	0,09	0,150	1872	142	0,0107	0,0179	236,1
26	14,83	730	0,073	0,130	1627	138	0,0104	0,0186	245,8
27	13,36	1200	0,12	0,173	2160	130	0,0098	0,0142	187,0
28	13,48	1306	0,1306	0,191	2388	110	0,0083	0,0122	160,8
29	12,68	180	0,018	0,024	297	116	0,0088	0,0116	153,2
30	14,28	880	0,088	0,144	1801	132	0,0100	0,0164	215,9
31	12,56	950	0,095	0,124	1548	124	0,0094	0,0122	161,5
32	13,64	1040	0,104	0,155	1943	128	0,0097	0,0145	191,2
33	13,08	790	0,079	0,110	1372	126	0,0095	0,0132	174,9
34	13,4	780	0,078	0,113	1411	138	0,0104	0,0151	199,6
35	13,08	730	0,073	0,101	1267	136	0,0103	0,0143	188,7

EÚ FSI VUT v Brně

36	13,68	700	0,07	0,105	1315	134	0,0101	0,0152	201,2
37	12,14	850	0,085	0,106	1319	116	0,0088	0,0109	143,9
38	11,13	740	0,074	0,082	1031	142	0,0107	0,0120	158,1
39	12,34	710	0,071	0,090	1127	140	0,0106	0,0135	177,7
40	12,84	980	0,098	0,132	1651	124	0,0094	0,0127	167,0
41	12,52	730	0,073	0,095	1184	134	0,0101	0,0132	173,7
42	12,31	980	0,098	0,124	1551	130	0,0098	0,0125	164,4
43	12,42	750	0,075	0,096	1202	134	0,0101	0,0130	171,7
44	11,75	1160	0,116	0,138	1724	133	0,0101	0,0120	158,0
45	12,85	560	0,056	0,076	945	120	0,0091	0,0123	161,8
46	9,55	730	0,073	0,070	877	172	0,0130	0,0125	165,1
47	10,69	690	0,069	0,074	920	152	0,0115	0,0123	162,0
48	12,69	830	0,083	0,110	1373	136	0,0103	0,0136	179,9
49	13,14	580	0,058	0,081	1015	142	0,0107	0,0150	198,6
50	14,14	480	0,048	0,077	962	136	0,0103	0,0165	217,9
51	14,32	450	0,045	0,074	926	136	0,0103	0,0170	223,8
52	12,35	870	0,087	0,111	1383	120	0,0091	0,0116	152,5
53	11,44	120	0,012	0,014	173	142	0,0107	0,0124	163,3
54	10,03	770	0,077	0,077	965	188	0,0142	0,0143	188,4
55	10,04	780	0,078	0,078	979	184	0,0139	0,0140	184,5
56	11,78	760	0,076	0,091	1133	144	0,0109	0,0130	171,7
57	12,36	850	0,085	0,108	1353	134	0,0101	0,0129	170,5
58	13,29	680	0,068	0,097	1213	126	0,0095	0,0136	179,6
59	12,05	740	0,074	0,091	1137	144	0,0109	0,0134	176,8
60	13,33	460	0,046	0,066	825	142	0,0107	0,0154	203,5
průměr	12,25	906,98	0,09	0,116	1445	141,08	0,0107	0,0137	181,3

Analýza spalín $W_r=55,8\%$, $T_{vz}=100^\circ\text{C}$, úprava komory									
čas	O ₂	CO	CO	CO_ref	CO_ref	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	14,19	850	0,085	0,137	1716	132	0,0100	0,0161	213,1
1	14,07	880	0,088	0,140	1746	134	0,0101	0,0161	212,5
2	13,18	1920	0,192	0,270	3376	128	0,0097	0,0136	179,9
3	11,69	840	0,084	0,099	1241	144	0,0109	0,0129	170,0
4	11,44	1760	0,176	0,203	2531	142	0,0107	0,0124	163,3
5	9,79	1220	0,122	0,120	1496	162	0,0123	0,0120	158,8
6	11,29	740	0,074	0,084	1048	152	0,0115	0,0130	172,1
7	12,26	850	0,085	0,107	1337	156	0,0118	0,0149	196,2
8	13,88	560	0,056	0,087	1081	132	0,0100	0,0154	203,8
9	14,24	720	0,072	0,117	1464	136	0,0103	0,0168	221,1
10	14,98	370	0,037	0,068	845	116	0,0088	0,0160	211,8
11	15,06	420	0,042	0,078	972	130	0,0098	0,0182	240,6
12	14,97	970	0,097	0,177	2212	102	0,0077	0,0141	185,9

EÚ FSI VUT v Brně

13	12,54	1240	0,124	0,161	2015	126	0,0095	0,0124	163,7
14	13,24	800	0,08	0,113	1418	120	0,0091	0,0129	170,0
15	14,65	650	0,065	0,113	1407	124	0,0094	0,0163	214,6
16	14,88	1080	0,108	0,194	2426	112	0,0085	0,0152	201,2
17	13,99	910	0,091	0,143	1785	128	0,0097	0,0152	200,7
18	14,41	580	0,058	0,097	1210	131	0,0099	0,0166	218,5
19	12,47	650	0,065	0,084	1048	110	0,0083	0,0107	141,7
20	13,57	850	0,085	0,126	1573	120	0,0091	0,0134	177,5
21	14,02	500	0,05	0,079	985	124	0,0094	0,0148	195,3
22	14,23	770	0,077	0,125	1564	129	0,0098	0,0159	209,4
23	13,93	750	0,075	0,117	1459	126	0,0095	0,0148	195,9
24	14,14	700	0,07	0,112	1403	122	0,0092	0,0148	195,5
25	13,64	740	0,074	0,111	1382	116	0,0088	0,0131	173,2
26	14,6	640	0,064	0,110	1375	124	0,0094	0,0161	213,0
27	10,95	1480	0,148	0,162	2025	110	0,0083	0,0091	120,3
28	12,51	1000	0,1	0,130	1620	108	0,0082	0,0106	139,8
29	12,43	1040	0,104	0,133	1669	122	0,0092	0,0119	156,5
30	13,04	830	0,083	0,115	1434	112	0,0085	0,0117	154,7
31	12,59	1260	0,126	0,165	2060	128	0,0097	0,0127	167,3
32	9,992	1200	0,12	0,120	1499	172	0,0130	0,0130	171,7
33	12,71	1840	0,184	0,244	3052	134	0,0101	0,0135	177,7
34	12,16	1360	0,136	0,169	2115	120	0,0091	0,0113	149,2
35	13,05	860	0,086	0,119	1487	126	0,0095	0,0132	174,2
36	13,84	660	0,066	0,101	1267	129	0,0098	0,0150	198,0
37	13,48	910	0,091	0,133	1664	108	0,0082	0,0120	157,9
38	13,11	740	0,074	0,103	1290	132	0,0100	0,0139	183,9
39	12,49	890	0,089	0,115	1438	122	0,0092	0,0119	157,6
40	12,99	730	0,073	0,100	1253	136	0,0103	0,0141	186,6
41	12,16	1160	0,116	0,144	1804	134	0,0101	0,0126	166,6
42	13,48	1040	0,104	0,152	1902	124	0,0094	0,0137	181,2
43	11,02	1120	0,112	0,123	1543	140	0,0106	0,0117	154,2
44	12,28	730	0,073	0,092	1151	126	0,0095	0,0120	158,8
45	13,63	560	0,056	0,084	1045	112	0,0085	0,0127	167,0
46	12,46	700	0,07	0,090	1127	120	0,0091	0,0117	154,4
47	10,7	730	0,073	0,078	975	152	0,0115	0,0123	162,2
48	11,16	780	0,078	0,087	1090	146	0,0111	0,0124	163,1
49	12,3	760	0,076	0,096	1201	145	0,0110	0,0139	183,2
50	12,14	1000	0,1	0,124	1552	134	0,0101	0,0126	166,2
51	12,62	960	0,096	0,126	1575	130	0,0098	0,0129	170,5
52	13,89	1140	0,114	0,176	2205	110	0,0083	0,0129	170,1
53	12,85	1420	0,142	0,192	2396	104	0,0079	0,0106	140,3
54	11,28	1460	0,146	0,165	2065	116	0,0088	0,0099	131,2
55	10,6	1350	0,135	0,143	1785	120	0,0091	0,0096	126,8

EÚ FSI VUT v Brně

56	9,9	860	0,086	0,085	1065	126	0,0095	0,0095	124,8
57	4,06	2700	0,27	0,175	2192	150	0,0114	0,0074	97,3
58	7,1	600	0,06	0,047	594	230	0,0174	0,0138	181,9
59	13,11	1040	0,104	0,145	1812	134	0,0101	0,0141	186,7
60	13,45	860	0,086	0,125	1566	130	0,0098	0,0143	189,3
průměr	12,64	962,79	0,10	0,13	1584	129,84	0,0098	0,0133	174,9

Analýza spalín $W_r=55,8\%$, $T_{vz}=200^\circ\text{C}$, úprava komory									
čas	O ₂	CO	CO	CO_ref	CO_ref	NO _x	Nox	Nox_ref	Nox_ref
[min]	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]	[%]	[mg/m ³]
0	12,7	730	0,073	0,10	1209	150	0,0114	0,0150	198,6
1	13,28	530	0,053	0,08	944	148	0,0112	0,0160	210,7
2	11,02	750	0,075	0,08	1033	154	0,0117	0,0128	169,6
3	11,77	550	0,055	0,07	819	150	0,0114	0,0135	178,6
4	11,87	840	0,084	0,10	1265	144	0,0109	0,0131	173,4
5	11,65	900	0,09	0,11	1324	152	0,0115	0,0135	178,7
6	10,47	650	0,065	0,07	849	176	0,0133	0,0139	183,7
7	12,5	620	0,062	0,08	1003	152	0,0115	0,0149	196,6
8	12,24	700	0,07	0,09	1099	156	0,0118	0,0148	195,7
9	12,65	780	0,078	0,10	1284	156	0,0118	0,0156	205,4
10	12,26	630	0,063	0,08	991	158	0,0120	0,0151	198,7
11	10,47	680	0,068	0,07	888	146	0,0111	0,0115	152,4
12	11,52	590	0,059	0,07	856	156	0,0118	0,0137	180,9
13	11,72	670	0,067	0,08	993	154	0,0117	0,0138	182,4
14	11,68	460	0,046	0,05	679	164	0,0124	0,0147	193,4
15	12,47	870	0,087	0,11	1402	148	0,0112	0,0144	190,7
16	11,36	580	0,058	0,07	827	148	0,0112	0,0128	168,8
17	11,82	750	0,075	0,09	1123	152	0,0115	0,0138	182,0
18	12,67	680	0,068	0,09	1122	146	0,0111	0,0146	192,7
19	12,65	560	0,056	0,07	922	150	0,0114	0,0150	197,5
20	12,75	570	0,057	0,08	950	148	0,0112	0,0149	197,2
21	12,99	520	0,052	0,07	893	152	0,0115	0,0158	208,6
22	13,1	460	0,046	0,06	801	152	0,0115	0,0160	211,5
23	13,13	770	0,077	0,11	1345	142	0,0107	0,0150	198,3
24	12,44	530	0,053	0,07	851	154	0,0117	0,0150	197,7
25	12,31	750	0,075	0,09	1187	150	0,0114	0,0144	189,7
26	12,27	690	0,069	0,09	1087	154	0,0117	0,0147	193,9
27	12,5	600	0,06	0,08	971	160	0,0121	0,0157	206,9
28	12,76	720	0,072	0,10	1201	158	0,0120	0,0160	210,8
29	11,72	980	0,098	0,12	1452	150	0,0114	0,0135	177,7
30	12,74	680	0,068	0,09	1132	152	0,0115	0,0153	202,3
31	13,13	560	0,056	0,08	978	128	0,0097	0,0135	178,8
32	12,55	720	0,072	0,09	1172	138	0,0104	0,0136	179,5

EÚ FSI VUT v Brně

33	11,34	760	0,076	0,09	1082	152	0,0115	0,0131	173,0
34	11,85	570	0,057	0,07	857	156	0,0118	0,0142	187,4
35	11,63	680	0,068	0,08	998	141	0,0107	0,0125	165,4
36	10,39	750	0,075	0,08	972	160	0,0121	0,0126	165,8
37	11,09	500	0,05	0,06	694	156	0,0118	0,0131	173,0
38	12,02	550	0,055	0,07	842	134	0,0101	0,0124	164,0
39	10,1	580	0,058	0,06	732	172	0,0130	0,0131	173,4
40	11,44	470	0,047	0,05	676	156	0,0118	0,0136	179,4
41	10,66	390	0,039	0,04	519	164	0,0124	0,0132	174,3
42	11,59	520	0,052	0,06	760	162	0,0123	0,0143	189,2
43	11,96	500	0,05	0,06	761	156	0,0118	0,0144	189,7
44	12,47	510	0,051	0,07	822	156	0,0118	0,0152	201,0
45	12,35	570	0,057	0,07	906	150	0,0114	0,0144	190,6
46	12,82	570	0,057	0,08	958	148	0,0112	0,0151	198,9
47	12,72	750	0,075	0,10	1245	120	0,0091	0,0121	159,3
48	12,34	610	0,061	0,08	969	150	0,0114	0,0144	190,4
49	13,08	520	0,052	0,07	903	146	0,0111	0,0154	202,6
50	12,55	490	0,049	0,06	797	148	0,0112	0,0146	192,5
51	12,6	510	0,051	0,07	835	130	0,0098	0,0129	170,1
52	12,12	730	0,073	0,09	1130	152	0,0115	0,0143	188,1
53	12,87	520	0,052	0,07	879	148	0,0112	0,0152	200,1
54	11,31	950	0,095	0,11	1348	156	0,0118	0,0134	177,0
55	11,76	610	0,061	0,07	908	152	0,0115	0,0137	180,8
56	13,62	570	0,057	0,08	1062	138	0,0104	0,0156	205,5
57	13,49	800	0,08	0,12	1465	150	0,0114	0,0166	219,5
58	13,27	890	0,089	0,13	1583	148	0,0112	0,0159	210,4
59	12,17	770	0,077	0,10	1199	146	0,0111	0,0138	181,7
60	11,3	650	0,065	0,07	921	144	0,0109	0,0124	163,2
průměr	12,13	645,25	0,06	0,08	1008	150,64	0,0114	0,0142	187,7