

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra energetiky**

**Návrh opatření pro snížení úletu TZL z uhelného kotle  
firmy BENEKOV**

**The Proposal of Measures to Reduce of Solid Particles in  
Flue Dust from Coal-fired Boiler Company BENEKOV**

**Student: Bc. Tomáš Habr**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. Zbyszek Szeliga Ph.D.**

**Ostrava 2014**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Habr**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh opatření pro snížení úletu TZL z uhelného kotle firmy BENEKOV**  
**The Proposal of Measures to Reduce of Solid Particles in Flue Dust from Coal-fired Boiler Company BENEKOV**

### Zásady pro vypracování:

Navrhnete vhodná opatření pro snížení úletu TZL z uhelného kotle firmy BENEKOV s cílem dosažení požadovaného emisního limitu.

Práce bude obsahovat:

Základní popis kotle, procesu spalování a přenosu tepla. Rešerši základních možných. Opatření pro snížení TZL. Hodnocení metod snížení TZL s ohledem na granulometrickou strukturu. Výběr vhodné metody. Volbu a návrh vhodného opatření. Nutný výpočet stechiometrie spalín, tepelný a aerodynamický výpočet kotle. Výpočty navržené metody redukce TZL. Výkresovou dokumentaci řešení.

### Seznam doporučené odborné literatury:

ČERNÝ, V. a kol.: Parní kotle. Praha : SNTL, 1983.

HOLMAN, J.P.: Heat Transfer. 5.vydání. New York, St.Louis aj., McGraw-Hill Book Company 1981, 570 s.

KOLAT, P.: Přenos tepla a hmoty. Skripta VŠB. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1987.

KOLLER, J.: Ochrana prostředí v průmyslu, VŠCHT Praha.

IBLER, Z. a kol.: Technický průvodce energetika. Praha: BEN – technická literatura, 2002.

ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval panu Ing. Zbyszku Szeligovi Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracovávání diplomové práce. Mé poděkování patří též firmě BENEKOVterm s.r.o., zejména panu Ing. Petru Kozákovi za pomoc při realizaci a měření a závěrem též firmě LÁNÍK s.r.o. za ochotu a spolupráci při realizaci mé diplomové práce.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne .....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Tomáš Habr

Adresa trvalého pobytu autora práce: Bruntál, Uhlířská 8, PSČ 79201

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

HABR, T. *Návrh opatření pro snížení úletu TZL z uhelného kotle firmy BENEKOV: diplomová práce.* VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 128s. Vedoucí práce: Ing. Zbyszek Szeliga Ph.D.

Diplomová práce se zabývá návrhem opatření, které by snížilo emise tuhých znečišťujících látek z automatického uhelného kotle Benekov C, firmy BENEKOVterm s.r.o. Cílem je dosažení parametrů páté emisní třídy dle ČSN EN 303-5. Práce obsahuje teoretickou část, kde je kromě základního popisu kotle, spalovacího procesu, přenosu tepla, spalovaných paliv, legislativy a vypouštěných škodlivin provedena rešerše a zhodnocení možných opatření, vedoucích ke snížení emisí tuhých znečišťujících látek a následný výběr, respektive návrh vhodného opatření. Výpočetní část je zaměřena na stechiometrii spalin a tepelný výpočet kotle. V matematickém modelu spalovací komory je provedena analýza teplotního a rychlostního profilu s ohledem na instalaci navrženého opatření. V praktické části je provedeno měření stávajícího stavu kotle, následně aplikace navrženého opatření na kotli a provedení měření teplot, tlakové ztráty a redukce TZL. Poslední částí je výkresová dokumentace řešení.

## **ANNOTATION OF THESIS**

HABR, T. *The Proposal of Measures to Reduce of Solid Particles in Flue Dust from Coal-fired Boiler Company BENEKOV: Thesis.* VŠB–Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2014, 128p. Thesis head: Ing. Zbyszek Szeliga Ph.D.

The thesis deals with the design of measures that should lower the amount of solid-material pollution that is produced by the automatic coal-fired boiler Benekov C, owned by BENEKOVterm s.r.o company. The aim is to achieve the parameters of the 5th emission grade according to ČSN EN 303-5. The thesis contains the theoretical part composed of the basic description of the boiler, burning process, heat transfer, legislation, burnt fuel, released pollutants and research and evaluation of possible measures that would lead to the reduction of solid-material pollutants, and following selection, or rather a design of appropriate measures. The calculation part focuses on stoichiometry of combustion products and heat calculation of the boiler. The analysis of temperatures and

the speed profile after the installation of suggested measures was conducted in the mathematical model. The practical part is focused on measurement of the current status of the boiler, which is followed by the application of suggested measures on the boiler and measurement of temperatures, pressure loss and reduction of TZL. The last part is a design documentation of the solution.

# OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>LEGISLATIVNÍ OPATŘENÍ VZTAHUJÍCÍ SE NA KOTLE MALÝCH VÝKONŮ</b>	<b>16</b>
	2.1 Metodický pokyn o nízkoemisních spalovacích zdrojích	16
	2.2 Požadavky na emisní třídy	16
	2.3 Kotlíková dotace	17
	2.4 Plánované požadavky na Ekodesign a energetické značení pro kotle	18
<b>3</b>	<b>PALIVA VYUŽÍVANÉ V KOTLÍCH O MALÝCH VÝKONECH</b>	<b>20</b>
	3.1 Uhlí	20
	3.2 Palivové dřevo	21
	3.3 Pelety	22
	3.4 Brikety	22
	3.5 Dřevní štěrka	23
	3.6 Piliny	23
	3.7 Obiloviny	23
<b>4</b>	<b>ŠKODLIVINY</b>	<b>25</b>
	4.1 Tuhé znečišťující látky (TZL)	25
	4.2 Oxidy síry	27
	4.3 Oxidy dusíku (NO <sub>x</sub> )	28
	4.4 Oxid uhelnatý (CO)	28
	4.5 Organické polutanty	29
	4.6 Oxid uhličitý a skleníkový efekt	29
<b>5</b>	<b>PROCES SPALOVÁNÍ</b>	<b>31</b>
	5.1 Spalování tuhých paliv	32
	5.2 Součinitel přebytku vzduchu a jeho stanovení	37
<b>6</b>	<b>PŘENOS TEPLA</b>	<b>40</b>
	6.1 Přenos tepla vedením (kondukce)	40
	6.2 Přenos tepla prouděním (konvekce)	41
	6.2.1 Přenos tepla konvekcí bez změny skupenství	42

6.3	Přenos tepla zářením	43
6.3.1	Záření plynů a par	45
6.3.2	Tepelné záření plamene	47
<b>7</b>	<b>SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ BENEKOV C FIRMY BENEKOVterm s.r.o</b>	<b>49</b>
7.1	Spalovací zařízení Benekov řady C25	49
7.1.1	Konstrukce a technické údaje kotle Benekov C25	49
<b>8</b>	<b>ODLUČOVÁNÍ PRACHOVÝCH ČÁSTIC</b>	<b>54</b>
8.1	Suché mechanické odlučovače	54
8.1.1	Gravitační odlučovače	55
8.1.2	Setrvačné odlučovače	55
8.1.3	Vírové odlučovače	56
8.1.4	Rotační odlučovače	57
8.2	Filtry	57
8.2.1	Filtrační materiály	58
8.2.2	Provedení filtrů	59
8.2.2.1	Pěnové keramické filtry (porézní vrstvy)	60
8.3	Elektrické odlučovače	63
<b>9</b>	<b>HODNOCENÍ METOD SNÍŽENÍ TZL S OHLEDEM NA GRANULOMETRII A VÝBĚR VHODNÉ METODY</b>	<b>65</b>
9.1	Granulometrická zkouška a stanovení nedopalu	65
9.2	Hodnocení metod snížení TZL s ohledem na granulometrii vzorku	67
<b>10</b>	<b>VÝPOČTY PRO STANOVENÍ VHODNÉHO UMÍSTĚNÍ PĚNOVÉHO KERAMICKÉHO FILTRU</b>	<b>70</b>
10.1	Stechiometrické výpočty	70
10.1.1	Složení paliva	70
10.1.2	Výchozí parametry	71
10.1.3	Objemy spalovacího vzduchu a spalin	71
10.1.4	Objemy jednotlivých složek ve spalinách	73
10.1.5	Koncentrace jednotlivých složek ve spalinách	74
10.2	Tepelný výpočet kotle	75
10.2.1	Měrná tepelná kapacita spalin	75



10.2.2	Měrná tepelná kapacita vzduchu	76
10.2.3	Měrná tepelná kapacita paliva	76
10.2.4	Teplota spalin u hořáku	77
10.2.5	Přestup tepla konvekcí na straně spalin	78
10.2.6	Množství tepla ve spalinách	80
10.2.7	Přestup tepla radiací	80
10.2.8	Spalovací komora v oblasti navrhovaného umístění pěnokeramické vrstvy	84
10.2.9	Výpočet teplot ve spalovací komoře	87
10.2.10	Výpočet parametrů v dalších částech kotle	90
10.2.10.1	Prostor vedle keramického reflektoru	90
10.2.10.2	Prostor za keramickým reflektorem	92
10.2.10.3	Prostor druhého tahu kotle	94
10.2.10.4	Souhrn vypočtených parametrů	96
10.2.11	Měření teplot v kotli	96
<b>11</b>	<b>NÁVRH VHODNÉHO OPATŘENÍ</b>	<b>98</b>
<b>12</b>	<b>MODEL TEPLITNÍHO A RYCHLOSTNÍHO PROFILU VE SPALOVACÍ KOMOŘE</b>	<b>101</b>
<b>13</b>	<b>ZÁVĚREČNÉ MĚŘENÍ A HODNOCENÍ NAVRHOVANÉHO OPATŘENÍ</b>	<b>105</b>
13.1	Měření povrchových teplot pěnokeramické vrstvy v kotli	105
13.2	Měření koncentrace TZL bez a při použití pěnokeramické vrstvy	106
13.3	Měření tlakové ztráty při použití pěnokeramické vrstvy	111
<b>14</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>114</b>
<b>15</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>116</b>
<b>16</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>118</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
EU	Evropská unie	
LTO	Lehký topný olej	
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku	
OPŽP	Operační program Životní prostředí	
PAU	Polyaromatické uhlovodíky	
PCDD/F	Polychlorované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany	
POP	Perzistentní organické polutanty	
PPI	Průměrný počet pórů na lineární palec	
PUR	Polyuretanová pěna	
PVC	Polyvinylchlorid	
SFŽP	Státní fond životního prostředí	
SVOC	Polotěkavé organické látky	
TUV	Teplá užitková voda	
TZL	Tuhé znečišťující látky	
VOC	Těkavé organické látky	
e-PFTE	Expandovaný polytetrafluorethylen	
$A_p$	Absorbční součinitel, pohltivost plamene	[1]
$A^r$	Obsah popeloviny v surovém palivu	[%]
C	Obsah uhlíku v palivu	[1]
CO <sub>2</sub>	Množství oxidu uhličitého ve spalinách	[1]
CO <sub>2,max</sub>	Max. množství oxidu uhličitého ve spalinách	[1]
$E_{0,\varphi}$	Lambertův zákon	[W / m <sup>2</sup> ]
$E_{0,n}$	Hustota zářivého toku ve směru normály	[W / m <sup>2</sup> ]
Gr	Grashofovo kritérium	[1]
H	Obsah vodíku v palivu	[1]
$I_{\lambda,0}$	Intenzita spektrálního zářivého toku	[W/m <sup>3</sup> ]
K <sub>0</sub>	Koeficient závislý na Reynoldsově čísle	[1]
L	Charakteristický rozměr	[m]

N	Obsah dusíku v palivu	[l]
Nu	Nusseltovo kritérium	[1]
O <sub>2</sub>	Obsah kyslíku v palivu	[l]
Q	Tepelný tok	[kW]
Q <sub>i</sub> <sup>r</sup>	Výhřevnost surového paliva	[MJ/kg]
Q <sub>sp</sub>	Množství tepla ve spalínách	[kJ / kg <sub>pal</sub> ]
Q <sub>sp,kW</sub>	Množství tepla ve spalínách	[kW]
Q <sub>V</sub>	Jmenovitý výkon kotle	[kW]
Pr	Prandtlovo kritérium	[1]
Pr <sub>s</sub>	Prandtlovo kritérium pro stěnu	[1]
Re	Reynoldsovo kritérium	[1]
S	Obsah síry v palivu	[l]
S	Povrch, průřez	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>sk</sub>	Povrch spalovací komory	[m <sup>3</sup> ]
T	Absolutní teplota	[K, °C]
T <sub>N</sub>	Teplota spalin za normálních podmínek	[K]
T <sub>p</sub>	Absolutní teplota plynu	[K, °C]
T <sub>pl</sub>	Absolutní teplota plamene	[K, °C]
T <sub>s</sub>	Absolutní teplota stěny	[K, °C]
T <sub>sp</sub>	Teplota spalin	[K, °C]
T <sub>vz</sub>	teplota vzduchu	[K, °C]
V <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Objem oxidu uhličitého ve spalínách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> / kg]
V <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Objem vodní páry ve spalínách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> / kg]
V <sub>i</sub>	Obsah jednotlivých složek ve spalínách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> / kg]
V <sub>N<sub>2</sub></sub>	Objem dusíku ve spalínách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> / kg]
V <sub>O<sub>2</sub></sub>	Objem kyslíku ve spalínách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> / kg]
V <sub>O<sub>2,t</sub></sub>	Stechiometrické množství kyslíku	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> / kg]
V <sub>pal</sub>	Objem paliva	[kg]
V <sub>sk</sub>	Objem spalovací komory	[m <sup>3</sup> ]

$V_{SO_2}$	Objem oxidu siřičitého ve spalinách	$[m_N^3 / kg]$
$V_{spal,at}$	Skutečný objem spalin	$[m^3 / s]$
$V_{sp,sk}^s$	Množství spalin skutečných suchých	$[m_N^3 / kg]$
$V_{sp,sk}^v$	Množství spalin skutečných vlhkých	$[m_N^3 / kg]$
$V_{sp,t}^s$	Množství spalin teoretických suchých	$[m_N^3 / kg]$
$V_{vz,sk}^s$	Množství skutečného suchého vzduchu	$[m_N^3 / kg]$
$V_{vz,sk}^v$	Množství skutečného vlhkého vzduchu	$[m_N^3 / kg]$
$V_{vz,t}^s$	Množství teoretického suchého vzduchu	$[m_N^3 / kg]$
$V^{daf}$	Obsah prchavé hořlaviny	$[\%]$
$a$	Součinitel teplotní vodivosti	$[m^2 / s]$
$a$	Délka strany	$[m]$
$b$	Délka strany	$[m]$
$c_1$	Planckova konstanta	$[W/m^2]$
$c_2$	Planckova konstanta	$[m \cdot K]$
$c_{p,A}$	Měrná tepelná kapacita popeloviny	$[kJ / kg \cdot K]$
$c_{pCO_2}$	Měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého	$[kJ / m_n^3 \cdot K]$
$c_{p,h}$	Měrná tepelná kapacita hořlaviny	$[kJ / kg \cdot K]$
$c_{pH_2O}$	Měrná tepelná kapacita vodní páry	$[kJ / m_n^3 \cdot K]$
$c_{pN_2}$	Měrná tepelná kapacita dusíku	$[kJ / m_n^3 \cdot K]$
$c_{pO_2}$	Měrná tepelná kapacita kyslíku	$[kJ / m_n^3 \cdot K]$
$c_{pSO_2}$	Měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého	$[kJ / m_n^3 \cdot K]$
$c_{p,pal}$	Měrná tepelná kapacita paliva	$[kJ / kg \cdot K]$
$c_{p,sp}$	Měrná tepelná kapacita spalin	$[kJ / m_n^3 \cdot K]$
$c_{p,vz}$	Měrná tepelná kapacita vzduchu	$[kJ / m_n^3 \cdot K]$
$c_{p,w}$	Měrná tepelná kapacita vody	$[kJ / kg \cdot K]$
$d$	Charakteristický rozměr	$[m]$
$d_h$	Charakteristický rozměr	$[m]$
$g$	Tíhové zrychlení	$[m/s^2]$

$\text{grad } t$	Teplotní gradient	[ K / m ]
$h^r$	Obsah hořlaviny v surovém palivu	[ % ]
$l$	Tloušťka stěny	[ m ]
$l$	Účinná tloušťka vrstvy	[ m ]
$l$	Délka zvolené oblasti	[ m ]
$m_{\text{pal}}$	Hmotnostní průtok paliva	[ kg/h ]
$n$	Součinitel přebytku vzduchu	[ 1 ]
$n$	Mocnitel závislý na teplotě stěny	[ 1 ]
$o$	Obvod dané části	[ m ]
$p_{\text{CO}_2}$	Parciální tlak oxidu uhličitého	[ Pa ]
$p_{\text{H}_2\text{O}}$	Parciální tlak vodní páry	[ Pa ]
$p_0$	Tlak okolí	[ Pa ]
$p_s$	Celkový tlak vzduchu	[ Pa ]
$p_{\text{sk}}$	Tlak ve spalovací komoře	[ Pa ]
$p''$	Parciální tlak ve vlhkém vzduchu	[ Pa ]
$q_{\text{p},s}$	Hustota tepelného toku předávaná plynem stěně	[ W / m <sup>2</sup> ]
$q_{\text{rad}}$	Tepelný tok radiací	[ W / m <sup>2</sup> ]
$t$	Teplota paliva	[ °C ]
$t_{s1}, t_{s2}$	Teploty povrchů stěn	[ K, °C ]
$t_t$	Teplota tekutiny	[ K, °C ]
$w_{\text{sp}}$	Rychlost proudění spalin	[ m/s ]
$w^r$	Obsah vody v surovém palivu	[ 1 ]
$\Delta t$	Rozdíl teplot	[ °C ]
$\Delta t_{\text{pal}}$	Rozdíl teploty paliva	[ °C ]
$\Delta \varepsilon$	Korekce vzájemného překrytí	[ 1 ]
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	[ W / m <sup>2</sup> · K ]
$\beta$	Korekční součinitel	[ 1 ]
$\gamma$	Koeficient teplotní objemové roztažnosti	[ 1/K ]
$\varepsilon_{\text{CO}_2}$	Emisní součinitel oxidu uhličitého	[ 1 ]

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$	Emisní součinitel vodní páry	[1]
$\varepsilon_p$	Poměrná zářivost plynu (emisní součinitel)	[1]
$\varepsilon_{\text{pl}}$	Stupeň černosti plamene	[1]
$\varepsilon_s$	Emisní součinitel stěny	[1]
$\varepsilon'_s$	Efektivní stupeň černosti stěny	[1]
$\varphi$	Relativní vlhkost	[1]
$\varphi$	Rostoucí úhel	[°]
$\eta$	účinnost kotle	[%]
$\eta_s$	Sezónní energetická účinnost vytápění	[%]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti materiálu	[ W / m · K ]
$\lambda$	Vlnová délka	[m]
$\lambda_{\text{max}}$	Vlnová délka s nejvyšším monochromatickým tokem	[m]
$\nu$	Součinitel vlhkosti	[1]
$\nu$	Kinetická viskozita tekutiny	[ m <sup>2</sup> /s]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	[ W / m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> ]
$\omega_{\text{CO}_2}$	Koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách	[1]
$\omega_{\text{H}_2\text{O}}$	Koncentrace vodní páry ve spalinách	[1]
$\omega_{\text{N}_2}$	Koncentrace dusíku ve spalinách	[1]
$\omega_{\text{O}_2}$	Koncentrace kyslíku ve spalinách	[1]
$\omega_{\text{SO}_2}$	Koncentrace oxidu siřičitého ve spalinách	[1]

## 1. ÚVOD

Hustý, tmavý dým stoupající z komínů, zápach linoucí se širokým okolím. Problém, se kterým se potýká většina měst a venkovských oblastí. Důvodem jsou zastaralá lokální topeniště, ve kterých se navíc mnohdy spaluje nekvalitní palivo, případně i odpady. Jedním z řešení tohoto problému je výměna starých domácích kotlů za nové, plně automatické.

Firma BENEKOVterm s.r.o., která takové kotle vyrábí, a to o třetí a čtvrté emisní třídě dle normy ČSN EN 303-05, se snaží připravit na budoucnost, kdy se budou emisní limity vypouštěných znečišťujících látek dále zpřísnovat a na trh se budou moct uvádět pouze kotle čtvrté a páté emisní třídy.

V diplomové práci je řešena problematika redukce tuhých znečišťujících látek u 25kW automatického kotle, spalujícího hnědé uhlí, který patří k nejprodávanějším kotlům této firmy. S koncentrací  $54 \text{ mg/m}^3$  vypouštěných tuhých látek zapadá do čtvrté emisní třídy. Cílem této práce je redukce emisí TZL pod  $40 \text{ mg/m}^3$  a tím dosáhnout páté emisní třídy.

## **2. LEGISLATIVNÍ OPATŘENÍ VZTAHUJÍCÍ SE NA KOTLE MALÝCH VÝKONŮ**

Spalovací proces u malých či velkých zařízení musí být veden tak, aby v co nejmenší míře znečišťoval ovzduší. Normy a metodické pokyny jsou stanoveny dle zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. Pro provozovatele malých zdrojů jsou v současnosti jako motivační opatření k snižování emisí realizovány dotační programy.

### **2.1 Metodický pokyn o nízkoemisních spalovacích zdrojích**

V tomto dokumentu jsou definovány požadavky na zdroje, které lze definovat na základě splnění požadovaných kritérií, za nízkoemisní. Tyto technologie jsou pak podporovány v rámci dotací.

Metodický pokyn pro nízkoemisní spalovací zdroje upřesňuje požadavky na:

- Přípustné emise vybraných znečišťujících látek
- Minimální energetickou efektivnost
- Spalovací zdroje, vhodné k udělení finanční podpory v rámci OPŽP a národních programů SFŽP

Parametry emisních limitů se stanovují podle jmenovitého tepelného příkonu zdroje a druhu spalovaného paliva. Jsou vyjádřeny jako nejvyšší přípustné koncentrace dané znečišťující látky ve spalinách za normálních stavových podmínek v suchém plynu a při daném referenčním obsahu kyslíku [1]. Minimální energetická efektivnost je definována buď mezní úrovní komínové ztráty (vyjádřeno procentuálně k tepelnému příkonu) anebo mírou účinnosti výroby tepla.

### **2.2 Požadavky na emisní třídy**

Před uvedením na trh je teplovodní kotel testován a dle výsledků spalovacích zkoušek zařazen do emisní třídy. Pro testování kotlů na tuhá paliva do výkonu 500kW platí v jednotlivých státech EU norma EN 303-5:2012, ve které jsou popsány způsoby zkoušení kotlů, požadavky na bezpečnost a konstrukční materiály a dále norma uvádí základní



emisní limity, které musí kotle při jmenovitém a sníženém výkonu plnit. Dříve platná norma EN 303-5:1999 stanovovala emisní třídy 1 až 3, přičemž moderní automatické kotle a zplyňovací zařízení ve většině splňovaly emisní třídu 3. Nová norma zrušila třídy 1 a 2 a naopak přidala emisní třídy 4 a 5, přičemž emisní třída 3 zůstala prakticky beze změn. Změny lze vidět v následující tabulce 2.1. Od roku 2018 dojde k dalšímu zpřísnění limitů a budou se moci prodávat kotle, které plní minimálně emisní třídu 4.

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			Prach (TZL)				
			mg/m <sup>3</sup> N při 10% O <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> N při 13% O <sub>2</sub> )				
			Třída 1 <sup>1)</sup>	Třída 2 <sup>1)</sup>	Třída 3 <sup>2),3)</sup>	Třída 4 <sup>2)</sup>	Třída 5 <sup>2)</sup>
Ruční	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	75 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 <sup>1)</sup> , 500 <sup>2)</sup>	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 <sup>1)</sup> , 500 <sup>2)</sup>	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 <sup>1)</sup> , 500 <sup>2)</sup>	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 <sup>1)</sup> , 500 <sup>2)</sup>	180 (131)	150 (109)	125 (91)		

Tab. 2.1 Staré a nové emisní limity prachu dle EN 303-5:1999 a EN 303-5:2012 [2]

## 2.3 Kotlíková dotace

Dle odborníků nezpůsobují zásadní znečištění ovzduší jen průmyslové podniky, ale hlavně lokální topeniště (viz obr 2.1), u kterých platí, že si každý může topit čím chce. Proto Ministerstvo životního prostředí a Moravskoslezský kraj vytvořili dotační program na podporu výměny starých kotlů pro vytápění domácností za modernější kotle produkující méně emisí. Dotace je tedy poskytována těm domácnostem, které své ručně plněné kotle na tuhá paliva vymění za plně automatické nízko emisní kotle na uhlí nebo biomasu, popřípadě jejich kombinaci.

Hlavními výhodami pořízení nového automatického kotle jsou:

- Úspora peněz – účinnost oproti starému kotli vzroste o 20-40% a díky tomu roční náklady na palivo klesnou o cca 5000 – 8000 Kč
- Úspora času – u klasických kotlů je nutné přikládat 5krát i více krát denně. Avšak u automatických kotlů díky elektronické regulaci spalovacího procesu, vyšší

účinnosti a možnosti vkládání paliva do zásobníku, postačí přikládat jednou za 3 až 4 dny. Ve stejných intervalech se vynáší i popel

- Redukce emisí prachu – emise CO i prachu se oproti starým kotlům sníží až o 90%



Obr. 2.1 Bilance emisí prachu ze stacionárních zdrojů znečištění [3]

## 2.4 Plánované požadavky na Ekodesign a energetické značení pro kotle

Cílem této plánované Směrnice je zavést požadavky na ekodesign (standards pro maximální emise a minimální účinnost), značení účinnosti (A+++ až G) a poskytnutí doplňkových informací k zařízení při uvedení na trh. Návrh se týká vytápěcích kotlů (nepřímé vytápění prostorů) a kombinovaných kotlů (vytápění prostorů v kombinaci s ohřevem užitkové a pitné vody) o jmenovitých výkonech do 500kW spalující pevná paliva.

Následující tabulka 2.2 udává přehled požadavků na sezónní energetickou účinnost vytápění ( $\eta_s$ ), což je poměr mezi potřebou vytápění prostoru v dané topné sezóně, pokrytou kotlem na pevná paliva a roční energetickou spotřebou, nutnou k pokrytí této potřeby, vyjádřenou v % [4]. V úrovni 1 nesmí po dvou letech, od vstoupení navrhovaného opatření v platnost, sezónní energetická účinnost vytápění klesnout pod danou hodnotu, v úrovni 2 po čtyřech letech a v úrovni 3 po šesti letech od uvedení platnosti opatření.

Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3
Biomasa	< 70 kW	$\eta_s > 86\%$	$\eta_s > 96\%$	$\eta_s > 108\%$
	> 70 kW	$\eta_s > 93\%$	$\eta_s > 99\%$	$\eta_s > 108\%$
Ostatní	< 70 kW	$\eta_s > 65\%$	$\eta_s > 71\%$	$\eta_s > 77\%$
	> 70 kW	$\eta_s > 68\%$	$\eta_s > 74\%$	$\eta_s > 77\%$

Tab. 2.2 Přehled požadavků na sezónní energetickou účinnost vytápění [4]

Emise tuhých znečišťujících látek u kotlů spalující tuhá paliva nesmí po dvou letech od vstoupení navrhovaného opatření v platnost překročit hodnotu  $125\text{mg/m}^3$ , po čtyřech letech  $60\text{mg/m}^3$  a po šesti letech  $40\text{mg/m}^3$ . Uvedené hodnoty platí pro kotle s automatickým plněním, pro kotle s ručním plněním jsou maximální hodnoty následující:  $125\text{mg/m}^3$  po dvou letech,  $75\text{mg/m}^3$  po čtyřech letech a  $60\text{mg/m}^3$  po šesti letech.

Plánovaná směrnice dále navrhuje označení kotlů do tříd A+++ až G podle jejich parametrů účinnosti a emisí stejně jako je tomu u elektrospotřebičů. Hodnoty sezónní energetické účinnosti vytápění a patřičně přiřazené třídy jsou uvedeny v následující tabulce:

Třída sezónní energetické účinnosti vytápění	Sezónní energetická účinnost vytápění $\eta_s$ v %
A+++	$\eta_s \geq 150$
A++	$125 \leq \eta_s < 150$
A+	$98 \leq \eta_s < 125$
A	$90 \leq \eta_s < 98$
B	$82 \leq \eta_s < 90$
C	$75 \leq \eta_s < 82$
D	$36 \leq \eta_s < 75$
E	$34 \leq \eta_s < 36$
F	$30 \leq \eta_s < 34$
G	$\eta_s < 30$

Tab.2.3 Třídy sezónní energetické účinnosti vytápění kotlů [4]

### 3. PALIVA VYUŽÍVANÉ V KOTLÍCH O MALÝCH VÝKONECH

Pro různá spalovací zařízení jsou určena různá paliva, přičemž jejich vhodná volba je dána konstrukčními vlastnostmi a výkonem každého spalovacího zařízení.

Mezi pevná paliva patří všechny druhy uhlí a biomasy. Ta je nejhojněji využívaná ve formě dřeva a paliv z něj vyrobených jako jsou dřevěné brikety, pelety atd. Při jednoduchém energetickém zhodnocení paliv vycházíme z předpokladu, že se skládají z vody, popeloviny a hořlaviny. Aktivní složku představuje hořlavina, která je nositelem chemicky vázané energie. Do pasivní složky, která energetickou hodnotu snižuje, patří popelovina a voda.

Nejdůležitějšími vlastnostmi paliva jsou výhřevnost, respektive spalné teplo. Výhřevnost se definuje jako množství tepla uvolněného dokonalým spálením 1kg paliva za předpokladu, že za normálních podmínek ve spalinách zůstane pára v plynném stavu. Naopak u spalného tepla veškerá vodní pára zkondenzuje.

V České republice je vytápěno:

- 39% domácností dálkovým topením
- 36% domácností zemním plynem
- 6% domácností elektřinou
- 15% domácností uhlím
  - 90% tříděné hnědé uhlí
  - 5% tříděné černé uhlí
  - 5% koks
- 4% domácností dřevem
- Zanedbatelné množství domácností propan-butanem, LTO atd.

#### 3.1 Uhlí

Uhlí je fosilní palivo přírodního původu. Jednotlivé druhy jsou odlišné stářím, kterým je určeno složení a prouhelnění organické hmoty. Mění se i podíly C, H, O, N, S v hořlavé složce. Zásadní vliv na spalovací proces mají první tři prvky, zbylé dva podstatně ovlivňují tvorbu emisí. U starých kotlů, kde účinnost spalování je nízká a klesá

pod stanovené emisní limity, je zatížení životního prostředí markantní, ovšem u moderních zařízení toto zatížení rapidně klesá.

Uhlí se dělí dle velikosti na topnou směs, kostku, ořech, hrášek, drobné krupice a průmyslové směsi a podle druhu na černé, hnědé a koks. V domácnostech je kvůli nízké ceně nejčastěji využíván hnědé uhlí. Díky vysokému obsahu popeloviny a síry však nejvíce zatěžuje životní prostředí a jeho výhřevnost je nejmenší. Černé uhlí je dražší a ekologicky šetrnější, koks je pak ještě dražší než černé uhlí.

Výhody při využívání uhlí jako paliva:

- Domácí zdroj paliva, žádná závislost na jiných státech
- Zpravidla levnější zdroj vytápění
- Pohodlná regulace a obsluha automatizovaných kotlů
- Vysoká účinnost automatizovaných kotlů
- Malá míra znečištění ovzduší při využívání automatických kotlů

Nevýhody při využívání uhlí jako paliva:

- Nízká účinnost a velká míra znečištění ovzduší při používání starších typů kotlů
- Nutnost skladovacích prostorů
- V dohledném čase neobnovitelný zdroj energie
- Devastace krajiny povrchovými doly

### **3.2 Palivové dřevo**

Dle českých norem musí palivové dříví především splňovat požadavek na procentuální podíl hniloby (max. 70%), popřípadě musí mít jiné známky poškození, například sukovatost, pokřivení atd.

Hlavní rozdělení palivového dříví je podle tvrdosti (měkké, tvrdé) a podle typu dřeviny (listnaté, jehličnaté). Dřevo z jehličnatých stromů má vyšší výhřevnost a najde uplatnění především v kotlích, listnaté dřevo je vhodnější pro krby, protože hoří dlouho a nedoprovází ho prskání, které je typické pro jehličnany. Dodavatelé nabízí i směs listnatého a jehličnatého dřeva. Měkké dřevo je vhodné pro rychlé vyhřátí vytápěného prostoru, tvrdé dřevo vytváří stabilní a dlouhotrvající žár. Nejvyšší kvalitou palivem je

dubové dřevo, které má výbornou výhřevnost a je velmi tvrdé. Srovnatelnou kvalitu má i habr, buk nebo jasan. Cenově jsou to ale nejdražší dřeviny.

Speciální skupinu zastupují energetické dřeviny (topoly, vrby, jasanů atd.). Jsou to rychle rostoucí dřeviny, které jsou odolné vůči škůdcům a mají dobrou výhřevnost. V našich podmínkách mají velkou budoucnost, řeší se pouze využití ploch, kde mohou být pěstovány.

Důležitým parametrem u palivového dřeva je obsah vody. Ta se dá jednoduše odstranit vysušením, čímž se zvýší obsah hořlaviny a tím i výhřevnost. Palivo s nižším obsahem vody se lépe spaluje a také vzniká menší množství spalin.

### **3.3 Pelety**

Pelety jsou ekologicky ušlechtilé palivo vyráběné z biomasy, které se spaluje v automatických speciálně upravených kotlích. Jsou to průmyslově lisované granule o délce 40mm a průměru 6 až 14mm. Kýženého tvaru granulí dosáhneme vysokotlakým lisováním dřevního odpadu, slámy atd. při teplotě okolo 100°C, kdy lignit plastifikuje a slouží jako pojivo udržující pelety v daném tvaru. Lignit taktéž chrání pelety proti absorpci vlhkosti při skladování. Základními parametry pelet je nízký obsah vody (do 10%) a nízká popelavost (do 1%). Výhřevnost je okolo 18MJ/kg.

Podle druhu použitého paliva dělíme pelety na dřevní, alternativní a uhelné. Dřevní pelety se dělí na bílé, které se vyrábí z čisté dřevní hmoty (především z pilin) a tmavé, kde jsou piliny smíchané s kůrou. Alternativní pelety jsou lisované zemědělské komodity jako obilné a řepkové slámy, sena, odpady po čištění olejnin a obilnin apod. anebo lisované těžko využitelné materiály jako například drcený starý papír – tzv. agro pelety. Pelety obsahující jemné částice uhlí pojené uhelným dehtem mají dobrou pevnost v tlaku a jsou odolné vůči hydrataci.

### **3.4 Brikety**

Brikety jsou lisovány do tvaru hranolů, válečku nebo šestihranů o průměru 40-100mm a délce do 300mm. Lisovaným materiálem je dřevo, kůra, sláma, energetické plodiny, uhlí nebo směs těchto materiálů.

Při výběru briket je vhodné rozlišit, k jakému účelu budou použity. K rychlému vytopení domu se doporučují brikety z měkkého dřeva s otvorem uprostřed kvůli

snadnějšímú zátupu a rychlejšímú prohořívání. Pro stabilní vytápění je vhodnější tvrdé dřevo či kůra dávající pomalý rovnoměrný žár.

### **3.5 Dřevní štěpka**

Jde o velmi levné biopalivo pro vytápění větších budov, které je strojně zkrácené a nadrcené na části o délce 30-250mm. Získává se se z odpadů lesní těžby, průmyslově zpracovaného dřeva nebo rychle rostoucích dřevin. Klasifikuje se podle velikosti, obsahu vody, obsahu kůry a druhu dřeva.

Dřevní štěpka ze zbytků lesní těžby má výhřevnost v rozmezí 8-12MJ/kg a na trhu se nejčastěji objevují tři druhy:

- Zelená štěpka – části drobných větví, listí a jehličí
- Hnědá štěpka – neodkorněné části kmenů a pilařských odřezků
- Bílá štěpka – odkorněné dříví a pilařské odřezky

### **3.6 Piliny**

Piliny vznikají jako odpad při zpracování dřeva v pilařských provozech. Jejich objem a produkce je tedy silně závislá na sezónních a ekonomických vlivech. Slouží nejen k přímému spalování ve vhodných typech kotlů, ale také jako vstupní surovina pro výrobu pelet a briket. Nevýhodou je složitá doprava a skladování.

Štěpka i piliny se používají pro průmyslové automatické kotle o výkonu 90kW a více. Počáteční investice je sice vyšší, ale vzhledem k nízké ceně paliva je návratnost velmi rychlá. V současnosti se na trhu objevují kotle vhodné pro využití v domácnostech o výkonu kolem 30kW.

### **3.7 Obiloviny**

V Evropě se nejčastěji používají pšenice a oves, jež jsou pěstovány právě za účelem jejich spalování (nelze je využít pro potravinářské účely kvůli obsahu určitých nežádoucích látek). Kvalita obilí je ovlivněna především obsahem minerálů. Výhřevnost se mění

v závislosti na výši lepku, vysoký obsah lepku zhoršuje hořlavost obilí. Minimální výhřevnost energetického obilí je 15,5MJ/kg.

Při spalování obilí dochází k tvorbě tzv. spékanců v hořáku. To se dá omezit přidáním aditiva, například nehašeného vápna. Spalování obilí se doporučuje pro komfortní vytápění v automatických kotlích o výkonu 12-200kW.



## 4. ŠKODLIVINY

Hořením paliva vznikají spaliny o určitém složení plynné fáze a určitém obsahu fáze pevné. Mezi základní složky patří dusík (ze spalovacího vzduchu), oxid uhličitý (konečný produkt hoření uhlíku), nevyužitý vzdušný kyslík, vodní pára (voda ze spalovacího vzduchu a paliva), ale také látky, které jsou označovány jako škodliviny. Všeobecným zájmem je omezit produkci těchto látek na minimální možnou mez. Byla tedy vytvořena legislativní opatření, realizována zákonem o ochraně ovzduší, který popisuje a stanovuje přípustné emisní koncentrace ve spalinách. Tento zákon ovšem sleduje pouze omezený počet škodlivin a to oxid uhelnatý, oxid siřičitý, oxidy dusíku a tuhé znečišťující látky.

Omezení škodlivých látek dle zákonem daných emisních limitů, jejich kontrolu, dodržování a zpoplatnění produkce není obtížné uplatnit u velkých energetických zdrojů ani u menších topných jednotek z podnikatelské sféry. Naopak velice složité je takový proces kontroly zavést v domácnostech. Každý zdroj vytápění musí projít garanční zkouškou tak aby splňoval zákonné podmínky, ale prozatím dále legislativa nesahá a občan může zařízení používat dle vlastního uvážení a spalovat v něm libovolné palivo. Tento problém by měla částečně vyřešit již zmiňovaná kotlíková dotace automatizací spalovacího procesu s možností použít pouze certifikované palivo.

Zákon o ochraně ovzduší rozděluje znečišťující látky na tuhé, kapalné a plynné, ovšem z praktického hlediska se tyto tři skupiny spojují do různých celků dle způsobu odlučování, stanovení úletu atd. Z jiného pohledu, dle zákona, látky rozdělujeme do pěti hlavních skupin, kde nejvíce sledovaná je nultá skupina, která obsahuje tzv. základní znečišťující látky. Patří sem tuhé znečišťující látky, oxid siřičitý, oxidy dusíku, těkavé organické látky, těžké kovy, oxid uhelnatý, amoniak a soli amonné a polycyklické aromatické uhlovodíky.

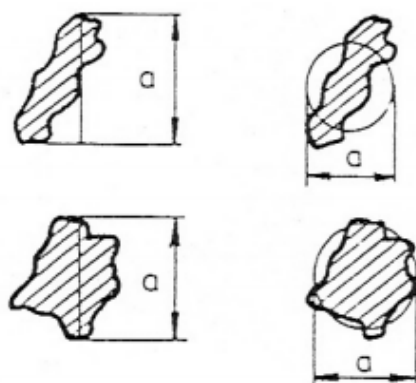
### 4.1 Tuhé znečišťující látky (TZL)

Tuhé znečišťující látky neboli prachy definujeme jako částice tuhého skupenství různé hustoty, struktury, velikosti a tvaru obsažené v plynné fázi proudících spalin. Jsou obsaženy v látkách, které vstupují do spalovacího procesu, což je např. nedokonale spálená hořlavina a popelovina v palivu, tuhé příměsi spalovacího vzduchu a rez ze spalovacího zařízení.

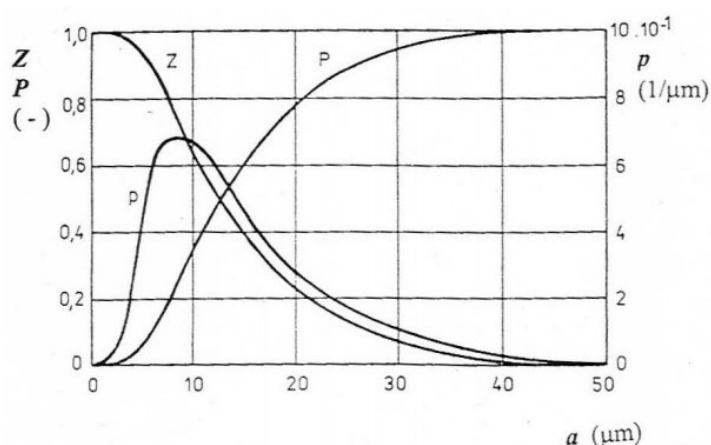
Zásadním parametrem TZL je velikost každé částice (0,1 $\mu$ m – 0,5mm), podle které se stanovuje základní granulometrické složení prachu. Ta se určuje dle Feretova průměru, což je největší rozměr částice ve zvoleném směru a dle průměru gratikulárního kruhu, jehož plocha je nejbližší podobná ploše částice (viz obr. 4.1).

Zastoupení jednotlivých velikostí částic se vyjadřuje křivkou (obr. 4.2):

- Četnosti  $p$  – udává poměrný počet částic určité velikosti ve vzorku
- Zbytků  $Z$  – udává poměrný počet větších částic, než je příslušná částice  $a$
- Propadu  $P$  – udává poměrný počet menších částic, než je příslušná částice  $a$



Obr. 4.1 Feretův průměr a průměr vzorku [12]



Obr. 4.2 Křivka propadu, četnosti a zbytků gratikulárního kruhu [12]

Tvar prachových částic je velice proměnlivý, avšak v principu je rozlišován na tři základní druhy:

- Izometrické částice – v trojúhelníkovém souřadnicovém systému jsou rozměry ve všech osách přibližně shodné (hrudkovitý tvar lze aproximovat koulí nebo krychlí)
- Ploché částice – dva rozměry jsou značně větší než třetí (tvar šupinek, destiček a lamel)
- Vlákenné částice – jeden rozměr je značně větší než zbývající dva (tvar tyčinek, vláken a jehlic)

Každý druh částice vykazuje jiné vlastnosti při usazování v odstředivém, gravitačním nebo elektrostatickém poli, různé reologické vlastnosti a schopnosti tvořit převisy, klenby nebo stěny. Při vysušení nebo naopak zvlhnutí se mohou uvedené vlastnosti výrazně změnit.

Těžké kovy (stopové prvky), které jsou vypouštěny s popílkem do ovzduší nebo odcházejí ve formě tuhých zbytků po spalování, mají hustotu vyšší než  $4500 \text{ kg/m}^3$  (v odstředivém, nebo gravitačním poli vykazují částice s vyšší hustotou lepší odlučivost než částice s nižší hustotou). Ve většině případů jsou však odpařeny ve spalovací komoře a s postupně snižující se teplotou spalin kondenzují, převážně na tuhých částicích. Patří mezi ně silně toxický As, Cd, Hg, Pb, Cr, Th, Ni, potenciálně toxický Co, Cu, Fe, Mn, Se, Zn a méně toxický Sb, Sn a V. Tuhé znečišťující látky mohou být také ve formě aerosolu. Hrubé částice koksu, polokoksu, tuhých pyrolýzních zbytků a minerálních látek o rozměrech  $10\mu\text{m} - 100\mu\text{m}$  se složitými chemicko-fyzikálními procesy při spalování rozpadnou na jemné částice o velikostech  $1\text{nm}$  až  $100\mu\text{m}$ .

Částice TZL jsou z hlediska lidského zdraví nejnebezpečnější o rozměrech  $0,25\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$ , protože se usazují se v plicních sklípcích a mají další škodlivé vlivy na zdraví člověka. Těžké, toxické kovy mají tendenci se akumulovat v potravinovém řetězci a ovlivňují metabolismus tuků a cukrů, způsobují bolesti hlavy, závratě, poruchy trávení atd.

## 4.2 Oxidy síry

Každé uhlí obsahuje síru, která při spalování oxiduje na oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$  – bezbarvý, štiplavě páchnoucí jedovatý plyn) a částečně i oxid sírový ( $\text{SO}_3$ ), jehož množství je závislé na obsahu sirných látek v palivu a způsobu spalování. Rychlost oxidace  $\text{SO}_2$  na  $\text{SO}_3$  v atmosféře je závislá na slunečním záření, teplotách a přítomnosti katalyzátoru, tedy na povětrnostních podmínkách.  $\text{SO}_3$  je ihned hydratován vzdušnou vlhkostí na aerosol  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , který za vzniku síranů reaguje s alkalickými prachovými částicemi. Pokud je nedostatek částic v ovzduší,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  se dostává do srážkových vod, kde dojde k okyselení na  $\text{pH} < 4$  což způsobuje kyselé deště, které uvolňují z půdy Pb, Cd, Cu a poškozují vodu a půdní mikroorganismy. Špatně seřizený proces spalování způsobuje také vznik sirovodíku ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ve spalinách a to hlavně při nedostatku  $\text{O}_2$ .

Oxidace síry je tedy exotermická reakce, přičemž oxidy síry mají negativní dopad na životní prostředí. Některá uhlí obsahují více jak 5% síry. Spalitelná část síry se dá odstranit úpravou uhlí, nebo druhou více využívanou možností je odstranění oxidů síry ze spalin mokrou popřípadě suchou metodou odsiřování.

Oxid siřičitý a kyselý aerosol ovlivňuje smyslové a dýchací funkce, způsobuje akutní i chronickou bronchitidu, astma atd. V menších koncentracích dochází k úhynu lišejníků a poškození fotosyntetického aparátu vyšších rostlin (nejvíce působí na jehličnany).

### 4.3 Oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ )

Mezi oxidy dusíku patří oxid dusnatý ( $\text{NO}$ , tvoří 90%), oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ , tvoří 5-10%), oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ , tzv. rajský plyn) a v poslední řadě  $\text{N}_2\text{O}_4$  a  $\text{N}_2\text{O}_3$ , které se vyskytují jen ve velmi omezené míře.

Podle vzniku (reakce mezi atomem kyslíku a molekulou dusíku – vysoká energetická bariéra) se  $\text{NO}_x$  dělí na tři druhy:

- Termické – na vznik má velký vliv teplota a doba trvání reakce
- Palivové – vznikají hlavně při spalování biomasy a hnědých uhlí, kdy se nedosahuje příliš velkých teplot. Při spalování nad  $900^\circ\text{C}$  je produkce prakticky nezávislá na teplotě, ale na koncentraci kyslíku v zóně plamene
- Rychlé – vznikají při spalování uhlovodíků ve frontě plamene. Proces je závislý hlavně na přebytku vzduchu a je charakterizován krátkodobostí

Množství emisí  $\text{NO}_x$  se dá zásadně snížit vhodným řízením spalovacího procesu a vhodnou konstrukcí spalovacího zařízení. K odstranění  $\text{NO}_x$  slouží selektivní katalytická nebo nekatalytická redukce. Velikost emisí u uhelných kotlů je  $800 - 2500\text{mg}/\text{m}^3$ .

Oxidy dusíku nepříznivě působí na vnitřní orgány lidí. Vznikají nádorové onemocnění, onemocnění dýchacích cest, zhoršuje se transfer  $\text{O}_2$  z plic do krevního oběhu atd. Při vstupu spalin do atmosféry se  $\text{NO}$  přemění na mnohem toxičtější  $\text{NO}_2$ . Dochází k rychlé reakci s atmosférickým ozonem a jeho následné rychlé spotřebě.

### 4.4 Oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ )

Oxid uhelnatý je bezbarvý plyn bez zápachu, který vzniká nedokonalým spalováním (nedostatek vzduchu v zóně hoření nebo rychlé ochlazení plamene) fosilních paliv. Je obsažen v kouřových výfukových plynech, vysokopecním, koksárenském

a degazačním plynu a hlavně ve stacionárních zdrojích, zejména v domácích topeništích. Vznik CO se dá omezit řízeným spalovacím procesem, naopak velké množství CO vzniká při periodickém spalování (nejednou přiložena velká dávka paliva).

CO je silně toxický, váže se na hemoglobin a při vyšší koncentraci omezuje množství červených krvinek určených k přenosu kyslíku.

#### 4.5 Organické polutanty

Organické polutanty jsou uhlovodíky vyskytující se v hydrosféře, litosféře i atmosféře. Některé dále působí v živých organismech.

Organické polutanty dělíme podle těkavosti do tří kategorií:

- Těkavé organické látky (VOC) – ethen, propen, xylen, izopren atd.
- Polotěkavé organické látky (SVOC) – polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany (PCDD/F) a většina polyaromatických uhlovodíků (PAU)
- Netěkavé organické látky – některé druhy plastů

Organické látky, které po dlouhou dobu setrvávají v prostředí beze změny, tvoří významnou skupinu tzv. perzistentních organických polutantů (POP). Jsou odolné vůči termickému, biochemickému, chemickému a fotochemickému rozkladu, a proto se kumulují v půdě, sedimentech i živých organismech. Patří zde látky spadající do pesticidů, průmyslových chemikálií a nežádoucích vedlejších produktů.

#### 4.6 Oxid uhličitý a skleníkový efekt

Oxid uhličitý je součástí atmosféry a konečným produktem dokonalého spalování fosilních paliv. Proto není považován za škodlivinu, ale za jeden z plynů, který způsobuje skleníkový efekt. Ten zadržuje nízkofrekvenční tepelné záření (před průchodem atmosférou a dopadem na zem vysokofrekvenční sluneční záření) u povrchu. Díky tomu je průměrná teplota zemského povrchu 15°C a ne -18°C. Je tedy jednou z podmínek života na zemi.

V současné době se hledají způsoby jak omezit antropogenní činnost člověka (např. vyšší účinnost energetických systémů), a tím tvorbu oxidu uhličitého a následného

skleníkového efektu, který se nejvíce spojuje s globálním oteplováním. Je však důležité vědět, že spalování uhlí způsobuje jen tzv. dodatkový skleníkový efekt. Zhruba dvě třetiny skleníkového efektu zajišťuje vodní pára. Proto má člověkem způsobená produkce skleníkových plynů (3% oxid uhličitý + ostatní plyny) nepříliš velkou váhu.

## 5. PROCES SPALOVÁNÍ

Spalování je chemický proces rychlé oxidace probíhající při každé reálné teplotě. Čím je teplota vyšší, tím větší je rychlost oxidace. Projeví-li se v důsledku dostatečně vysoké teploty světelný efekt, jedná se již o hoření, což je fyzikálně-chemický děj, při kterém, stejně jako u spalování, aktivní hořlavina paliva (H, C, S) reaguje se vzdušným kyslíkem ( $O_2$ ). Vlivem uvolňování tepla, které využíváme k vytápění, ohřevu vody atd., se jedná o exotermickou reakci.

Spalovací proces můžeme rozdělit do tří částí:

- Zapalování – nejdůležitější část, při které dochází k sušení a ohřevu paliva, následnému uvolnění a zapálení prchavé hořlaviny a v poslední fázi k zapálení a hoření tuhého zbytku
- Hoření – stabilní režim, do kterého se dá zasahovat. Hoří fixní uhlík, čímž se uvolňuje se podstatná část tepla
- Dohořívání – vyhořívají poslední zbytky paliva

Z hlediska dokonalosti rozdělujeme spalování na:

- Dokonalé – veškerá hořlavina se přemění na plynnou fázi (do 5% nedopalu)
- Nedokonalé – tuhé zbytky po spálení obsahují více jak 5% nedopalu

Dle součinitele přebytku vzduchu rozdělujeme spalování na:

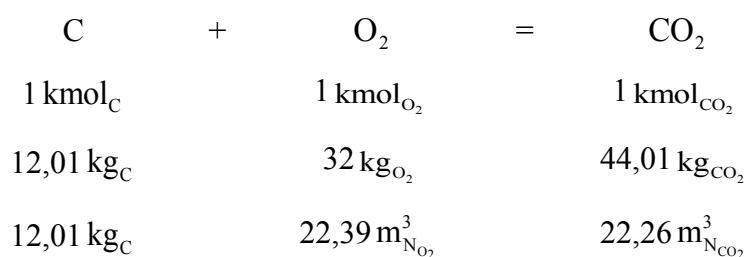
- Podstechiometrické ( $n < 1$ ) – přivedené množství vzduchu nestačí ke spálení veškeré hořlaviny
- Stechiometrické ( $n = 1$ ) – k palivu je přivedeno přesně takové množství vzduchu, jaké je potřeba k dokonalému vyhoření. V praxi nereálné
- Nadstechiometrické ( $n > 1$ ) – přivedené množství vzduchu je větší, než je potřeba ke spálení veškeré hořlaviny. Ve spalinách se objevuje nezreagovaný kyslík

## 5.1 Spalování tuhých paliv

Provádí se tzv. stechiometrické výpočty, díky nimž se zjišťuje potřebné množství spalovacího vzduchu, množství vyprodukovaných spalin a koncentrace jednotlivých složek ve spalinách. Celý výpočet je brán jako ideální, to znamená, že reakce probíhají se 100% účinností.

Stechiometrické rovnice vychází ze spalovacích reakcí aktivních prvků hořlaviny (H, C, S) za normálních podmínek (0°C, 101325Pa):

### a) Spalovací reakce uhlíku a kyslíku



Hmotnostní vyjádření

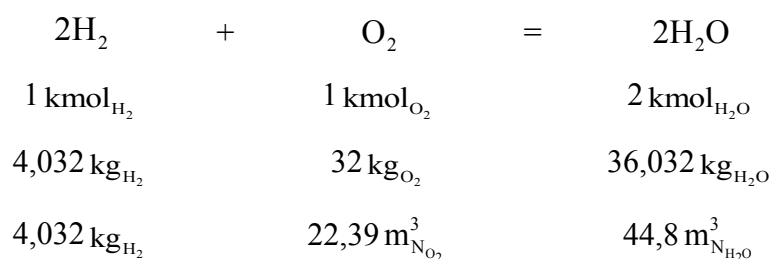
- Pro spálení 1kg C je potřeba  $\frac{32}{12,01} = 2,667\text{kg O}_2$
- Spálením 1kg C vznikne  $\frac{44,01}{12,01} = 3,667\text{kg CO}_2$

Objemové vyjádření

- Pro spálení 1kg C je potřeba  $\frac{22,39}{12,01} = 1,865\text{m}_N^3 \text{O}_2$
- Spálením 1kg C vznikne  $\frac{22,26}{12,01} = 1,855\text{m}_N^3 \text{CO}_2$



## b) Spalovací reakce vodíku a kyslíku



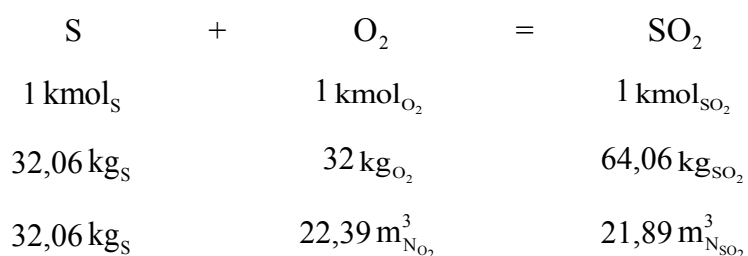
Hmotnostní vyjádření

- Pro spálení 1kg H<sub>2</sub> je potřeba  $\frac{32}{4,032} = 7,937\text{kg O}_2$
- Spálením 1kg H<sub>2</sub> vznikne  $\frac{36,032}{4,032} = 8,937\text{kg H}_2\text{O}$

Objemové vyjádření

- Pro spálení 1kg H<sub>2</sub> je potřeba  $\frac{22,39}{4,032} = 5,553\text{m}_N^3 \text{ O}_2$
- Spálením 1kg H<sub>2</sub> vznikne  $\frac{44,8}{4,032} = 11,11\text{m}_N^3 \text{ H}_2\text{O}$

## c) Spalovací reakce síry a kyslíku



Hmotnostní vyjádření

- Pro spálení 1kg S je potřeba  $\frac{32}{32,06} = 0,998\text{kg O}_2$
- Spálením 1kg S vznikne  $\frac{64,06}{32,06} = 1,998\text{kg SO}_2$

## Objemové vyjádření

- Pro spálení 1kg S je potřeba  $\frac{22,39}{32,06} = 0,699\text{m}_N^3 \text{O}_2$
- Spálením 1kg S vznikne  $\frac{21,89}{32,06} = 0,683\text{m}_N^3 \text{SO}_2$

Když známe ze spalovacích reakcí poměrné hmotné podíly aktivních složek hořlaviny a chceme zjistit potřebné množství spalovacího vzduchu, musíme prvně vyjádřit teoretickou spotřebu kyslíku pro spálení 1kg paliva. Kyslík obsažený v palivu od výpočtu odečítáme, jelikož jej není nutné dodávat. Vyjádření stechiometrických rovnic uvedu v objemových jednotkách z důvodu častějšího využívání v praxi.

Teoretická spotřeba kyslíku pro spálení 1kg paliva:

$$V_{\text{O}_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{4} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r - \frac{22,4}{32} \cdot O_2^r \quad \left[ \text{m}_N^3 / \text{kg} \right]$$

Kde	C	obsah uhlíku v surovém palivu	[l]
	H	obsah vodíku v surovém palivu	[l]
	S	obsah síry v surovém palivu	[l]
	O <sub>2</sub>	obsah kyslíku v surovém palivu	[l]

Teoretickou spotřebu spalovacího vzduchu pro spálení 1kg paliva zjistíme, když teoretickou spotřebu kyslíku podělíme obsahem kyslíku v přiváděném vzduchu, což je v našich podmínkách 21% v objemových jednotkách.

Teoretické množství suchého vzduchu pro spálení 1kg paliva:

$$V_{\text{vz},t}^s = V_{\text{O}_2,t} \cdot \frac{100}{21} \quad \left[ \text{m}_N^3 / \text{kg} \right]$$

Kde	V <sub>O<sub>2</sub>,t</sub>	stechiometrické množství kyslíku	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> / kg]
-----	------------------------------	----------------------------------	------------------------------------

Známe-li součinitel přebytku vzduchu, můžeme vyjádřit skutečné množství vzduchu. Možnosti výpočtu součinitele přebytku vzduchu uvedu v následující kapitole.

Skutečné množství suchého vzduchu pro spálení 1kg paliva:

$$V_{\text{vz,sk}}^{\text{s}} = V_{\text{vz,t}}^{\text{s}} \cdot n \quad [ \text{m}_N^3 / \text{kg} ]$$

Kde  $V_{\text{vz,t}}^{\text{s}}$  množství teoretického vzduchu suchého  $[ \text{m}_N^3 / \text{kg} ]$

$n$  součinitel přebytku vzduchu  $[1]$

Vzduch, který přivádíme do spalovací komory, však nikdy nebude suchý. Vždy bude obsahovat vodu ve formě vodní páry, která bude závislá na relativní vlhkosti vzduchu  $\varphi$ . Pokud známe relativní vlhkost, můžeme vypočítat součinitel vlhkosti  $v$ . V našich podmínkách při 20°C a relativní vlhkosti vzduchu 60% je součinitel vlhkosti 1,015.

Součinitel vlhkosti:

$$v = 1 + \frac{\varphi \cdot p''}{p_s - p''} \quad [1]$$

Kde  $\varphi$  relativní vlhkost  $[1]$

$p''$  parciální tlak ve vlhkém vzduchu  $[\text{Pa}]$

$p_s$  celkový tlak vlhkého vzduchu  $[\text{Pa}]$

K výpočtu množství skutečného vlhkého vzduchu už jen stačí vynásobit množství teoretického suchého vzduchu součinitelem vlhkosti.

Množství skutečného vlhkého vzduchu pro spálení 1kg paliva:

$$V_{\text{vz,sk}}^{\text{v}} = V_{\text{vz,sk}}^{\text{s}} \cdot v \quad [ \text{m}_N^3 / \text{kg} ]$$

Kde  $V_{\text{vz,sk}}^{\text{s}}$  množství skutečného suchého vzduchu  $[ \text{m}_N^3 / \text{kg} ]$

$v$  součinitel vlhkosti  $[1]$

Nyní můžeme přejít k výpočtu vyprodukovaných spalin. Při stechiometrickém spalování sušiny za pomoci suchého vzduchu, budou spaliny obsahovat  $\text{CO}_2$  po spálení uhlíku,  $\text{SO}_2$  po spálení síry a  $\text{N}_2$  z paliva a spalovacího vzduchu (0,79%).

Teoretické množství suchých spalin:

$$V_{\text{sp,t}}^{\text{s}} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{32} \cdot S + \frac{22,4}{28} \cdot N + \frac{79}{100} \cdot V_{\text{vz,t}}^{\text{s}} \quad [\text{m}_N^3 / \text{kg}]$$

Kde	C	obsah uhlíku v surovém palivu	[l]
	S	obsah síry v surovém palivu	[l]
	N	obsah dusíku v surovém palivu	[l]
	$V_{\text{vz,t}}^{\text{s}}$	množství teoretického vzduchu suchého	$[\text{m}_N^3 / \text{kg}]$

K zjištění vzniklého množství skutečných spalin při spalování sušiny je nutné počítat s přebytkem vzduchu.

Skutečné množství suchých spalin:

$$V_{\text{sp,sk}}^{\text{s}} = V_{\text{sp,t}}^{\text{s}} + (n - 1) \cdot V_{\text{vz,t}}^{\text{s}} \quad [\text{m}_N^3 / \text{kg}]$$

Kde	$V_{\text{sp,t}}^{\text{s}}$	množství spalin teoretických suchých	$[\text{m}_N^3 / \text{kg}]$
	n	součinitel přebytku vzduchu	[l]
	$V_{\text{vz,t}}^{\text{s}}$	množství teoretického vzduchu suchého	$[\text{m}_N^3 / \text{kg}]$

Tak jako to bylo u spalovacího vzduchu i zde je nutností počítat s objemem vodní páry. K vypočtení skutečných vlhkých spalin musíme ke skutečným suchým spalinám připočíst součinitel vlhkosti. Dále vodu, která se vyskytuje v palivu a při spalování se vypaří. Jako poslední člen, jenž ovlivňuje vlhkost spalin, vodní páru, vytvořenou při spalování vodíku obsaženého v palivu.

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,sk}^s + V_{H_2O} = V_{sp,sk}^s + \frac{22,4}{2} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{18} \cdot w^r + (v-1) \cdot V_{vz,sk}^s$$

Kde	$V_{sp,sk}^s$	množství spalin skutečných suchých	$[m_N^3 / kg]$
	$V_{H_2O}$	objem vodní páry ve spalinách	$[m_N^3 / kg]$
	$H_2^r$	obsah vodíku v surovém palivu	$[l]$
	$w^r$	obsah vody v palivu	$[l]$
	$V_{vz,sk}^s$	množství vzduchu skutečného suchého	$[m_N^3 / kg]$

Zjištěné množství skutečných spalin nám pomůže určit koncentraci jednotlivých složek, které vzniknou při spalování, a to jsou  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  a  $H_2O$ . Součet těchto koncentrací nám pak musí dát 100%.

Koncentrace jednotlivých složek ve spalinách:

$$\omega_i = \frac{V_i}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 \quad [%]$$

Kde	$V_i$	obsah jednotlivých složek ve spalinách	$[m_N^3 / kg]$
	$V_{sp,sk}^v$	množství spalin skutečných vlhkých	$[m_N^3 / kg]$

## 5.2 Součinitel přebytku vzduchu a jeho stanovení

Aby došlo k procesu hoření, je nutné dodat určité množství kyslíku (vzduchu), který bude reagovat s aktivní hořlavinou paliva. Spalovací rovnice popisující tuto reakci vyjadřují minimální (teoretické) množství kyslíku potřebné pro kompletní hoření. Přebytek vzduchu (poměr mezi skutečným a teoretickým množstvím spalovacího vzduchu) je tedy roven jedné.

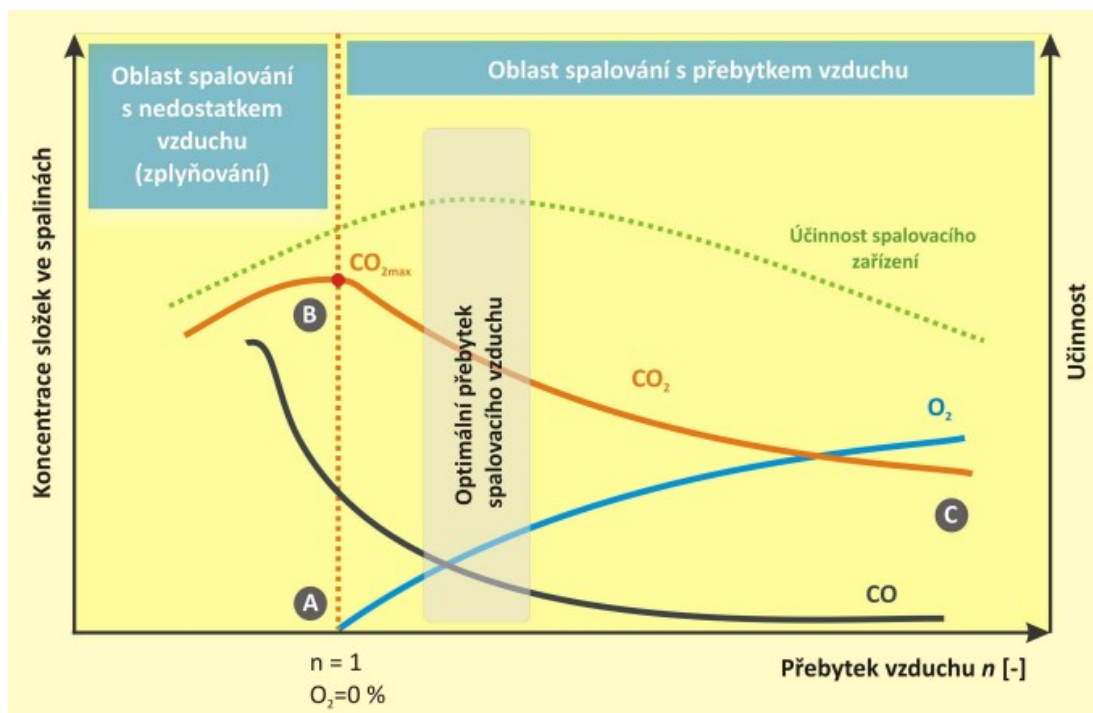
Při reálném spalování se do ohniště kvůli nedokonalosti spalovacího procesu a minimalizaci CO dodává větší množství než teoretické. Poté se jedná o spalování s přebytkem vzduchu.

Přebytek vzduchu ( $n$ ) pro různá spalovací zařízení:

- Automatické a zplyňovací kotle 1,5-2
- Kotle s ručním přihazováním paliva 2-4
- Otevřené krby až 20

Důsledky zvyšujícího se přebytku vzduchu (obr. 5.1):

- Zlepšuje se účinnost spalování až do dosažení místa s optimálním přebytkem vzduchu
- Klesá CO
- Roste množství spalin → roste komínová ztráta → snižuje se účinnost zařízení



Obr. 5.1 Vliv přebytku vzduchu na účinnost a kvalitu spalování [3]

Přebytek spalovacího vzduchu se při reálném provozu reguluje množstvím nasávaného vzduchu a to pomocí regulační klapky vzduchu, otevřením dvířek popelníku atd. Záleží také na těsnosti spalovacího zařízení (těsnící šňůry apod.).

Přebytek vzduchu se na spalovacím zařízení většinou stanoví z analýzy spalin a to ze dvou naměřených hodnot:

- Z koncentrace kyslíku

$$n = 1 + \frac{V_{sp,sk}^s}{V_{vz,t}^s} \cdot \frac{O_2}{0,21 - O_2} \quad [1]$$

Kde  $V_{sp,sk}^s$  množství spalin skutečných suchých  $[m_N^3 / kg]$

$V_{vz,t}^s$  množství vzduchu teoretického suchého  $[m_N^3 / kg]$

$O_2$  množství kyslíku ve spalinách  $[1]$

- Z koncentrace oxidu uhličitého

$$n = 1 + \frac{V_{sp,sk}^s}{V_{vz,t}^s} \cdot \left( \frac{CO_{2,max}}{CO_2} - 1 \right) \quad [1]$$

Kde  $V_{sp,sk}^s$  množství spalin skutečných suchých  $[m_N^3 / kg]$

$V_{vz,t}^s$  množství vzduchu teoretického suchého  $[m_N^3 / kg]$

$CO_2$  množství oxidu uhličitého ve spalinách  $[1]$

$CO_{2,max}$  max. množství oxidu uhličitého ve spalinách  $[1]$

## 6. PŘENOS TEPLA

Přenosem tepla se označuje transport tepelné energie (vedením, prouděním nebo zářením) mezi tělesy o nestejných teplotách nebo uvnitř tělesa mezi místy o nestejných teplotách. Je jedním ze základních přenosových jevů. Setkáváme se s ním například při slunečním záření, kdy Slunce o vyšší teplotě předává teplo Zemi o nižší teplotě. V energetice se setkáme s přenosem tepla např. při procesu hoření, kdy plamen a spaliny předávají teplo okolnímu prostředí. Matematicky se přenosové jevy dají popsat zákony zachování a zákony přenosu.

Mezi zákony zachování patří:

- Zákon zachování hmoty – objemový nebo hmotový tok, rovnice kontinuity
- Zákon zachování energie – I. Zákon termodynamiky
- Zákon zachování hybnosti – II. Newtonův pohybový zákon

Za zákony přenosu považujeme:

- Fourierův zákon vedení tepla – vztah mezi teplotním gradientem a hustotou tepelného toku
- Newtonův zákon viskozity – vztah popisující chování tekutiny
- Fickův zákon difuze hmoty – vztah popisující potřebnou dobu k přenosu určitého množství hmoty při difuzi

### 6.1 Přenos tepla vedením (kondukce)

Fyzikální podstatou přenosu tepla vedením je pohyb strukturálních částic hmoty. V pevných dielektrických tělesech a kapalinách se pohyb částic uskutečňuje pružným vlněním, v kovech difuzí volných elektronů a v plynech difuzí atomů a molekul.

Fourierův zákon popisující vedení tepla:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad [W/m^2]$$



Kde  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti materiálu [ W / m · K ]  
 grad t teplotní gradient [ K / m ]

U homogenní neomezené stěny, jejíž povrchy mají různou teplotu, prochází dle Fourierova zákona tepelný tok:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{t_{s1} - t_{s2}}{l} \cdot S \quad [ \text{W} ]$$

Kde  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti materiálu [ W / m · K ]  
 $t_{s1}, t_{s2}$  teploty povrchů stěn [ °C, K ]  
 l tloušťka stěny [ m ]  
 S povrch stěny [ m<sup>2</sup> ]

## 6.2 Přenos tepla prouděním (konvekce)

Přenos tepla prouděním se objevuje pouze u tekutin (vzdušin a kapalin). Ať už uvnitř proudící tekutiny, nebo na rozhraní mezi tekutinou a pevným tělesem (přestup tepla), ho vždy doprovází vedení tepla.

Newtonova rovnice pro určení tepelnou toku:

- Pro ohřev stěny (chlazení tekutiny)

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t_t - t_s) \cdot S \quad [ \text{W} ]$$

- Pro chlazení stěny (ohřev tekutiny)

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t_s - t_t) \cdot S \quad [ \text{W} ]$$

Kde  $\alpha$  součinitel přestupu tepla [ W / m<sup>2</sup> · K ]  
 $t_s$  teplota stěny [ °C, K ]  
 $t_t$  teplota tekutiny [ °C, K ]  
 S teplosměnný povrch [ m<sup>2</sup> ]

Druhy přenosu tepla konvekcí:

- Přenos tepla bez změny skupenství
  - Volná konvekce
  - Vynucená konvekce
- Přenos tepla při změně skupenství
  - Při kondenzaci čisté páry
  - Při varu jednosložkových kapalin

### 6.2.1 Přenos tepla konvekcí bez změny skupenství

Při výpočtu přestupu tepla konvekcí se vychází z teorie podobnosti tepelných toků a teplotních polí, které se řídí rovnicí pohybovou, rovnicí energie a rovnicí kontinuity. Lze z nich získat bezrozměrné veličiny, které charakterizují daný děj (fyzikální vlastnosti tekutiny v závislosti na teplotě), tzv. kritéria podobnosti.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha$  u konvekce se nejčastěji využívají tyto kritériální rovnice:

- Nusseltovo kritérium – charakterizuje přenos tepla v mezní vrstvě tekutiny

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad [1]$$

Kde  $\alpha$  součinitel přestupu tepla [ W / m<sup>2</sup> · K ]

$L$  charakteristický rozměr [ m ]

$\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ W / m · K ]

- Reynoldsovo kritérium – porovnává setrvačné a třecí síly a charakterizuje proudění

$$\text{Re} = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad [1]$$

Kde  $w$  rychlost proudění [ m/s ]

$L$  charakteristický rozměr [ m ]

$\nu$  kinetická viskozita tekutiny [m<sup>2</sup>/s]

Druhy proudění:

- Laminární (Re<2320) – proudové čáry jsou rovnoběžné a nemísí se
  - Přejídnová oblast (Re=2320-4000)
  - Turbulentní (Re>4000) – proudové čáry se navzájem promíchávají
- Grashofovo kritérium – charakterizuje intenzitu cirkulace vlivem rozdílu teplot při volném proudění

$$Gr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \gamma \cdot \Delta t \quad [1]$$

Kde	$g$	tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
	$L$	charakteristický rozměr	[m]
	$\nu$	kinetická viskozita tekutiny	[m <sup>2</sup> /s]
	$\gamma$	koeficient teplotní objemové roztažnosti	[1/K]
	$\Delta t$	rozdíl teplot	[°C]

- Prandtlovo kritérium – zahrnuje vlastnosti tekutiny

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad [1]$$

Kde	$\nu$	kinetická viskozita tekutiny	[m <sup>2</sup> /s]
	$a$	součinitel teplotní vodivosti	[m <sup>2</sup> /s]

### 6.3 Přenos tepla zářením

Třetí způsob sdílení tepla se uskutečňuje přenosem elektromagnetických vln, vznikajících z důvodu tepelného stavu těles. Po dopadu na jiné těleso nebo při jeho průchodu se část zářivé energie mění zpět na tepelnou, popřípadě se od povrchu tělesa odrazí. Záření nevyžaduje hmotné prostředí, šíří se tedy i ve vakuu.

Při výpočtu se vychází ze čtyř zákonů, ve kterých se předpokládá, že zářičem je dokonale černé těleso.

Základní zákony záření:

- Planckův zákon – vyjadřuje spektrální intenzitu v závislosti na absolutní teplotě a vlnové délce

$$I_{\lambda,0} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad [\text{W/m}^3]$$

Kde	$c_1$	Planckova konstanta ( $3,741832 \cdot 10^{-16}$ )	$[\text{W/m}^2]$
	$c_2$	Planckova konstanta ( $1,438786 \cdot 10^{-2}$ )	$[\text{m} \cdot \text{K}]$
	$\lambda$	vlnová délka	$[\text{m}]$
	$T$	absolutní teplota	$[\text{K}]$

- Stefan-Boltzmannův zákon – vyjadřuje integrální zářivý tok

$$E_0 = \int_0^{\infty} I_{\lambda,0} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

Kde	$I_{\lambda,0}$	intenzita spektrálního zářivého toku	$[\text{W/m}^3]$
	$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )	$[\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$
	$T$	absolutní teplota	$[\text{K}]$

- Wienův posouvací zákon – vyjadřuje maximální vyzářovanou energii o určité vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \quad [\mu\text{m} \cdot \text{K}]$$

Kde	$\lambda_{\max}$	vlnová délka s nejvyšším měrným monochromatickým tokem	$[\text{m}]$
	$T$	absolutní teplota	$[\text{K}]$

- Lambertův zákon – vyjadřuje pokles zářivosti zdroje s rostoucím úhlem  $\varphi$

$$E_{0,\varphi} = E_{0,n} \cdot \cos \varphi \quad [W/m^2]$$

Kde  $E_{0,n}$  hustota zářivého toku ve směru normály  $[W/m^2]$

Ve skutečnosti mají zářiče od dokonale černého tělesa řadu odchylek:

- Vyzářené a pohlcené množství zářivé energie je vždy menší
- Neřídí se dokonale Lambertovým zákonem
- Spektrální intenzita záření často neodpovídá Planckovu zákonu

Z těchto důvodů byl zaveden pojem šedé těleso, které má spektrální složení v závislosti na vlnové délce stejné jako dokonale černé těleso. Mohou se tedy beze změny používat zákony Wienův, Planckův a Stefan-Boltzmannův, ve kterém ale zavádíme pokusně určený bezrozměrný součinitel  $\varepsilon$ . Ten se pohybuje v rozmezí 0 až 1.

Stefan-Boltzmannův zákon pro skutečné těleso:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W/m^2]$$

Kde	$\varepsilon$	poměrná zářivost (emisní součinitel)	[1]
	$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )	$[W/m^2 \cdot K^4]$
	T	absolutní teplota	[K]

### 6.3.1 Zářění plynů a par

V případě přenosu tepla zářením mají význam plyny víceatomové, protože jedno a většina dvou atomových plynů se považují za dokonale propustné. V mém případě se jedná o záření plynů ve spalinách a to především oxidu uhličitého a vodní páry. Na rozdíl od pevných těles se vyzařování a pohlcování u plynů uskutečňuje v celém objemu a jen v určitých intervalech vlnových délek. Pro výpočet se nejčastěji předpokládá platnost upraveného Stefan-Boltzmannova zákona.

Intenzita vyzařování plynného tělesa do dokonale černého prostoru o teplotě 0 K:

$$E_p = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot T_p^4 \quad [W / m^2]$$

Kde	$\varepsilon_p$	poměrná zářivost plynu (emisní součinitel)	[1]
	$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )	[W / m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> ]
	T	absolutní teplota	[K]

Emisní součinitel plynu  $\varepsilon_p$ , který obsahuje CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon \quad [1]$$

Kde:	$\varepsilon_{CO_2}$	emisní součinitel oxidu uhličitého	[1]
	$\beta$	korekční součinitel	[1]
	$\varepsilon_{H_2O}$	emisní součinitel vodní páry	[1]
	$\Delta\varepsilon$	korekce vzájemného překrytí	[1]

Emisní součinitelé  $\varepsilon_{CO_2}$  a  $\varepsilon_{H_2O}$  se odečítají z diagramů v závislosti na střední teplotě plynu, účinné tloušťky vrstvy ( $l = 3,4 \cdot \frac{V_{plochy}}{S_{stěn}}$  pro  $l < 1m$  a  $l = 3,6 \cdot \frac{V_{plochy}}{S_{stěn}}$  pro  $l > 1m$ ) a parciálních tlaků. Korekční součinitel  $\beta$  se taktéž odečítá z diagramu v závislosti na účinné tloušťce vrstvy a parciálním tlaku. Korekce vzájemného překrytí spekter  $\varepsilon_{CO_2}$  a  $\varepsilon_{H_2O}$  se může při běžných výpočtech zanedbat.

Hustota tepelného toku, předávaná plynným tělesem stěně, jež ho obklopuje:

$$q_{p,s} = \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_p \cdot T_p^4 - A_p \cdot T_s^4) \quad [W / m^2]$$

Kde	$\varepsilon'_s$	efektivní stupeň černosti stěny	[1]
	$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )	[W / m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> ]
	$\varepsilon_p$	poměrná zářivost plynu (emisní součinitel)	[1]
	$T_p$	absolutní teplota plynu	[K]

$A_p$  absorpční součinitel [1]

$T_s$  absolutní teplota stěny [K]

Efektivní stupeň černosti stěny:

$$\varepsilon'_s = 0,5 \cdot (\varepsilon_s + 1) \quad [1]$$

Kde  $\varepsilon_s$  emisní součinitel stěny (0,8-1) [1]

Absorbční součinitel:

$$A_p = \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \left( \frac{T_p}{T_s} \right)^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \left( \frac{T_p}{T_s} \right)^n$$

Kde  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$  emisní součinitel oxidu uhličitého [1]

$T_p$  absolutní teplota plynu [K]

$T_s$  absolutní teplota stěny [K]

$\beta$  korekční součinitel [1]

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  emisní součinitel vodní páry [1]

$n$  mocnitel závislý na teplotě stěny [1]

- $t_s < 500^\circ\text{C} \rightarrow n=0,5$
- $t_s > 900^\circ\text{C} \rightarrow n=0,4$
- $500^\circ\text{C} < t_s < 900^\circ\text{C} \rightarrow n=0,45$

### 6.3.2 Tepelné záření plamene

Spalování paliv je doprovázeno světelným efektem plamene. Jeho barva je dána prvkem, který je zrovna spalován. Například plamen oxidu uhelnatého a vodíku je namodralý. Tento plamen se označuje jako nesvitivý a jeho záření se dá počítat stejně jako záření plynů.

Spalováním uhlovodíků vzniká žlutavý plamen, který se vytvořil z žhnoucích částic uhlíku. Z nespálených produktů paliva, které obsahují více uhlíku, zbývají pomaleji hořící

částice o velikosti přibližně 3 $\mu$ m. Při použití práškového uhlí se v plamenu kromě uhlíkových částic objevují i žhnoucí částice popeloviny. Tyto pevné částice mohou několikanásobně převýšit záření samotných plynů.

Žlutavý plamen se označuje jako svítivý a svou podstatou je blízk záření pevných těles. Jeho výpočet je přibližný, hlavně kvůli složitému určení střední efektivní teploty plamene a stupně černosti.

Hustota tepelného toku předávaná svítivým plamenem stěně, jenž ho obklopuje:

$$q_{pl,s} = \varepsilon_{pl} \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_{pl}^4 - T_s^4) \quad [W / m^2]$$

Kde:	$\varepsilon_{pl}$	stupeň černosti plamene (0,3-0,99)	[1]
	$\varepsilon_s$	stupeň černosti stěny	[1]
	$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )	[W / m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> ]
	$T_{pl}$	absolutní teplota plamene	[K]
	$T_s$	absolutní teplota stěny	[K]



## **7. SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ BENEKOV C FIRMY BENEKOVterm s.r.o**

Firma BENEKOVterm s.r.o, pro kterou zpracovávám tuhle diplomovou práci, je od roku 1991 ryze českou soukromou firmou sídlící v Horním Benešově. Zabývá se problematikou spalování uhlí a biomasy. V současné době vyrábí automatické kotle na spalování uhlí třetí a čtvrté třídy a dále automatické kotle na spalování dřevních pelet, obilí, dřevní štěpky a kusového dřeva. V neposlední řadě provádí přestavby litinových kotlů na automatické. Své výrobky, které jsou využívány pro vytápění rodinných domů, škol, firem a jiných podobných objektů, vyváží do 23 evropských zemí.

### **7.1 Spalovací zařízení Benekov řady C**

Kotel Benekov C, pro který navrhuji zařízení pro snížení úletu TZL, se vyrábí o třech výkonech:

- Benekov C15 (nově C16) – pro vytápění malých a nízkoenergetických rodinných domů, chat a jiných objektů, tepelný výkon nepřesahuje 15kW, jmenovitý výkon kotle 14kW
- Benekov C25 (nově C26) – pro vytápění rodinných domků, kancelářských budov, chat, malých provozoven a jiných objektů, tepelný výkon nepřesahuje 25kW, jmenovitý výkon kotle 25kW
- Benekov C50 (nově C51) – pro vytápění obchodů, škol, velkých rodinných domků, rekreačních zařízení, kancelářských budov, provozoven a jiných objektů, tepelný výkon nepřesahuje 50kW, jmenovitý výkon 48kW

Tato řada kotlů je certifikována pro spalování hnědého uhlí Ořech 2 (viz tab. 11.1)

#### **7.1.1 Konstrukce a technické údaje kotle Benekov C25**

Kotel Benekov C o jmenovitém výkonu 25kW je nejprodávanější ve své řadě a proto zařízení ke snížení úletu TZL budu navrhovat pro jeho parametry:

## ROZMĚRY KOTLE

Hmotnost	kg	371
Obsah vodního prostoru	dm <sup>3</sup>	89
Průměr kouřovodu	mm	145
Teplosměnná plocha kotle	m <sup>2</sup>	2,84
Kapacita zásobníku paliva	dm <sup>3</sup>	370
Rozměry kotle: šířka x hloubka x výška	mm	1165 x 972 x 1475

## TECHNICKÉ PARAMETRY

Třída kotle dle ČSN EN 303-5		3
Pracovní přetlak vody	bar	2
Zkušební přetlak vody	bar	4
Doporučení provozní teplota topné vody	°C	65 – 80
Nejmenší teplota vstupní vody	°C	60
Hydraulická ztráta kotle		
$\Delta T=10K$	mbar	16
$\Delta T=20K$	mbar	4
Hodnota akustického tlaku	db	46 ± 3
Maximální elektrický příkon (ventilátor + pohon)	W	81

## TEPELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY

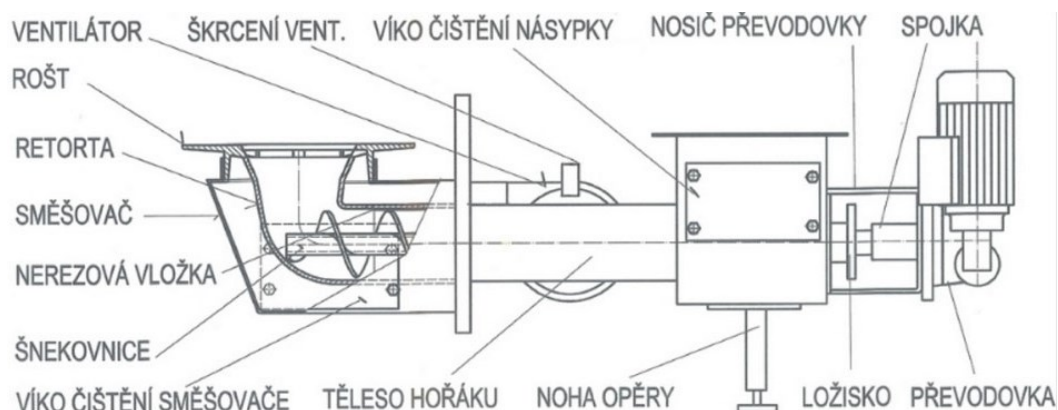
Jmenovitý výkon	kW	25
Regulovatelný výkon	kW	7,5 – 25
Spotřeba paliva	kg/hod	1,7 – 6,3
Doba hoření při jmenovitém výkonu a plném zásobníku	h	48
Teplota spalin jdoucích do komína		
Při jmenovitém výkonu	°C	162
Při minimálním výkonu	°C	87
Účinnost	%	86,8
Hmotnostní průtok spalin na výstupu		
Při jmenovitém výkonu	kg/s	0,016
Při minimálním výkonu	kg/s	0,007

## NAMĚŘENÁ HODNOTA TZL

TZL při 10% O <sub>2</sub> a výkonu kotle 100%	mg/m <sup>3</sup>	54
--	-------------------	----

Hlavní část kotle zaujímá kotlové těleso svařované z ocelových kotlových plechů, jejichž tloušťka na rozhraní spalin a topné vody je 5mm. Spalovací komora s hořákem je umístěna v přední části kotlového tělesa a 3tahový lamelový výměník, ve kterém dochází k rozhodujícímu předávání tepla ze spalin do topné vody, je umístěn v zadní části. Teplosměnné plochy lze průběžně mechanicky čistit pomocí páky na boku kotle.

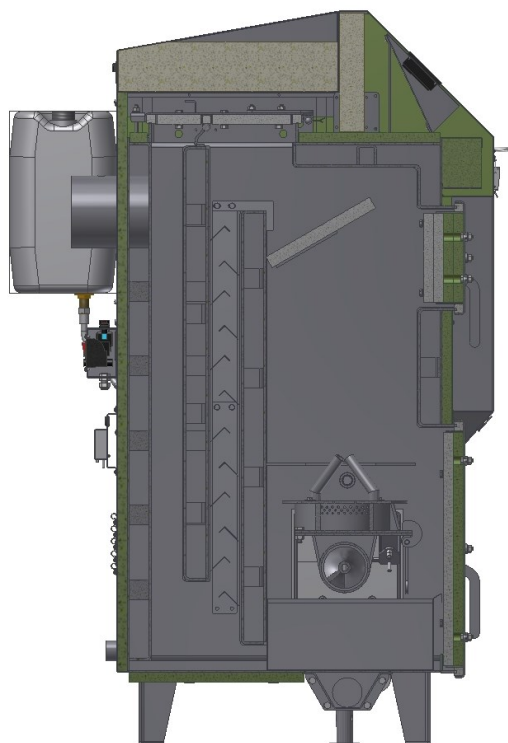
Retortový hořák (obr. 7.1), pracující na principu spodního přikládání paliva, je tvořen litinovým roštem a šnekovým podavačem paliva, který se skládá ze žlabu pro přívod paliva, kanálu pro přívod spalovacího vzduchu a jejich pružným spojením sloužícím k zamezení vstupu kouře do zásobníku paliva a pro vyrovnání tlaku pod ohništěm.



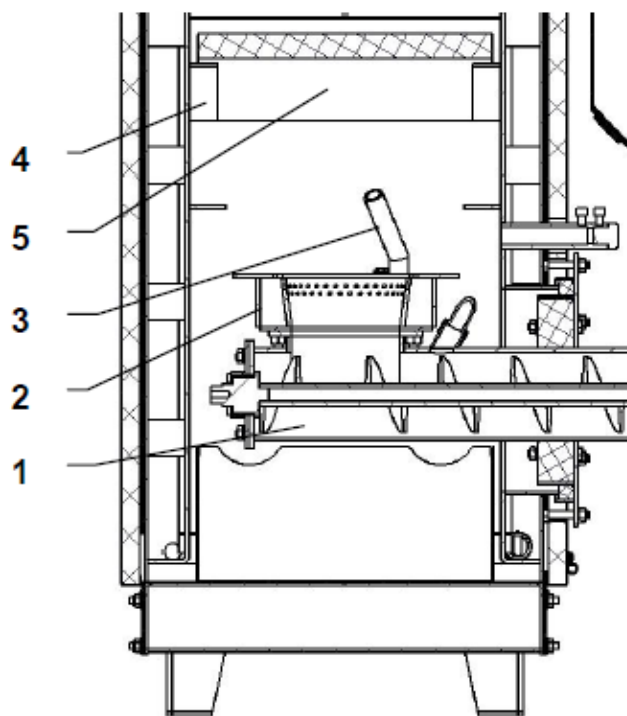
Obr. 7.1 Schéma retortového hořáku [19]

Palivo, v mém případě uhlí, je ze zásobníku dopravováno v cyklech šnekovým dopravníkem do topeniště, kde se vyhrnuje na rošt a postupně vyhořívá. Tento proces je pomalý z důvodu nahřívání paliva a postupného uvolňování prchavé hořlaviny z paliva blížícího se k hořící vrstvě. Uvolněná prchavá hořlavina putuje hořící vrstvou, kde dojde k jejímu zapálení. Dohořívá ve spalovacím prostoru. Hořící vrstva je tvořena odplyněnými pevnými zbytky paliva, které vyhořívají na roštu, pod který je přiváděn primární spalovací vzduch. Trubky (obr. 7.3), které jsou přivařené k roštu, slouží k přívodu sekundárního vzduchu. Tuhé zbytky po spalování jsou vytlačovány k hraně roštu a postupně přepadávají do popelníku.

Ve vrchní části spalovací komory nad hořákem je keramický reflektor, který snižuje úletovou prašnost a usměrňuje tok spalin. K snížení prašnosti je též v druhém tahu kotle vložen ekonomizér (viz obr. 8.2). Pod spalovací komorou se nachází popelníková zásuvka a tvarové lože pro případnou instalaci odpopelňovače. Řez celým kotlem i detailní řez spalovací komorou je zobrazen v následujících obrázcích 7.2 a 7.3.



Obr. 7.2 Řez kotlem Benekov C25



Obr. 7.3 Řez spalovací komorou kotle [20]

1 – šnekový podavač kotle, 2 – rošt 3 – trubky sekundárního vzduchu, 4 – nosník keramického reflektoru, 5 – keramický reflektor

Zásobník paliva je umístěn vedle kotle a v závislosti na jeho poloze vůči kotlovému tělesu je kotel vyráběn ve dvojm provedení:

- Levé – zásobník je vlevo od kotlového tělesa při předním pohledu
- Pravé – zásobník je vpravo od kotlového tělesa při předním pohledu (obr. 7.3)

Za zásobníkem paliva je umístěno havarijní hasicí zařízení a pod zásobníkem pod zásobníkem na boku kotle je ventilátor pro spalovací vzduch. Množství tohoto vzduchu je regulováno škrtkicí klapkou na straně sání ventilátoru nebo řídicí jednotkou kotle. V zadní části kotle, za kouřovodem, se nachází spalinový ventilátor závislý na řídicí jednotce.

Řídicí jednotka (EM250 nebo novější Climatix) zajišťuje řadu funkcí. Mezi nejdůležitější patří automatická stabilizace teploty kotle a požadované teploty zásobníku TUV. Řídicí jednotka může také spolupracovat s pokojovým termostatem.



Obr. 7.3 Kotel Benekov C25 [7]

Kotel Benekov C má následující bezpečnostní prvky, které hlídají jeho chod:

- Havarijní termostat – zajištění topného systému proti přehřátí (95°C)
- Dochlazovací smyčka – další zajištění topného systému proti přehřátí
- Tepelná ochrana motoru – k ochraně před spálením v případě zablokování podavače
- Reverz podavače – k spuštění zpětného chodu šnekového podavače
- Havarijní hasicí zařízení – zabezpečovací prvek proti prohoření paliva do zásobníku
- Zatápěcí klapka – k regulaci teplot spalin na výstupu z kotle

## 8. ODLUČOVÁNÍ PRACHOVÝCH ČÁSTIC

Při spalovacích procesech a jiných průmyslových činnostech (drcení, mletí atd.) vznikají tuhé znečišťující látky (TZL), které jsou hlavním zdrojem emisí. K odloučení těchto částic dochází buď primárním způsobem a to patřičnou úpravou spalovací komory nebo sekundárním způsobem, což znamená použití odlučovače.

Odlučovače dělíme na:

- Suché mechanické odlučovače – setrvačné, gravitační, vírové a rotační
- Mokrý mechanické odlučovače – vírové, sprchové, pěnové, proudové a rotační (vůbec se nevyužívají u lokálních topenišť – velké množství vody, kalové hospodářství – proto se o nich nebudu v rešerši zmiňovat)
- Elektrické odlučovače – komorové, trubkové
- Průmyslové filtry – vláknitá, zrnitá či porézní hmota
- Filtry atmosférického vzduchu

### 8.1 Suché mechanické odlučovače

Výhody mechanických odlučovačů:

- Jednoduchá konstrukce
- Nezávislost funkce na dalším zdroji energie
- Nízké pořizovací náklady
- Nízké náklady na údržbu
- Možnost vysoké provozní teploty spalin

Nevýhody mechanických odlučovačů:

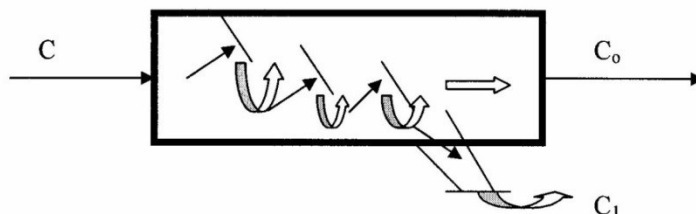
- Nízká účinnost (používá se jako první stupeň odloučení)
- Vysoká tlaková ztráta (nutnost spalinového ventilátoru)

### 8.1.1 Gravitační odlučovače

Gravitační princip, používaný u těchto odlučovačů, patří mezi nejjednodušší způsoby odloučení prachu. Nejběžnějším, avšak už nepoužívaným, zástupcem je usazovací komora. Důsledkem rozšíření vstupního průměru potrubí na větší průměr v usazovací komoře dochází ke snížení rychlosti plynu na hodnotu pádové rychlosti částice. Díky tomu prach usadá ve výsypkách s uzavěry, z kterých se odvádí. Usazovací komory byly používány pro odstranění velkých částic (více jak 100  $\mu\text{m}$ ) nebo jako předodlučovače. Rychlost plynu byla menší jak 1m/s.

### 8.1.2 Setrvačné odlučovače

U setrvačných odlučovačů dochází za využití setrvačného principu při průtoku plynu přes vhodně tvarované přepážky k odloučení tuhých částic. Na rozdíl od usazovacích komor mají vestavěny přepážky (žaluzie, lamely), jimiž se průtok plynu usměrňuje (obr. 8.1).



Obr. 8.1 Proudění plynu žaluziovým odlučovačem [22]

C – plyn vstupující do odlučovače  $C_1$  – proud prachových částic (přibližně 10% původního průtoku)  $C_2$  – proud zbavený tuhých částic

U lamelových odlučovačů protéká plyn několika řadami lamel. Částice po případném odskoku od odlučovací plochy směřují do okrajových částí lamel, kde sedimentují do výsypky.

Firma Benekov používá v druhém tahu kotle ekonomizér (obr. 8.2). Je to jednoduchý setrvačný odlučovač skládající se z pozohýbaných plechů řazených za sebou po cele délce druhého tahu kotle.



Obr. 8.2 Ekonomizér v druhém tahu kotle C25

Setrvačné odlučovače jsou vhodné pro vyšší teploty a pro nelepivý a neabrazivní prach. Jsou nenáročné na prostor a jejich využití je do maximální koncentrace TZL do  $1\text{g/m}^3$ , což znamená, že jsou téměř neúčinné pro malé částice. Mez odlučivosti závisí na tvaru žaluzie/lamely, postupové rychlosti plynu, rozteči listů a na velikosti proudících částic. Setrvačné odlučovače se dají kombinovat s gravitačními odlučovači. Příkladem jsou tzv. prašníky.

### 8.1.3 Vírové odlučovače

Vírové odlučovače (cyklóny) patří mezi nejpoužívanější mechanické odlučovače. Cyklóny jsou z konstrukčního hlediska velmi jednoduchá zařízení s nenáročnou obsluhou, snadnou údržbou a poměrně malou tlakovou ztrátou. Jsou vhodné i pro náročnější provoz při vyšších teplotách plynu a vyšších koncentracích částic. Mezi nevýhody patří nízká odlučivost pro jemné částice a nevhodnost použití pro abrazivní prach (náchylnost k zalepování, snížená životnost).

Cyklón se skládá ze vstupního potrubí ústícího do válcové části, která přechází na spodní straně v kužel a ten opět končí na spodní straně výpustným otvorem. Poslední prvek zaujímá přepadová trubka, skrz kterou odchází proud plynu zbavený tuhých částic. Materiály vhodné pro výrobu cyklonů se vybírají v závislosti na vlastnostech plynu proudícího cyklónem. Nejčastěji to jsou různé druhy kovů a kovových slitin, keramika, sklo a plasty.



K odlučování tuhých zbytků dochází působením odstředivé síly na částice při rotačním pohybu plynu (lopatková vestavba) kuželovou nebo válcovou komorou cyklónu. Vlivem relativní rychlosti kolmé k odlučovacím plochám se částice dostávají ke stěně, ze které se odloučí z proudu plynu do výsypky.

Základní rozdělení cyklónů:

- S tečným vstupem
- S osovým vstupem
  - S vratným tokem (plyn se uvnitř cyklónu obrací a vrací se zpět)
  - S přímým tokem (plyn vystupuje na opačném konci, než vstupuje)

Pro zvýšení účinnosti odloučení se používají soustavy několika paralelně řazených cyklónů, tzv. multicyklóny. Jejich nevýhoda je velká tlaková ztráta, velká abraze a závislost odlučivosti na průtoku plynu.

#### **8.1.4 Rotační odlučovače**

Tyto odlučovače jsou charakteristické rotující částí, čímž se přivádí plyn do rotace. Dle způsobu přívodu plynu je dělíme na odstředivé a ventilátorové. U odstředivého odlučovače je základem soustava rotujících válců skloněna pod určitým úhlem a díky odstředivé síle se tuhé částice odloučí na vnitřní stěny válců. Částice jsou dále odváděny do sběrného prostoru přetržitým způsobem, kdy se ve vhodném časovém intervalu sníží otáčky a uzavře se průtok plynu. U ventilátorového typu je dominantní částí spirální skříň, ve které rotační pohyb vykonává oběžné kolo. Částice se vlivem odstředivé síly shlukují na vnější straně spirální skříňe a dále vstupují do paralelně řazeného vírového odlučovače o malém průměru, kde dojde k jejich odloučení.

## **8.2 Filtry**

Prachové částice se odlučují ve filtrační vrstvě, která je tvořena vláknitou vrstvou nebo zrnitou či porézní hmotou. Větší částice, které neprojdou otvory v tkanině, se zachytí na jejím povrchu a tím dochází ke vzniku filtračního koláče, který taktéž tvoří filtrační vrstvu. Spaliny obsahující TZL procházející tkaninovým filtrem jsou řízeny:

- Síťovým efektem filtrační vrstvy, která zachycuje částice větší než je průměr jejich pórů
- Difuzí a setrvačností na povrchu a uvnitř filtrační vrstvy
- Při zaplnění tkaniny prachem vzniká na jejím povrchu filtrační vrstva (koláč)

Rychle se tvořící vrstva prachu musí být z filtru odstraňována (regenerace filtru). K regeneraci se používá několik principů, kterým odpovídá odlišná konstrukce, přívod plynu a používané tkaniny:

- Tlakový ráz vzduchu
- Otřepávání filtru
- Zpětný tok vyčištěného plynu

### 8.2.1 Filtrační materiály

Jak už bylo zmíněno v prvním odstavci, filtrační materiály se dělí na tkaninové, zrnité nebo porézní. Filtrační tkaniny se využívají nejčastěji a jsou vyráběné buď vpichováním, nebo tkaním. Výroba vpichováním se používá pro většinu filtračních materiálů a tkané textilie slouží při odlučování za vysokých teplot.

Tkaniny mohou být ze syntetických nebo přírodních vláken a porézní látky z kovů, plastů nebo keramik. Často filtrační materiály tvoří bavlna a vlna, plasty zastupují polyestery a polyamidy, sklo, expandovaný polytetrafluorethylen (e-PFTE), apod. Filtrační tkaniny se liší hlavně dle teploty, ve které jsou aplikovány, jak ukazuje následující tabulka.

<b>Materiál</b>	<b>Teplota [°C]</b>
PVC	40 – 50
bavlna	75 – 85
vlna	80 – 90
polyamid, polypropylen	75 – 90
polyester	150
teflon	200 – 280
skelná vlákna	250 – 300
kovová vlákna	>300

Tab. 8.1 Tepelné odolnosti filtračních materiálů [21]

Základní vlastnosti filtračních materiálů:

- Jemnost
- Struktura
- Pórovitost (objem pórů k celkovému objemu filtračního materiálu)
- Pevnost
- Tažnost
- Tvárnost
- Prodyšnost (měrný průtok textilií při dosažení tlakové ztráty  $\Delta p=200\text{Pa}$ )
- Odolnost proti chemickým a tepelným vlivům
- Odlučivost (rozdíl mezi vstupní a výstupní koncentrací TZL)
- Jímavost (množství TZL, které pojme jednotka plochy při nejvyšší únosné tlakové ztrátě)
- Měrné zatížení filtrační tkaniny (doporučená hodnota měrného průtoku plynu)

### 8.2.2 Provedení filtrů

Provedení filtrů závisí na způsobu regenerace a použitém druhu materiálu:

- Tkaninové filtry
  - Hadicové (filtrační plochy uspořádány ve tvaru hadic)
  - Kapsové (filtrační plochy uspořádány ve tvaru hlubokých kapes)
- Filtry se zrnitou nebo porézní vrstvou

Hadicové filtry jsou rozmístěny do sériově zapojených oddělených komor obdélníkového nebo čtvercového průřezu. Komory mají řešeny přívod vzduchu společnou žlabovou výsypkou s přepážkami. Odloučené tuhé zbytky se odvádí šnekovým dopravníkem, který se nachází po celé délce výsypky. Vyčištěný plyn poté odchází z každé komory zvlášť do společného výstupního potrubí. Regenerace hadicových filtrů se provádí buď pulsním profukem a nebo zpětným proplachem, který se dá kombinovat i s mechanickými způsoby.

Hadice filtrů mají maximální délku okolo 10 m a průměr se pohybuje nejčastěji mezi 140 – 250 mm. Tlakové ztráty u těchto filtrů se zpětným proplachem jsou 800

až 1500Pa. Filtry s pulsní regenerací mají až o 50% nižší tlakové ztráty, avšak důsledkem zvýšeného mechanického namáhání klesá životnost tkaniny.

Kapsové filtry se jednoduše sestavují do filtračních stanic. Mají mnohem menší nároky na obestavěný prostor. Tlaková ztráta se pohybuje mezi 800 až 1400 Pa a filtrační rychlost plynu je 1 až 2 cm/s. Regenerace se provádí pulsním profukem a zpětným proplachem.

Kromě látkových filtrů se používají i filtry se zrnitou vrstvou (písek, dolomit), které mohou být použity až do teplot 500 °C, anebo s porézní vrstvou. Povrch filtrů se slinutou porézní vrstvou se pro usnadnění regenerace a zvýšení odlučivosti pokrývá porézní teflonovou tenkou membránou.

### 8.2.2.1 Pěnové keramické filtry (porézní vrstvy)

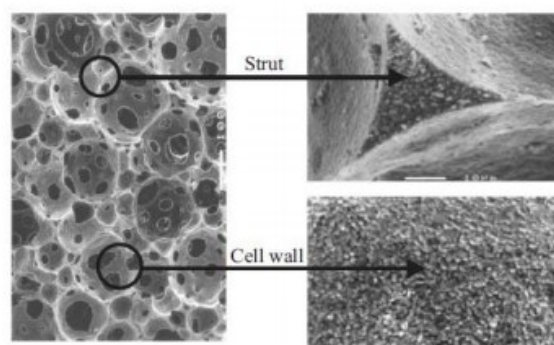
S ohledem na problematiku řešenou v této diplomové práci jsem se začal zabývat možností použití pěnokeramického filtru. Ty se v současnosti převážně používají pro odstranění vměstků z roztavených kovů ve slévárenství, ovšem v poslední době se začínají objevovat i ve spalovacích zařízeních (např. krbové kamna firmy Fortell), kde slouží jako filtry ke snížení tuhých znečišťujících látek.

Keramický pěnový filtr je porézní materiál skládající se z mnohostěnných prostorově uspořádaných buněk o rozměrech buňky od 10nm do několika mm. Je-li relativní hustota nižší než 30%, jedná se o keramické pěny. Je-li relativní hustota vyšší, jde o porézní materiály.

U keramických pěn jsou základní stavební jednotkou buňky (cell), které se skládají z pórů a materiálu tvořícího nosnou konstrukci pěny (strut). Při proudění vznikají v pěnokeramice místní víry a nastávají časté změny směru proudu (obr. 8.3), díky čemuž částice přichází do častého kontaktu se stěnami a dochází k hloubkové filtraci (odloučení částic o velikosti 1-5 $\mu$ m) a zklidnění proudění.



Obr. 8.3 Proudění v pěnovém filtru [25]

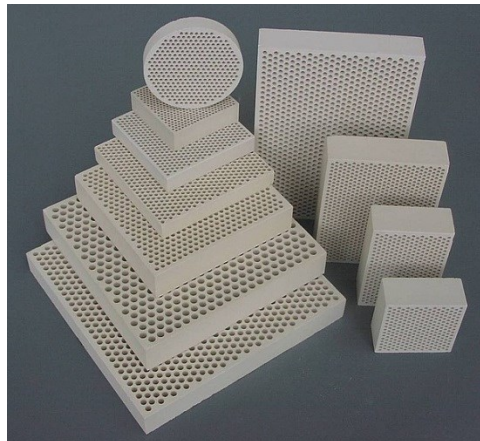


Obr. 8.4 Struktura keramických pěn [26]

Převážně jsou pěny tvořeny nepravidelně rozmístěnými buňkami (obr. 8.5), existují ovšem i pěny s pravidelně rozmístěnými buňkami, tzv. honeycomby (obr. 8.6).



Obr. 8.5 Keramické filtry s nepravidelnou mřížkou [25]



Obr. 8.6 Keramické filtry s pravidelnou mřížkou [25]

Porézní materiály se dělí dle velikosti pórů:

- Mikroporézní (< 2nm)
- Mezoporézní (2-50nm)
- Makroporézní (> 50nm)

Dle předchozího rozdělení by byla většina pěn makroporézní. Proto je lepší dělení zohledňující i morfologii pórů:

- Mikroporézní (velikost buňky < 30-50 $\mu$ m, > 109 buněk/cm<sup>3</sup>)
- Makroporézní (velikost buňky > 50 $\mu$ m, < 109 buněk/cm<sup>3</sup>)

U makroporézních pěnových materiálů je obvykle charakteristická jednotka PPI (pores per inch – průměrný počet pórů na lineární palec).

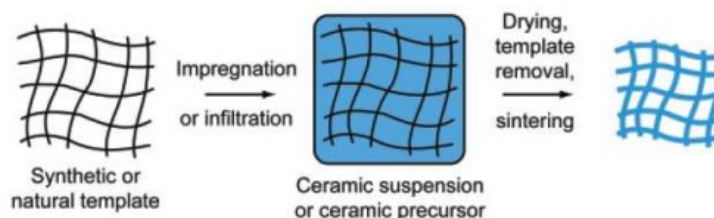
Vlastnosti pěnových materiálů ovlivňuje materiál pěny, stupeň anizotropie, morfologie pórů, relativní hustota a též použitá metoda pro přípravu pěny. Typické vlastnosti pěn v porovnání s hutnými protějšky jsou uvedeny v následující tabulce.

Nízká	Vysoká
Tepelná vodivost	Pórovitost
Tepelná kapacita	Propustnost
Elektrická vodivost	Specifická pevnost
Hustota	Specifická houževnatost
	Specifický povrch
	Odolnost proti teplotním šokům
	Otěruvzdornost
	Chemická odolnost

Tab. 8.2 Vlastnosti keramických pěn v porovnání s hutnými protějšky [26]

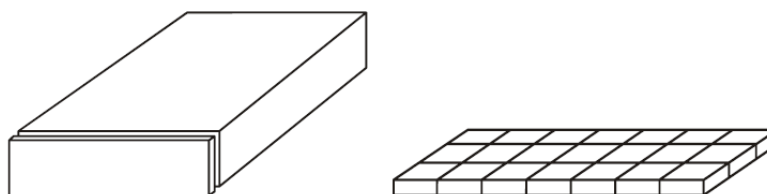
Metody výroby pěnových keramických filtrů:

- Replikační metoda – nejrozšířenější metoda využívající polymerní pěnu jako templát, který je následně obalen suspenzí



Obr. 8.7 Proces přípravy keramických pěn replikační metodou [26]

V prvním kroku výroby se připraví polyuretanová (PUR) pěna, ze které jsou nařezány plotny o požadované tloušťce. Z této plotny se vyřezou nebo vyseknou matrice požadovaných rozměrů, čímž se určí konečný rozměr a tvar filtru.



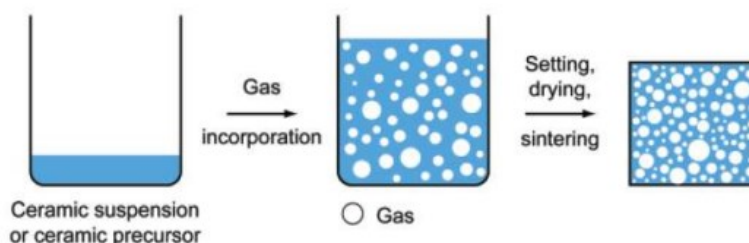
Obr. 8.8 Směr řezání pásů z PUR pěny a následné vysekávání jednotlivých maticí [25]

Souběžně s prvním krokem se připravuje keramická suspenze ve vysoko-otáčkových disolverových mísičích. Konečná viskozita, podobná husté kaši, je důležitá pro nanášení suspenze na PUR pěny.

Následujícím krokem je nanesení první vrstvy suspenze na PUR pěnu ponořením připravené matrice do keramické suspenze. Přebytečná suspenze se vytlačí mezi rotujícími válci a pěnová keramika se suší.

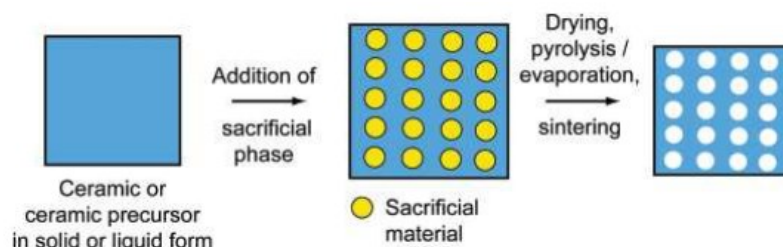
K dosažení optimálního rozložení keramiky na vláknech (dostatečně pevná vlákna a nezablokované póry) se nanáší keramika ve dvou vrstvách. Druhá vrstva se nanáší na již pevný a nepružný filtr bud stříkáním, nebo ponořením do suspenze a jejím odstředěním. Filtr se opět suší a poté putuje do vypalovací pece, kde vyhoří nosná PUR matrice a keramika se zpevní.

- Pěnění in situ – napěňování suspenze mechanickým mícháním nebo dmýcháním plynu



Obr. 8.9 Proces přípravy keramických pěn metodou pěnění in situ [26]

- Vypalování polymerních kuliček



Obr. 8.10 Proces přípravy keramických pěn vypalováním polymerních kuliček [26]

### 8.3 Elektrické odlučovače

V elektrických odlučovačích dochází k odstranění tuhých částic z nosného plynu působením elektrických sil. Při vstupu do odlučovače se rychlost plynu značně sníží a tuhé

částice se mezi nabíjecími a usazovacími elektrodami za působení koronového výboje o stejnosměrném napětí elektrostaticky nabíjí. Poté se nabitě tuhé částice odvádí v silném elektrickém poli ke stěnám vytvořených z usazovacích elektrod, odkud jsou mechanicky oklepávány.

Elektrické odlučovače s dle uspořádání elektrod dělí na komorové (nejčastěji používané, paralelně řazené komory) a trubkové (odlučovací prvky s voštinovou nebo válcovou sběrací elektrodou a vysokonapětovou elektrodou). Dle směru průtoku plynu odlučovače dělíme na horizontální (většinou komorové) a vertikální (trubkové) a dle způsobu odloučení částic z usazovacích elektrod na suché a mokré. Rozdělení na jednozónové a dvouzónové závisí na tom, zda je ionizační zóna oddělena od odlučovací.

Mezi výhody elektrických odlučovačů patří vysoká odlučivost i pro jemné částice, nízká tlaková ztráta, vhodnost pro velké objemové toky, nízká měrná spotřeba energie a využitelnost i pro vysoké teploty plynu. Naopak mezi nevýhody patří vysoké investiční náklady, velké nároky na půdorysný i obestavěný prostor, náročnost na obsluhu a citlivost na změny ve složení prachu.

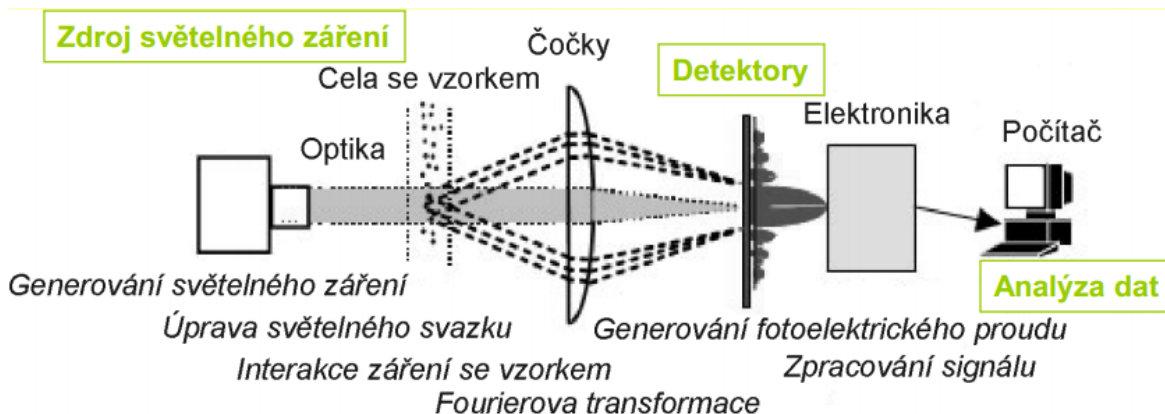


## 9. HODNOCENÍ METOD SNÍŽENÍ TZL S OHLEDEM NA GRANULOMETRII A VÝBĚR VHODNÉ METODY

V této diplomové práci se zabývám sekundárním způsobem odloučení TZL ze spalin, tedy návrhem odlučovacího zařízení. Vhodný výběr takového zařízení závisí na velikosti, rozdělení a tvaru odlučovaných částic, fyzikálních vlastnostech a hodnotě emisního limitu. Zvolený typ odlučovacího zařízení se posléze hodnotí dle celkové odlučivosti (účinnosti), investičních a provozních nákladů a spotřeby energie.

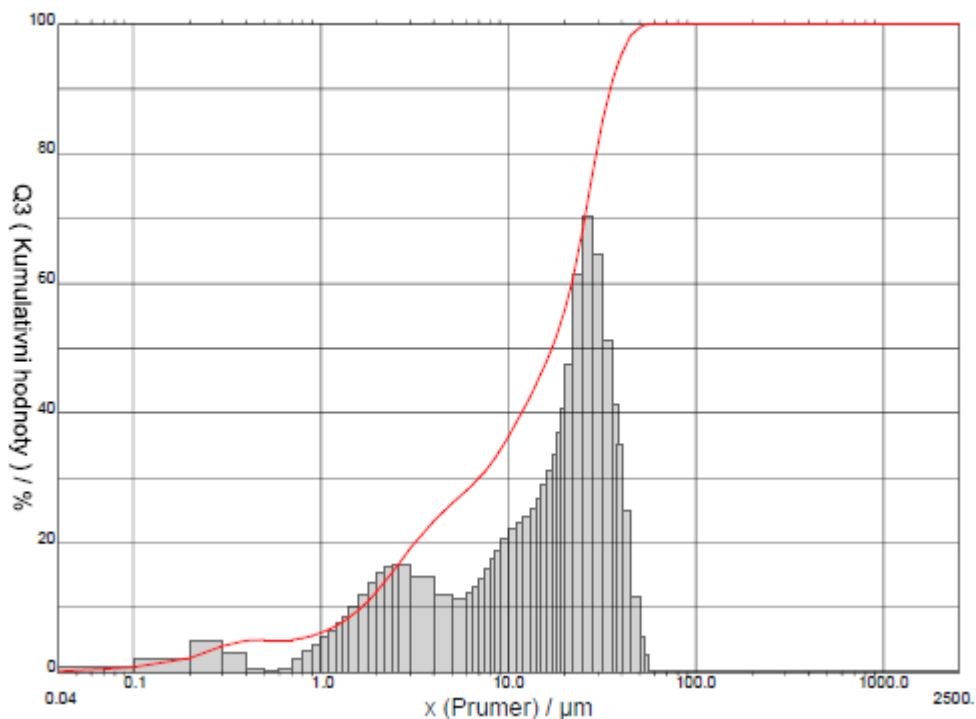
### 9.1 Granulometrická zkouška a stanovení nedopalu

Po odsátí vzorku popílku vycházejícího z kouřovodu kotle Benekov C25 se provedla granulometrická zkouška pomocí laserové difrakce a následně se stanovil nedopal. Přístroj, který je použit k měření velikosti částic (obr. 9.1) se skládá ze světelného zdroje (laseru), průtokové optické cely (průtoková kyveta specifické geometrie se dvěma paralelními okny spojená s rezervoárem vzorku) a fotodetektoru, kde se transformuje optický signál na elektrický, který je dále transferován do počítače a využit k vygenerování dat.



Obr. 9.1 Princip laserového diframektru [27]

Měření probíhá ve vodném prostředí (ethanol) a velikost částic popílku je zjištěna díky ohybu laserového paprsku procházejícího vzorkem částic. Úhel ohybu paprsku je nepřímo úměrný jejich velikosti. Výstupem měření je grafické vyjádření distribuce velikosti částic (frekvenční, distribuční křivka a histogram). Frekvenční křivka charakterizuje distribuční velikosti částic vztaženou na objem částic a distribuční křivka udává procentuální zastoupení částic ve vzorku o menší velikosti než je velikost zvolená.



Obr. 9.2 Frekvenční a distribuční křivka ze vzorku popílku

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.12	0.47	0.76	2.19	4.05	4.90	4.96	4.97	5.02	5.28
q3	0.02	0.06	0.08	0.20	0.45	0.29	0.03	0.01	0.03	0.19
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	5.64	6.08	6.58	7.12	7.71	8.33	9.66	11.08	12.53	13.99
q3	0.30	0.41	0.52	0.61	0.73	0.83	0.98	1.19	1.36	1.51
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	15.40	16.73	19.12	23.36	26.03	28.09	29.06	30.03	31.02	32.05
q3	1.60	1.64	1.65	1.45	1.18	1.12	1.20	1.29	1.42	1.58
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	33.11	34.19	36.35	38.46	40.48	42.41	44.30	46.16	48.04	49.94
q3	1.73	1.87	2.02	2.19	2.29	2.38	2.52	2.66	2.88	3.09
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	51.88	53.89	55.99	60.56	68.49	76.55	85.24	91.32	93.57	95.38
q3	3.35	3.67	4.04	4.73	6.12	7.02	6.42	5.10	4.11	3.48
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	98.32	99.53	99.85	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	2.46	1.13	0.54	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : Prumer /  $\mu\text{m}$  Q3 : kumulativni hodnota / % q3 : density distribution

Tab. 9.1 Histogram vzorku popílku

Z naměřených hodnot vyplývá, že částice popílku mají velikost v rozsahu 0,04-56 $\mu$ m, přičemž největší distribuce částic ve vzorku (7,02% z celého objemu) je o velikosti 28 $\mu$ m. Průměr velikosti částic ve vzorku je 17,52 $\mu$ m.

Po granulometrické zkoušce byl vzorek popílku analyzován v laboratoři Ampluservis, a.s. za účelem zjištění nedopalu. Výsledný nedopal je uvedený v tabulce 9.2.

Použité metody		SOP č.P 10
Číslo vzorku	Onačení vzorku	Spalitelné látky (%)
13/U/2511	Benekov C25	57,93

Tab. 9.2 Výsledný nedopal naměřený firmou Ampluservis

Výsledný nedopal 57,93% signalizuje, že TZL ve spalinách kotle jsou ve velké míře saze.

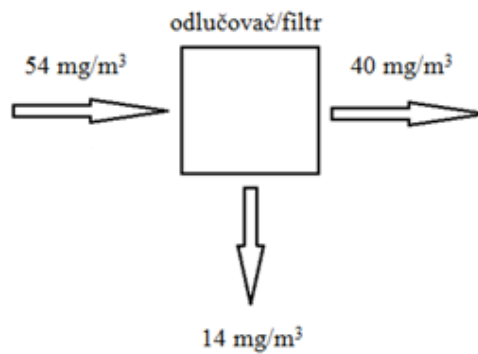
Granulometrie a složení TZL do značné míry omezují výběr metody odlučování. Primárním způsobem snížení TZL by v mém řešení mělo být snížení nedopalu v tuhých zbytcích popílku s ohledem na tvorbu sazí a dále snížení únosu pevných částic ze spalovací komory.

Jelikož zásah do konstrukce hořáku a spalovacího procesu zde není žádoucí, navrhuji realizovat výše popsané opatření ve spalovací komoře ve formě pěnokeramické vrstvy.

## 9.2 Hodnocení metod snížení TZL s ohledem na granulometrii vzorku

Kotel Benekov C25 se nachází ve třetí emisní třídě dle normy ČSN EN 303-5. Hodnota naměřených tuhých znečišťujících látek na výstupu z kotle je 54mg/m<sup>3</sup> při 10% O<sub>2</sub>. Tato hodnota sice zapadá do čtvrté emisní třídy, ale díky velkému množství CO (1412mg/m<sup>3</sup>) při minimálním výkonu je kotel zařazen do třetí emisní třídy. Koncem roku 2013 však firma Benekov problém s velkým množstvím CO vyřešila a nyní nabízí novou kompletní výkonovou řadu s označením kotlů C16, C26 a C51 o čtvrté emisní třídě.

Dalším záměrem firmy je snížení TZL, ideálně na 40mg/m<sup>3</sup> a méně, a tím se dostat na hodnoty odpovídající páté emisní třídě dle ČSN EN 303-5. To znamená, že je nutné odloučit minimálně 14mg/m<sup>3</sup> TZL o velikosti 0,04-54 $\mu$ m.



Obr. 9.3 Diagram vstupních a výstupních hodnot

Hodnocení možných metod snížení TZL:

**a) Suché mechanické odlučovače** – nízké pořizovací i provozní náklady, kromě rotačního odstředivého odlučovače vždy nulová spotřeba energie

- Gravitační: odloučí částice o velikosti více jak  $100\mu\text{m}$ . Tak velké částice se ve vzorku ani neobjevují, proto je gravitační způsob nepoužitelný
- Setrvačné: taktéž malá odlučivost pro jemné částice, ovšem díky velkému nedopalu je reálné využití lamelového odlučovače ve spalovací komoře, kde by tuhé částice při vysoké teplotě spalin narážely na lamely. Tím by docházelo ke snížení rychlosti spalin a k větší šanci dohoření tuhých zbytků před vstupem do prvního tahu kotle. Druhou možností je úprava tvaru plechů u ekonomizéru v druhém tahu kotle
- Vírové: vyšší odlučivost pouze u multicyklónu, ovšem jako samostatný odlučovač je v mém případě nepoužitelný
- Rotační: nízká odlučivost pro jemné částice a prakticky žádné využití v našich podmínkách. Z těchto důvodů není pro můj účel tento odlučovač vhodný

**b) Filtry**

- Látkové: z pohledu zachycení částic by byl látkový filtr ideálním řešením. Běžná účinnost odlučování nad 99% i pro částice o velikosti menší jak  $10\mu\text{m}$ . Ovšem zásadními problémy jsou vysoké pořizovací náklady, velký obestavěný prostor (přibližně stejná velikost jako samostatný kotel) a riziko zahoření filtru s ohledem na saze. Saze představují taktéž riziko ucpání filtru. Z těchto důvodů nejsou pro můj účel látkové filtry vhodné
- Pěnové keramické: zachycení částic o minimální velikosti  $1-5\mu\text{m}$ , ale velký problém s ucpáváním filtru. V mém případě tuto strukturu nebudu využívat pro

záchyt pevných částic, ale pro zrovnoměnění toku spalin po průřezu spalovací komory a k dopálení částic sazí při jejich průchodu vrstvou. To znamená, že umístění ve spalovací komoře bude podmíněné získáním odpovídající teploty vrstvy (min. 700°C). Je nutné dále zvolit takovou poréznost, která by minimalizovala možnost ucpaní. Tato metoda snížení TZL je z mého pohledu zajímavá i díky nízké pořizovací ceně keramické pěnové hmoty. S ohledem na to, že mnou vybrané řešení v oblasti snížení emisí TZL u malých kotlů spalující hnědé uhlí je řešením novým, musím provést jak návrh tak i odzkoušení návrhu na reálném kotli

### **c) elektrické odlučovače**

- Komorové a trubkové: neúčinnější odlučovací zařízení. Účinnost 99,9% a odloučení částic i o velikost 0,1 $\mu$ m. Velkou nevýhodou je však složitý návrh odlučovače, drahá pořizovací cena (švédská firma vyrábí kotle s elektrickými odlučovači, kde pořizovací cena začíná na 200 000,- Kč) a náročnost na obsluhu a údržbu. Díky tomu nejsou elektro-odlučovače k mému účelu vhodné

## 10. VÝPOČTY PRO STANOVENÍ VHODNÉHO UMÍSTĚNÍ PĚNOVÉHO KERAMICKÉHO FILTRU

Ve výpočtové části diplomové práce je nutné provést výpočet stechiometrie vzduchu, respektive spalin a následně tepelný výpočet kotle se zaměřením na spalovací komoru, ve které má být na vhodném místě instalována pěnokeramická vrstva. Předpokládám teplotní okno při minimální teplotě 700°C a maximální teplotě nižší než je teplota měknutí popele.

### 10.1 Stechiometrické výpočty

Veškeré stechiometrické výpočty spalovacích reakcí se provádí při normálních podmínkách, tj. 0°C a 101325 Pa.

#### 10.1.1 Složení paliva

Zařízení Benekov C25 je certifikováno na spalování hnědého uhlí ořech 2. Složení a parametry paliva se vždy liší dle oblasti těžby. V následující tabulce 10.1 uvádím hodnoty pro uhlí z dolu Bílina, které je firmou Benekov doporučované. Tyto hodnoty jsou uvedeny v surovém stavu. V tab. 10.2 uvádím teploty tavitelnosti popele.

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Výhřevnost	$Q_i^r$	[MJ/kg]	16,37
Obsah vody	$w^r$	[%]	30,2
Obsah popeloviny	$A^r$	[%]	6,8
Obsah hořlaviny	$h^r$	[%]	63
Obsah prchavé hořlaviny	$V^{daf}$	[%]	51
Obsah uhlíku	$C^r$	[%]	44,56
Obsah vodíku	$H^r$	[%]	3,45
Obsah dusíku	$N^r$	[%]	0,55
Obsah kyslíku	$O^r$	[%]	13,73
Obsah síry	$S^r$	[%]	0,71

Tab. 10.1 Složení paliva [31]

Druh paliva	Teplota deformace	Teplota měknutí	Teplota tání	Teplota tečení
Ořech 2	1240°C	1420°C	>1500	>1500

Tab. 10.2 Tavitelnost popela [31]

### 10.1.2 Výchozí parametry

Při spalování v automatických kotlích se uvádí přebytek vzduchu 1,5-2. Pro můj výpočet volím přebytek vzduchu  $n=1,9$ . Tato volba i odpovídá reálnému stavu při spalování v kotli C25.

Dále volím součinitel vlhkosti  $v=1,04$ . Tento koeficient udává objem vlhkého vzduchu obsahující  $1\text{m}^3$  suchého vzduchu.

### 10.1.3 Objemy spalovacího vzduchu a spalin

Stechiometrického množství kyslíku

$$V_{\text{O}_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{4} \cdot H_2 + \frac{22,4}{32} \cdot S - \frac{22,4}{32} O_2$$

$$V_{\text{O}_2,t} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,4456 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,0345 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0071 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,1373 = 0,934\text{m}_N^3 / \text{kg}$$

Kde C obsah uhlíku v surovém palivu [l]

H obsah vodíku v surovém palivu [l]

S obsah síry v surovém palivu [l]

O<sub>2</sub> obsah kyslíku v surovém palivu [l]

Množství teoretického vzduchu suchého

$$V_{\text{vz,t}}^s = V_{\text{O}_2,t} \cdot \frac{100}{21} = 0,934 \cdot \frac{100}{21} = 4,447\text{m}_N^3 / \text{kg}$$

Kde V<sub>O<sub>2,t</sub></sub> stochiometrické množství kyslíku [m<sub>N</sub><sup>3</sup> / kg ]

### Množství skutečného vzduchu suchého

$$V_{vz,sk}^s = V_{vz,t}^s \cdot n = 4,447 \cdot 1,9 = 8,45 m_N^3 / kg$$

Kde  $V_{vz,t}^s$  množství teoretického vzduchu suchého [  $m_N^3 / kg$  ]  
n součinitel přebytku vzduchu [1]

### Množství skutečného vzduchu vlhkého

$$V_{vz,sk}^v = V_{vz,sk}^s \cdot v = 8,45 \cdot 1,04 = 8,788 m_N^3 / kg$$

Kde  $V_{vz,sk}^s$  množství skutečného suchého vzduchu [  $m_N^3 / kg$  ]  
v součinitel vlhkosti [1]

### Množství spalin teoretických suchých

$$V_{sp,t}^s = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{32} \cdot S + \frac{22,4}{28} \cdot N + \frac{79}{100} \cdot V_{vz,t}^s$$

$$V_{sp,t}^s = \frac{22,4}{12} \cdot 0,4456 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0071 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0055 + \frac{79}{100} \cdot 4,447 = 4,355 m_N^3 / kg$$

Kde C obsah uhlíku v surovém palivu [1]  
S obsah síry v surovém palivu [1]  
N obsah dusíku v surovém palivu [1]  
 $V_{vz,t}^s$  množství teoretického vzduchu suchého [  $m_N^3 / kg$  ]

### Množství spalin skutečných suchých

$$V_{sp,sk}^s = V_{sp,t}^s + (n-1) \cdot V_{vz,t}^s = 4,355 + (1,9-1) \cdot 4,447 = 8,357 m_N^3 / kg$$

Kde  $V_{sp,t}^s$  množství spalin teoretických suchých [  $m_N^3 / kg$  ]  
n součinitel přebytku vzduchu [1]  
 $V_{vz,t}^s$  množství teoretického vzduchu suchého [  $m_N^3 / kg$  ]



Množství spalin skutečných vlhkých

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,sk}^s + V_{H_2O} = V_{sp,sk}^s + \frac{22,4}{2} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{18} \cdot W^r + (v-1) \cdot V_{vz,sk}^s$$

$$V_{sp,sk}^v = 8,357 + \frac{22,4}{2} \cdot 0,0345 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,302 + (1,04-1) \cdot 8,45 = 9,458 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

Kde  $V_{sp,sk}^s$  množství spalin skutečných suchých  $[\text{m}_N^3 / \text{kg}]$

$V_{H_2O}$  objem vodní páry ve spalinách  $[\text{m}_N^3 / \text{kg}]$

### 10.1.4 Objemy jednotlivých složek ve spalinách

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r = \frac{22,4}{12} \cdot 0,4456 = 0,83 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

Kde  $C^r$  obsah uhlíku v surovém palivu  $[l]$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S^r = \frac{22,4}{32} \cdot 0,0071 = 0,005 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

Kde  $S^r$  obsah síry v surovém palivu  $[l]$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N_2^r + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s = \frac{22,4}{28} \cdot 0,0055 + 0,79 \cdot 8,45 = 6,68 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

Kde  $N_2^r$  obsah dusíku v surovém palivu  $[l]$

$V_{vz,sk}^s$  množství skutečného suchého vzduchu  $[\text{m}_N^3 / \text{kg}]$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{18} \cdot w^r + (v-1) \cdot V_{vz,sk}^s$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,0345 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,302 + (1,04-1) \cdot 8,45 = 1,1 \text{ m}_N^3 / \text{kg}$$

Kde  $H_2^r$  obsah vodíku v surovém palivu  $[l]$

$w^r$  obsah vody v surovém palivu  $[l]$

$v$  součinitel vlhkosti  $[l]$

$V_{vz,sk}^s$  množství skutečného suchého vzduchu  $[m_N^3 / kg]$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n-1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,9-1) \cdot 4,447 = 0,84 m_N^3 / kg$$

Kde  $n$  součinitel přebytku vzduchu  $[l]$

$V_{vz,t}^s$  množství teoretického vzduchu suchého  $[m_N^3 / kg]$

### 10.1.5 Koncentrace jednotlivých složek ve spalinách

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{22,4 \cdot C^r}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{22,4 \cdot 0,4456}{9,458} \cdot 100 = 8,79\%$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{22,4 \cdot S^r}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{22,4 \cdot 0,0071}{9,458} \cdot 100 = 0,05\%$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{22,4 \cdot N_2^r + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{22,4 \cdot 0,0055 + 0,79 \cdot 8,45}{9,458} \cdot 100 = 70,63\%$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{22,4 \cdot H_2^r + \frac{22,4}{18} \cdot W^r + (v-1) \cdot V_{vz,sk}^s}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{22,4 \cdot 0,0345 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,302 + (1,04-1) \cdot 8,45}{9,458} \cdot 100 = 11,63\%$$

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (n-1) \cdot V_{vz,t}^s}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (1,9-1) \cdot 4,447}{9,458} \cdot 100 = 8,89\%$$

Kde  $V_{CO_2}$  objem oxidu uhličitého ve spalinách  $[m_N^3 / kg]$

$V_{SO_2}$  objem oxidu siřičitého ve spalinách  $[m_N^3 / kg]$

$V_{N_2}$  objem dusíku ve spalinách  $[m_N^3 / kg]$

$V_{H_2O}$  objem vodní páry ve spalinách  $[m_N^3 / kg]$

$V_{O_2}$  objem kyslíku ve spalinách  $[m_N^3 / kg]$

$V_{sp,sk}^v$  množství spalin skutečných vlhkých  $[m_N^3 / kg]$

## 10.2 Tepelný výpočet kotle

Nyní provedu výpočet přestupu tepla konvekcí ze strany spalin, v celém spalinovém traktu kotle a přestup tepla radiací ve spalovací komoře. K tepelnému výpočtu a k zjištění místa s ideální teplotou pro instalaci pěnokeramické vrstvy je potřeba znát teploty v kotli. Proto kromě výpočtu teplot ve spalovací komoře pomocí programu CFX provedu i měření teplot v celém spalinovém traktu kotle. Vypočtené i naměřené hodnoty jsou použity jako okrajové podmínky matematického modelu.

### 10.2.1 Měrná tepelná kapacita spalin

K zjištění měrné tepelné kapacity spalin musím v první řadě najít střední měrné tepelné kapacity jednotlivých složek spalin. Ty vyhledám, za použití interpolace, v tabulce Měrná tepelná kapacita plynů za stálého tlaku. Naměřená teplota spalin u hořáku je 1046,6°C.

$$c_{pCO_2} = 2,547 \text{ kJ} / \text{m}_n^3 \cdot \text{K}$$

$$c_{pSO_2} = 2,48 \text{ kJ} / \text{m}_n^3 \cdot \text{K}$$

$$c_{pN_2} = 1,527 \text{ kJ} / \text{m}_n^3 \cdot \text{K}$$

$$c_{pH_2O} = 2,019 \text{ kJ} / \text{m}_n^3 \cdot \text{K}$$

$$c_{pO_2} = 1,609 \text{ kJ} / \text{m}_n^3 \cdot \text{K}$$

$$c_{p,sp} = \sum \omega_i \cdot c_{pi} = \omega_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + \omega_{SO_2} \cdot c_{pSO_2} + \omega_{N_2} \cdot c_{pN_2} + \omega_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + \omega_{O_2} \cdot c_{pO_2}$$
$$c_{p,sp} = 0,0879 \cdot 2,547 + 0,0005 \cdot 2,48 + 0,7063 \cdot 1,527 + 0,1163 \cdot 2,019 + 0,0889 \cdot 1,609$$
$$c_{p,sp} = 1,681 \text{ kJ} / \text{m}_n^3 \cdot \text{K}$$

Kde	$\omega_{CO_2}$	koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách	[1]
	$c_{pCO_2}$	měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého při 1046,6°C	[ kJ / m <sub>n</sub> <sup>3</sup> · K ]
	$\omega_{SO_2}$	koncentrace oxidu siřičitého ve spalinách	[1]
	$c_{pSO_2}$	měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého při 1046,6°C	[ kJ / m <sub>n</sub> <sup>3</sup> · K ]
	$\omega_{N_2}$	koncentrace dusíku ve spalinách	[1]
	$c_{pN_2}$	měrná tepelná kapacita dusíku při 1046,6°C	[ kJ / m <sub>n</sub> <sup>3</sup> · K ]

$\omega_{\text{H}_2\text{O}}$	koncentrace vodní páry ve spalinách	[1]
$c_{p\text{H}_2\text{O}}$	měrná tepelná kapacita vodní páry při 1046,6°C	[kJ / m <sub>n</sub> <sup>3</sup> · K ]
$\omega_{\text{O}_2}$	koncentrace kyslíku ve spalinách	[1]
$c_{p\text{O}_2}$	měrná tepelná kapacita kyslíku při 1046,6°C	[kJ / m <sub>n</sub> <sup>3</sup> · K ]

### 10.2.2 Měrná tepelná kapacita vzduchu

Měrnou tepelnou kapacitu vzduchu  $c_{p,\text{vz}}$  vyhledám za použití interpolace v tabulce Měrná tepelná kapacita vzduchu. Teplotu vzduchu volím 20°C.

$$c_{p,\text{vz}} = 1,299 \text{ kJ} / \text{m}_n^3 \cdot \text{K}$$

### 10.2.3 Měrná tepelná kapacita paliva

K zjištění měrné tepelné kapacity hnědého uhlí jsem využil směšovací pravidlo. Nejdřív vypočítám měrnou tepelnou kapacitu hořlaviny  $c_{p,h}$  a popeloviny  $c_{p,A}$  a následně celkovou měrnou tepelnou kapacitu paliva  $c_{p,\text{pal}}$ . Teplotu paliva volím 20°C. Měrná tepelná kapacita vody  $c_{p,w}$  je 4,19 kJ / kg · K .

$$c_{p,h} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 0,13 + \frac{V^{\text{daf}}}{100} \right) \cdot (130 + t)$$

$$c_{p,h} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 0,13 + \frac{51}{100} \right) \cdot (130 + 20) = 1,2048 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

Kde  $V^{\text{daf}}$  obsah prchavé hořlaviny v palivu [%]

$t$  teplota paliva [°C]

$$c_{p,A} = 0,5 \cdot \left( 1,42 + \frac{t}{1000} \right) = 0,5 \cdot \left( 1,42 + \frac{20}{1000} \right) = 0,72 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

Kde  $t$  teplota paliva [°C]

$$c_{p,pal} = c_{p,h} \cdot \frac{h}{100} + c_{p,A} \cdot \frac{A}{100} + c_{p,w} \cdot \frac{w}{100}$$

$$c_{p,pal} = 1,2048 \cdot \frac{63}{100} + 0,72 \cdot \frac{A}{100} + 4,19 \cdot \frac{30,2}{100} = 2,073 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}$$

Kde	$c_{p,h}$	měrná tepelná kapacita hořlaviny	[ kJ / kg · K ]
	h	obsah hořlaviny v surovém stavu	[%]
	$c_{p,A}$	měrná tepelná kapacita popeloviny	[ kJ / kg · K ]
	A	obsah popeloviny v surovém stavu	[%]
	$c_{p,w}$	měrná tepelná kapacita vody	[ kJ / kg · K ]
	w	obsah vody v surovém stavu	[%]

## 10.2.4 Teplota spalin u hořáku

K zjištění teploty spalin vycházím z bilance vstupních a výstupních entalpií. Teplotu počítám adiabaticky, to je bez odvodu tepla zářením, pro 1kg paliva.

$$Q_i^r + i_{pal} + i_{vzd} = i_{spal}$$

$$Q_i^r + c_{p,pal} \cdot \Delta t_{pal} \cdot V_{pal} + c_{p,vz} \cdot \Delta t_{vz} \cdot V_{vz,sk}^v = c_{p,sp} \cdot \Delta t_{sp} \cdot V_{sp,sk}^v$$

$$\Delta t_{sp} = \frac{Q_i^r + c_{p,pal} \cdot \Delta t_{pal} \cdot V_{pal} + c_{p,vz} \cdot \Delta t_{vz} \cdot V_{vz,sk}^v}{c_{p,sp} \cdot V_{sp,sk}^v}$$

$$\Delta t_{sp} = \frac{16370 + 2,073 \cdot 20 \cdot 1 + 1,299 \cdot 20 \cdot 8,788}{1,681 \cdot 9,458} = 1046,6^\circ\text{C}$$

Kde	$Q_i^r$	výhřevnost paliva	[ kJ/kg ]
	$c_{p,pal}$	měrná tepelná kapacita paliva	[ kJ / kg · K ]
	$\Delta t_{pal}$	rozdíl teploty paliva	[ °C ]
	$V_{pal}$	objem paliva	[ kg ]
	$c_{p,vz}$	měrná tepelná kapacita vzduchu	[ kJ / m <sup>3</sup> · K ]
	$\Delta t_{vz}$	rozdíl teploty vzduchu	[ °C ]
	$V_{vz,sk}^v$	množství skutečného vlhkého vzduchu	[ m <sup>3</sup> / kg ]
	$c_{p,sp}$	měrná tepelná kapacita spalin	[ kJ / m <sup>3</sup> · K ]

$V_{sp,sk}^v$  množství spalin skutečných vlhkých  $[m_N^3 / kg]$

## 10.2.5 Přestup tepla konvekcí na straně spalin

Hmotnostní průtok paliva

$$m_{pal} = \frac{Q_v}{Q_i^r \cdot \frac{\eta}{100}} = \frac{25}{16370 \cdot \frac{86,8}{100}} = 6,33 \text{ kg / hod} = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ kg / s}$$

Kde  $Q_v$  jmenovitý výkon kotle [kW]

$Q_i^r$  výhřevnost paliva [kJ/kg]

$\eta$  účinnost kotle [%]

Skutečný objem spalin

Pomocí stavové rovnice vypočítám skutečný objem spalin proudící z vrchní části hořáku.

$$V_{spal,at} = \frac{(m_{pal} \cdot V_{sp,sk}^v) \cdot T_{sp}}{T_N} = \frac{(1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 9,458) \cdot (1046,6 + 273,15)}{273,15} = 0,0804 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Kde  $m_{pal}$  hmotnostní průtok paliva [kg/s]

$V_{sp,sk}^v$  množství spalin skutečných vlhkých  $[m_N^3 / kg]$

$T_{sp}$  teplota spalin u hořáku [K]

$T_N$  teplota spalin za normálních podmínek [K]

Reynoldsovo kritérium

Díky Reynoldsovu kritériu zjistím, zda je ve vrchní části hořáku proudění laminární, turbulentní nebo se nacházím v přechodové oblasti. V první části musím vypočítat rychlost proudění spalin.

$$w_{sp} = \frac{V_{sp,at}}{S} = \frac{V_{sp,at}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{0,0804}{\frac{\pi \cdot 0,134^2}{4}} = 5,7 \text{ m/s}$$

Kde	$V_{sp,at}$	skutečný objem spalin proudící z hořáku	$[\text{m}^3 / \text{s}]$
	$S$	průřez vrchní části hořáku	$[\text{m}^2]$
	$d$	průměr vrchní části hořáku	$[\text{m}]$

$$Re = \frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} = \frac{5,7 \cdot 0,134}{184,93 \cdot 10^{-6}} = 4130,2 \rightarrow \text{přechodová oblast}$$

Kde	$w_{sp}$	rychlost spalin ve vrchní části hořáku	$[\text{m/s}]$
	$d$	průměr vrchní části hořáku	$[\text{m}]$
	$\nu$	kinetická viskozita při $1046,6^\circ\text{C}$	$[\text{m}^2 / \text{s}]$

#### Nusseltovo kritérium

I když je délka hořáku menší než 50x průměr, nezahrnuji v tomto případě opravný součinitel  $\varepsilon_L$  z důvodu minimální délky zkoumané oblasti.

$$Nu = K_0 \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25} = 12,76 \cdot 0,575^{0,43} \cdot \left( \frac{0,575}{0,606} \right)^{0,25} = 9,93$$

Kde	$K_0$	Koeficient závislý na Reynoldsově čísle	[1]
	$Pr$	Prandtlovo kritérium při $1046,6^\circ\text{C}$	[1]
	$Pr_s$	Prandtlovo kritérium pro vrchní stěnu hořáku při $740^\circ\text{C}$	[1]

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_{sp,konv} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{9,93 \cdot 11,3 \cdot 10^{-2}}{0,134} = 8,37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Kde	$Nu$	Nusseltovo kritérium	[1]
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti při $1046,6^\circ\text{C}$	$[\text{W/m} \cdot \text{K}]$

d charakteristický rozměr [m]

## 10.2.6 Množství tepla ve spalínách

Nyní vypočítám množství tepla ve spalínách v  $\text{kJ} / \text{kg}_{\text{pal}}$  a následně v kW.

$$Q_{\text{sp}} = V_{\text{sp,sk}}^{\text{v}} \cdot c_{\text{p,sp}} \cdot (T_{\text{sp}} - T_{\text{vz}}) = 9,458 \cdot 1,681 \cdot (1319,75 - 293,15) = 16321,81 \text{ kJ} / \text{kg}_{\text{pal}}$$

Kde	$V_{\text{sp,sk}}^{\text{v}}$	množství spalín skutečných vlhkých	$[\text{m}_N^3 / \text{kg}]$
	$c_{\text{p,sp}}$	měrná tepelná kapacita spalín	$[\text{kJ} / \text{m}_N^3 \cdot \text{K}]$
	$T_{\text{sp}}$	teplota spalín u hořáku	[K]
	$T_{\text{vz}}$	teplota vzduchu	[K]

$$Q_{\text{sp,kW}} = Q_{\text{sp}} \cdot m_{\text{pal}} = 16321,81 \cdot \frac{6,33}{3600} = 28,7 \text{ kW}$$

Kde	$Q_{\text{sp}}$	množství tepla ve spalínách	$[\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{K}]$
	$m_{\text{pal}}$	hmotnostní průtok paliva	$[\text{kg} / \text{hod}]$

## 10.2.7 Přestup tepla radiací

Emisní součinitel stěn  $\varepsilon_{\text{st}}$  se volí v intervalu 0,8-1. Já určuji  $\varepsilon_{\text{st}}=0,9$ . Tlak ve spalovací komoře  $p_{\text{sk}}$  je roven tlaku okolí  $p_0=0,1\text{MPa}$ .

Stupeň černosti

$$\varepsilon'_{\text{st}} = 0,5 \cdot (\varepsilon_{\text{st}} + 1) = 0,5 \cdot (0,9 + 1) = 0,95$$

Kde	$\varepsilon_{\text{st}}$	emisní součinitel stěn	[1]
-----	---------------------------	------------------------	-----



Střední délka zářícího paprsku (účinná tloušťka vrstvy)

Objem a povrch spalovací komory jsem zjistil v programu Inventor.

$$l = 3,4 \cdot \frac{V_{sk}}{S_{sk}} = 3,4 \cdot \frac{0,06}{0,951} = 0,215\text{m}$$

Kde  $V_{sk}$  objem spalovací komory [m<sup>3</sup>]

$S_{sk}$  povrch spalovací komory [m<sup>2</sup>]

Parciální tlaky

Dosadím koncentraci oxidu uhličitého  $\omega_{CO_2}$  a vodní páry  $\omega_{H_2O}$  do vzorce pro výpočet parciálních tlaků.

$$p_{CO_2} = p_{sk} \cdot \frac{\omega_{CO_2}}{1} = 100000 \cdot \frac{0,0879}{1} = 8790\text{Pa}$$

$$p_{H_2O} = p_{sk} \cdot \frac{\omega_{H_2O}}{1} = 100000 \cdot \frac{0,11636}{1} = 11636\text{Pa}$$

Kde  $p_{sk}$  tlak ve spalovací komoře [Pa]

$\omega_{CO_2}$  koncentrace oxidu uhličitého [l]

$\omega_{H_2O}$  koncentrace vodní páry [l]

Emisivita zářících molekul spalin

Z diagramů (příloha č. 5 a 6) určím emisivitu oxidu uhličitého a vodní páry v závislosti na teplotě spalin 1046,6°C a součinu parciálního tlaku a účinné tloušťky vrstvy. Korekční součinitel vlivu záření par odečtu z grafu (příloha č. 7) při parciálním tlaku vodní páry.

$$p_{\text{CO}_2} \cdot l = 1889,9 \rightarrow \varepsilon_{\text{CO}_2,\text{sp}} = 0,058$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l = 2501,7 \rightarrow \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},\text{sp}} = 0,038$$

$$\beta = 1,04$$

$$\varepsilon_{\text{sp}} = \varepsilon_{\text{CO}_2,\text{sp}} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},\text{sp}} = 0,058 + 1,04 \cdot 0,038 = 0,0975$$

Kde	$p_{\text{CO}_2}$	parciální tlak oxidu uhličitého	[Pa]
	$l$	účinná tloušťka vrstvy	[m]
	$\varepsilon_{\text{CO}_2,\text{sp}}$	emisivita oxidu uhličitého spalin při 1046,6°C	[1]
	$p_{\text{H}_2\text{O}}$	parciální tlak vodní páry	[Pa]
	$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O},\text{sp}}$	emisivita vodní páry spalin při 1046,6°C	[1]
	$\beta$	korekční součinitel vlivu záření par	[1]

Pohltivost plamene (absorpční součinitel)

Ze stejných diagramů určím emisivitu oxidu uhličitého a vodní páry v závislosti na teplotě stěny, kterou volím dle naměřených hodnot 470°C, a součinu parciálního tlaku a účinné tloušťky vrstvy. Pro stěnu s teplotou menší než 500°C se volí mocnitél  $n=0,5$ .

$$p_{\text{CO}_2} \cdot l = 1889,9 \rightarrow \varepsilon_{\text{CO}_2,\text{pl}} = 0,063$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l = 2501,7 \rightarrow \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},\text{pl}} = 0,071$$

$$n = 0,5$$

$$A_p = \varepsilon_{\text{CO}_2,\text{pl}} \cdot \left( \frac{T_{\text{sp}}}{T_{\text{st}}} \right)^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},\text{pl}} \cdot \left( \frac{T_{\text{sp}}}{T_{\text{st}}} \right)^n$$

$$A_p = 0,063 \cdot \left( \frac{1319,75}{743,15} \right)^{0,65} + 1,04 \cdot 0,071 \cdot \left( \frac{1319,75}{743,15} \right)^{0,5} = 0,1899$$

Kde	$p_{\text{CO}_2}$	parciální tlak oxidu uhličitého	[Pa]
	$l$	účinná tloušťka vrstvy	[m]
	$\varepsilon_{\text{CO}_2,\text{pl}}$	emisivita oxidu uhličitého spalin při 470°C	[1]
	$p_{\text{H}_2\text{O}}$	parciální tlak vodní páry	[Pa]
	$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O},\text{pl}}$	emisivita vodní páry spalin při 470°C	[1]

n	mocnitel	[1]
$\beta$	korekční součinitel vlivu záření par	[1]
$T_{sp}$	teplota spalin u hořáku	[K]
$T_{st}$	teplota stěn ve spalovací komoře	[K]

### Tepelný tok radiací

$$q_{rad} = \varepsilon'_{st} \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_{sp} \cdot T_{sp}^4 - A_p \cdot T_{st}^4)$$

$$q_{rad} = 0,95 \cdot 5,6 \cdot 10^{-8} \cdot (0,0975 \cdot 1319,75^4 - 0,1899 \cdot 743,15^4) = 12654,2 \text{ W / m}^2$$

Kde	$\varepsilon'_{st}$	stupeň černosti	[1]
	$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	[1]
	$\varepsilon_{sp}$	emisivita zářících molekul spalin	[1]
	$T_{sp}$	teplota spalin u hořáku	[K]
	$A_p$	pohltivost plamene (absorpční součinitel)	[1]
	$T_{st}$	teplota stěn ve spalovací komoře	[K]

### Záření plamene

Výpočet hustoty tepelného toku vyplněného svítivým plamenem předávaného stěnám kotle. Emisivitu svítícího plamene u uhlí bohatého na prchavé látky volím  $\varepsilon_{pl} = 0,7$  a střední teplotu plamene volím  $t_{pl} = 1100^\circ\text{C}$ .

$$q_{pl,s} = \varepsilon_{pl} \cdot \varepsilon_{st} \cdot \sigma \cdot (T_{pl}^4 - T_{st}^4)$$

$$q_{pl,s} = 0,7 \cdot 0,9 \cdot 5,6 \cdot 10^{-8} \cdot (1373,15^4 - 743,15^4) = 114669,18 \text{ W / m}^2$$

Kde	$\varepsilon_{pl}$	emisivita svítícího plamene	[1]
	$\varepsilon_{st}$	emisní součinitel stěn	[1]
	$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	[1]
	$T_{pl}$	střední teplota plamene	[K]
	$T_{st}$	teplota stěn ve spalovací komoře	[K]

Součinitel přestupu tepla radiací

$$\alpha_{\text{sp,rad}} = \frac{q_{\text{rad}}}{\Delta t} = \frac{12654,2}{1046,6 - 470} = 21,95 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Kde  $q_{\text{rad}}$  tepelný tok radiací [W / m<sup>2</sup>]

$\Delta t$  rozdíl mezi teplotou spalin a stěn [°C]

### 10.2.8 Spalovací komora v oblasti navrhovaného umístění pěnokeramické vrstvy

Skutečný objem spalin

$$V_{\text{spal,at}} = \frac{(m_{\text{pal}} \cdot V_{\text{sp,sk}}^v) \cdot T_{\text{sp}}}{T_N} = \frac{(1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 9,458) \cdot (830 + 273,15)}{273,15} = 0,0672 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Kde  $m_{\text{pal}}$  hmotnostní průtok paliva [kg/s]

$V_{\text{sp,sk}}^v$  množství spalin skutečných vlhkých [m<sup>3</sup> / kg]

$T_{\text{sp}}$  průměrná teplota spalin v daném místě spalovací komory [K]

$T_N$  teplota spalin za normálních podmínek [K]

Rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp,at}}}{S} = \frac{V_{\text{sp,at}}}{a \cdot b} = \frac{0,0672}{0,344 \cdot 0,305} = 0,64 \text{ m / s}$$

Kde  $V_{\text{spal,at}}$  skutečný objem spalin v daném místě spalovací komory [m<sup>3</sup> / s]

$S$  průřez spalovací komory v daném místě [m<sup>2</sup>]

Charakteristický rozměr

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{4 \cdot (a \cdot b)}{2 \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot (0,344 \cdot 0,305)}{2 \cdot (0,344 + 0,305)} = 0,323 \text{ m}$$

Kde	S	průřez spalovací komory v daném místě	[ m <sup>2</sup> ]
	o	obvod spalovací komory v daném místě	[ m ]

Reynoldsovo kritérium

$$Re = \frac{w_{sp} \cdot d_h}{\nu} = \frac{0,64 \cdot 0,323}{138,01 \cdot 10^{-6}} = 1497,9 \rightarrow \text{la minární proudění}$$

Kde	w <sub>sp</sub>	rychlost spalin ve spalovací komoře	[ m/s ]
	d <sub>h</sub>	charakteristický rozměr	[ m ]
	ν	kinetická viskozita při 830°C	[ m <sup>2</sup> / s ]

Grashofovo kritérium

Určující teplotou při laminárním proudění je aritmetický střed mezi teplotou spalin a teplotou stěny.

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \frac{1}{T} \cdot \Delta t = \frac{9,81 \cdot 0,261^3}{(103,78 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{928,15} \cdot (830 - 470) = 6106791,2$$

Kde	g	tíhové zrychlení	[ m/s <sup>2</sup> ]
	l	délka zvolené oblasti ve spalovací komoře	[ m ]
	ν	kinetická viskozita při 655°C	[ m <sup>2</sup> / s ]
	T	určující teplota	[ K ]
	Δt	rozdíl mezi teplotou spalin a stěny	[ °C ]

Nusseltovo kritérium

$$Nu = 0,74 \cdot (Re \cdot Pr)^{0,2} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot \varepsilon_L$$

$$Nu = 0,74 \cdot (1497,9 \cdot 0,6145)^{0,2} \cdot (6106791,2 \cdot 0,6145)^{0,1} \cdot 1,95 = 25,67$$

Kde	Re	Reynoldsovo kritérium	[ 1 ]
	Pr	Prandtlovo kritérium při 655°C	[ 1 ]

Gr	Grashofovo kritérium	[1]
$\varepsilon_L$	opravný součinitel pro krátké trubky a kanály	[1]

Součinitel přestupu tepla konvekcí

U laminárního svislého proudění se výsledný součinitel tepla zvětšuje o 15%.

$$\alpha_{sp,konv} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h} = \frac{25,67 \cdot 7,89 \cdot 10^{-2}}{0,323} = 6,27 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \rightarrow 6,27 + 15\% = 7,21 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Kde	Nu	Nusseltovo kritérium	[1]
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti při 655°C	[W / m · K]
	$d_h$	charakteristický rozměr	[m]

Pohltivost plamene (absorpční součinitel)

Z diagramů (příloha č. 5 a 6) určím emisivitu oxidu uhličitého a vodní páry v závislosti na teplotě stěny, kterou volím dle naměřených hodnot 470°C, a součinu parciálního tlaku a účinné tloušťky vrstvy. Pro stěnu s teplotou menší než 500°C se volí mocnitél  $n=0,5$ . Korekční součinitel vlivu záření par odečtu z grafu (příloha č. 7) při parciálním tlaku vodní páry.

$$p_{CO_2} \cdot l = 1889,9 \rightarrow \varepsilon_{CO_2,pl} = 0,063$$

$$p_{H_2O} \cdot l = 2501,7 \rightarrow \varepsilon_{H_2O,pl} = 0,071$$

$$n = 0,5$$

$$\beta = 1,04$$

$$A_p = \varepsilon_{CO_2,pl} \cdot \left( \frac{T_{sp}}{T_{st}} \right)^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O,pl} \cdot \left( \frac{T_{sp}}{T_{st}} \right)^n$$

$$A_p = 0,063 \cdot \left( \frac{1103,15}{743,15} \right)^{0,65} + 1,04 \cdot 0,071 \cdot \left( \frac{1103,15}{743,15} \right)^{0,5} = 0,1714$$

Kde	$p_{CO_2}$	parciální tlak oxidu uhličitého	[Pa]
	$l$	účinná tloušťka vrstvy	[m]

$\varepsilon_{\text{CO}_2, \text{pl}}$	emisivita oxidu uhličitého spalin při 470°C	[1]
$p_{\text{H}_2\text{O}}$	parciální tlak vodní páry	[Pa]
$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}, \text{pl}}$	emisivita vodní páry spalin při 470°C	[1]
$n$	mocnitel	[1]
$\beta$	korekční součinitel vlivu záření par	[1]
$T_{\text{sp}}$	průměrná teplota spalin v daném místě spalovací komory	[K]
$T_{\text{st}}$	teplota stěn ve spalovací komoře	[K]

Tepelný tok radiací

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon'_{\text{st}} \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{sp}} \cdot T_{\text{sp}}^4 - A_{\text{p}} \cdot T_{\text{st}}^4)$$

$$q_{\text{rad}} = 0,95 \cdot 5,6 \cdot 10^{-8} \cdot (0,0975 \cdot 1103,15^4 - 0,1714 \cdot 743,15^4) = 4900,47 \text{ W} / \text{m}^2$$

Kde	$\varepsilon'_{\text{st}}$	stupeň černosti	[1]
	$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	[1]
	$\varepsilon_{\text{sp}}$	emisivita zářících molekul spalin	[1]
	$T_{\text{sp}}$	teplota spalin u hořáku	[K]
	$A_{\text{p}}$	pohtivost plamene (absorpční součinitel)	[1]
	$T_{\text{st}}$	teplota stěn ve spalovací komoře	[K]

Součinitel přestupu tepla radiací

$$\alpha_{\text{sp,rad}} = \frac{q_{\text{rad}}}{\Delta t} = \frac{4900,47}{830 - 470} = 13,61 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Kde	$q_{\text{rad}}$	tepelný tok radiací	[ W / m <sup>2</sup> ]
	$\Delta t$	rozdíl mezi teplotou spalin a stěn	[°C]

## 10.2.9 Výpočet teplot ve spalovací komoře

Pro optimální umístění pěnokeramické vrstvy je nutné znát teploty ve spalovací komoře. Ideální teplota, při které by došlo k dohoření tuhých částic a přitom nedocházelo

k zalepování vrstvy vlivem měknutí popela, je mezi 700-1400°C. Ovšem díky odporovému drátu, který nahřívá pěnokeramickou vrstvu při najíždění a odstavování kotle, a jeho napájení (viz kapitola 11) je nutné volit maximální teplotu 950°C.

K výpočtu teplot je nutné si uvědomit, jaké tepelné a zářivé toky ve spalovací komoře máme. Vstupní tepelný tok  $Q_{\text{vstup}}$  na desku se skládá z citelného tepla spalin (konvektivní přestup) a záření tříatomových molekul plynů obsažených ve spalinách, záření z plochy vrchlíku plamene a dále z odvodu tepla zářením z povrchu vrstvy na plochy spalovací komory. Část tepelného toku, při průchodu vrstvou odchází do stěn  $q_{\text{st}}$ . Výstupní tok  $Q_{\text{výstup}}$  je do další části spalinového traktu reprezentován citelným teplem spalin, zářivým tokem z keramické porézní vrstvy na stěny spalovací komory nad vrstvou a s ohledem na tříatomové plyny v procesu radiace.

Tepelnou bilanci komory a vrstvy, tj. stanovení teplotního pole spalin a samotné výplně jsem se rozhodl provést v matematickém modelu, v programu ANSYS CFX. Spalovací komoru jsem vymodeloval v programu Inventor. Hořák je ve tvaru vrchlíku, jakožto hořící vrstva paliva. Celý tento model jsem poté implementoval v programu Ansys Workbench, kde jsem vytvořil potřebnou síť. Následně jsem modelu s vytvořenou sítí zadal okrajové podmínky nutné pro výpočet (tab. 10.3) jako jsou vstupní rychlost a teplota, hmotnostní tok pevných částic, intenzita turbulence, součinitel přestupu tepla spalin konvekcí a radiací, emisivita  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ , teplota topné vody a modely turbulence, radiace a tepelného přenosu.

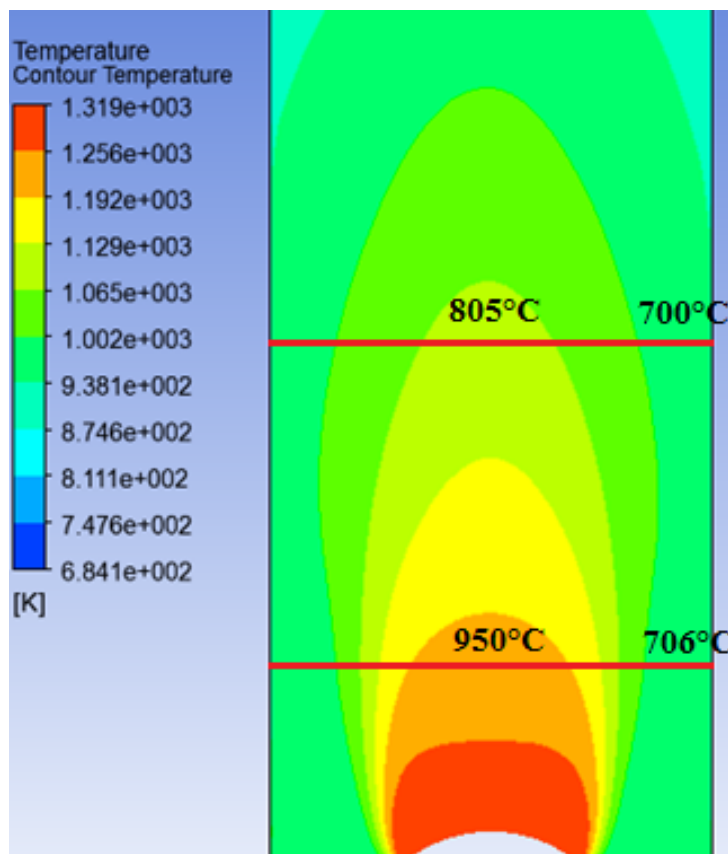
<b>Okrajové podmínky</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
Výstupní rychlost z vrchlíku	2,31	[m/s]
Výstupní teplota z vrchlíku	1046,6	[°C]
Hmotnostní tok pevných částic	0,0001	[kg/s]
Součinitel přestupu tepla spalin konvekcí	8,37	[W / m <sup>2</sup> · K]
Záření plamene	114669,18	[W / m <sup>2</sup> ]
Teplota plamene	1100	[°C]
Součinitel přestupu tepla spalin radiací	21,95	[W / m <sup>2</sup> · K]
Emisivita $\text{CO}_2$	0,058	[1]
Emisivita $\text{H}_2\text{O}$	0,038	[1]



Okrajové podmínky	Hodnota	Jednotka
Teplota stěn ve spalovací komoře	470	[°C]
Model turbulence	k epsilon	[1]
Intenzita turbulence	16	[%]
Režim průtoku	Subsonic	[1]
Model radiace	P1	[1]
Model tepelného přenosu	Ranz Marshall	[1]

Tab. 10.3 Okrajové podmínky nutné pro výpočet

Díky výpočtu teplotního profilu mám vymezený ideální prostor (obr. 10.1) pro instalaci pěnokeramické vrstvy, který je výšce 160-412mm nad hořákem. Vypočtené teploty budou ověřeny měřením. Druhým zásadním faktorem pro výběr vhodné výšky je snadná dostupnost pro manipulaci s pěnokeramickou vrstvou.



Obr. 10.1 Teplotní profil ve spalovací komoře

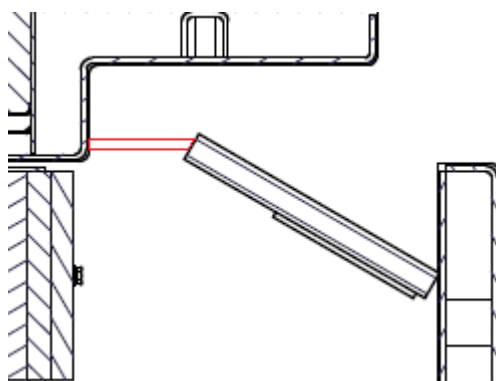
## 10.2.10 Výpočet parametrů v dalších částech kotle

S ohledem na možnost jiných opatření v dalších tazích kotle jsem provedl předběžné výpočty základních parametrů sdílení tepla. Tato kapitola se však primárně již nevztahuje k mnou zvolenému řešení.

Mezi důležité parametry zahrnuji:

- skutečný objem spalin  $V_{\text{spal,at}} [\text{m}^3 / \text{s}]$
- rychlost spalin  $w_{\text{sp}} [\text{m/s}]$
- Reynoldsovo kritérium [I] → proudění laminární, turbulentní nebo přechodová oblast
- součinitel přestupu tepla na straně spalin  $\alpha_{\text{sp}} [\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}]$

### 10.2.10.1 Prostor vedle keramického reflektoru



Obr. 10.2 Prostor vedle keramického reflektoru

Skutečný objem spalin

$$V_{\text{spal,at}} = \frac{(m_{\text{pal}} \cdot V_{\text{sp,sk}}^v) \cdot T_{\text{sp}}}{T_{\text{N}}} = \frac{(1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 9,458) \cdot (600 + 273,15)}{273,15} = 0,053 \text{m}^3 / \text{s}$$

Kde  $m_{\text{pal}}$  hmotnostní průtok paliva [kg/s]

$V_{\text{sp,sk}}^v$  množství spalin skutečných vlhkých [ $\text{m}^3 / \text{kg}$ ]

$T_{sp}$  teplota spalin vedle keramické desky [K]

$T_N$  teplota spalin za normálních podmínek [K]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp,at}}{S} = \frac{V_{sp,at}}{a \cdot b} = \frac{0,053}{0,344 \cdot 0,095} = 1,62 \text{ m/s}$$

Kde  $V_{sp,at}$  skutečný objem spalin vedle keramické desky [ $\text{m}^3 / \text{s}$ ]

$S$  průřez plochy vedle keramické desky [ $\text{m}^2$ ]

Charakteristický rozměr

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{4 \cdot (a \cdot b)}{2 \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot (0,344 \cdot 0,095)}{2 \cdot (0,344 + 0,095)} = 0,149 \text{ m}$$

Kde  $S$  průřez plochy vedle keramické desky [ $\text{m}^2$ ]

$o$  obvod plochy vedle keramické desky [m]

Reynoldsovo kritérium

$$Re = \frac{w_{sp} \cdot d_h}{\nu} = \frac{1,62 \cdot 0,149}{93,61 \cdot 10^{-6}} = 2578,6 \rightarrow \text{přechodová oblast}$$

Kde  $w_{sp}$  rychlost spalin vedle keramické desky [m/s]

$d_h$  charakteristický rozměr [m]

$\nu$  kinetická viskozita při 600°C [ $\text{m}^2 / \text{s}$ ]

Nusseltovo kritérium

Opět pro minimální délku zkoumané oblasti nezahrnuji opravný součinitel  $\epsilon_L$ .

$$\text{Nu} = K_0 \cdot \text{Pr}^{0,43} \cdot \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25} = 5,3 \cdot 0,62^{0,43} \cdot \left( \frac{0,62}{0,6385} \right)^{0,25} = 4,28$$

Kde  $K_0$  Koeficient závislý na Reynoldsově čísle [1]

$\text{Pr}$  Prandtlovo kritérium při 600°C [1]

$\text{Pr}_s$  Prandtlovo kritérium pro stěnu při 415°C [1]

Součinitel přestupu tepla

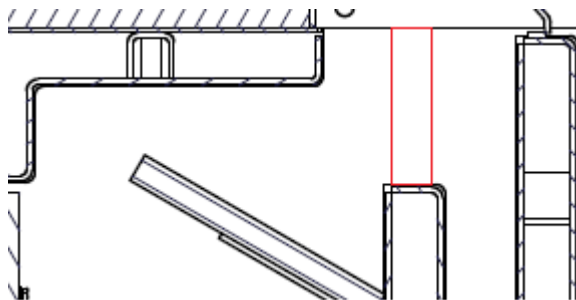
$$\alpha_{\text{sp}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d_h} = \frac{4,28 \cdot 7,42 \cdot 10^{-2}}{0,149} = 2,13 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Kde  $\text{Nu}$  Nusseltovo kritérium [1]

$\lambda$  součinitel tepelné vodivosti při 600°C [W / m · K]

$d_h$  charakteristický rozměr [m]

### 10.2.10.2 Prostor za keramickým reflektorem



Obr. 10.3 Prostor za keramickým reflektorem

Skutečný objem spalin

$$V_{\text{spal,at}} = \frac{(m_{\text{pal}} \cdot V_{\text{sp,sk}}^v) \cdot T_{\text{sp}}}{T_N} = \frac{(1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 9,458) \cdot (400 + 273,15)}{273,15} = 0,041 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Kde  $m_{\text{pal}}$  hmotnostní průtok paliva [kg/s]

$V_{\text{sp,sk}}^v$  množství spalin skutečných vlhkých [m<sup>3</sup> / kg]

$T_{sp}$  teplota spalin za keramickou deskou [K]

$T_N$  teplota spalin za normálních podmínek [K]

### Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp,at}}{S} = \frac{V_{sp,at}}{a \cdot b} = \frac{0,041}{0,344 \cdot 0,138} = 0,86 \text{ m/s}$$

Kde  $V_{sp,at}$  skutečný objem spalin proudící z hořáku [m<sup>3</sup> / s]

$S$  průřez plochy za keramickou deskou [m<sup>2</sup>]

### Charakteristický rozměr

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{4 \cdot (a \cdot b)}{2 \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot (0,344 \cdot 0,138)}{2 \cdot (0,344 + 0,138)} = 0,197 \text{ m}$$

Kde  $S$  průřez plochy za keramickou deskou [m<sup>2</sup>]

$o$  obvod plochy za keramickou deskou [m]

### Reynoldsovo kritérium

$$Re = \frac{w_{sp} \cdot d_h}{\nu} = \frac{0,86 \cdot 0,197}{60,38 \cdot 10^{-6}} = 2805,9 \rightarrow \text{přechodová oblast}$$

Kde  $w_{sp}$  rychlost spalin za keramickou deskou [m/s]

$d_h$  průměr plochy za keramickou deskou [m]

$\nu$  kinetická viskozita při 400°C [m<sup>2</sup> / s]

### Nusseltovo kritérium

Opět pro minimální délku zkoumané oblasti nezahrnuji opravný součinitel  $\epsilon_L$ .

$$Nu = K_0 \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25} = 6,49 \cdot 0,64^{0,43} \cdot \left( \frac{0,64}{0,662} \right)^{0,25} = 5,31$$

Kde  $K_0$  Koeficient závislý na Reynoldsově čísle [1]

$Pr$  Prandtlovo kritérium při 400°C [1]

$Pr_s$  Prandtlovo kritérium pro stěnu při 240°C [1]

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{sp} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h} = \frac{5,31 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2}}{0,197} = 1,54 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Kde  $Nu$  Nusseltovo kritérium [1]

$\lambda$  součinitel tepelné vodivosti při 400°C [W / m · K]

$d_h$  průměr plochy za keramickou deskou [m]

### 10.2.10.3 Prostor druhého tahu kotle

Skutečný objem spalin

$$V_{sp,at} = \frac{(m_{pal} \cdot V_{sp,sk}^v) \cdot T_{sp}}{T_N} = \frac{(1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 9,458) \cdot (328 + 273,15)}{273,15} = 0,037 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Kde  $m_{pal}$  hmotnostní průtok paliva [kg/s]

$V_{sp,sk}^v$  množství spalin skutečných vlhkých [ $\text{m}_N^3 / \text{kg}$ ]

$T_{sp}$  teplota spalin v druhém tahu kotle [K]

$T_N$  teplota spalin za normálních podmínek [K]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp,at}}{S} = \frac{V_{sp,at}}{a \cdot b} = \frac{0,037}{0,344 \cdot 0,063} = 1,71 \text{ m / s}$$

Kde	$V_{\text{spal,at}}$	skutečný objem spalín v druhém tahu kotle	$[\text{m}^3 / \text{s}]$
	$S$	průřez plochy v druhém tahu kotle	$[\text{m}^2]$

Charakteristický rozměr

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{4 \cdot (a \cdot b)}{2 \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot (0,344 \cdot 0,063)}{2 \cdot (0,344 + 0,063)} = 0,106 \text{m}$$

Kde	$S$	průřez plochy druhého tahu kotle	$[\text{m}^2]$
	$o$	obvod plochy druhého tahu kotle	$[\text{m}]$

Reynoldsovo kritérium

$$Re = \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_h}{\nu} = \frac{1,71 \cdot 0,106}{49,89 \cdot 10^{-6}} = 3633,2 \rightarrow \text{přechodová oblast}$$

Kde	$w_{\text{sp}}$	rychlost spalín v druhém tahu kotle	$[\text{m/s}]$
	$d_h$	průměr plochy v druhém tahu kotle	$[\text{m}]$
	$\nu$	kinetická viskozita při 328°C	$[\text{m}^2 / \text{s}]$

Nusseltovo kritérium

$$Nu = K_0 \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_S} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_L = 10,59 \cdot 0,647^{0,43} \cdot \left( \frac{0,647}{0,669} \right)^{0,25} \cdot 1,38 = 12,02$$

Kde	$K_0$	Koeficient závislý na Reynoldsově čísle	$[1]$
	$Pr$	Prandtlovo kritérium při 328°C	$[1]$
	$Pr_S$	Prandtlovo kritérium pro stěnu při 203°C	$[1]$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{\text{sp}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h} = \frac{12,02 \cdot 5,08 \cdot 10^{-2}}{0,106} = 5,76 \text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Kde	Nu	Nusseltovo kritérium	[1]
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti při 328°C	[W / m · K]
	$d_h$	průměr plochy v druhém tahu kotle	[m]

Prostor třetího tahu byl počítán stejným způsobem. Výsledné hodnoty jsou uvedené v následující tabulce 10.4.

#### 10.2.10.4 Souhrn vypočtených parametrů

Zkoumaná oblast	$V_{\text{spal,at}}$ [m <sup>3</sup> / s]	$w_{\text{sp}}$ [m / s]	Re [1]	Druh proudění	$\alpha_{\text{sp,konv}}$ [W / m <sup>2</sup> · K]
Vrchní část hořáku	0,0804	5,7	4130,2	přechodová oblast	8,37
Navrhované umístění pěnokeramické vrstvy	0,0672	0,64	1497,9	laminární proudění	7,21
Prostor vedle keramického reflektoru	0,053	1,62	2578,6	přechodová oblast	2,13
Prostor za keramickým reflektorem	0,041	0,86	2805,9	přechodová oblast	1,54
Prostor druhého tahu	0,037	1,71	3633,2	přechodová oblast	5,76
Prostor třetího tahu	0,030	1,38	4225,3	přechodová oblast	5,9

Tab. 10.4 Souhrn vypočtených parametrů

#### 10.2.11 Měření teplot v kotli

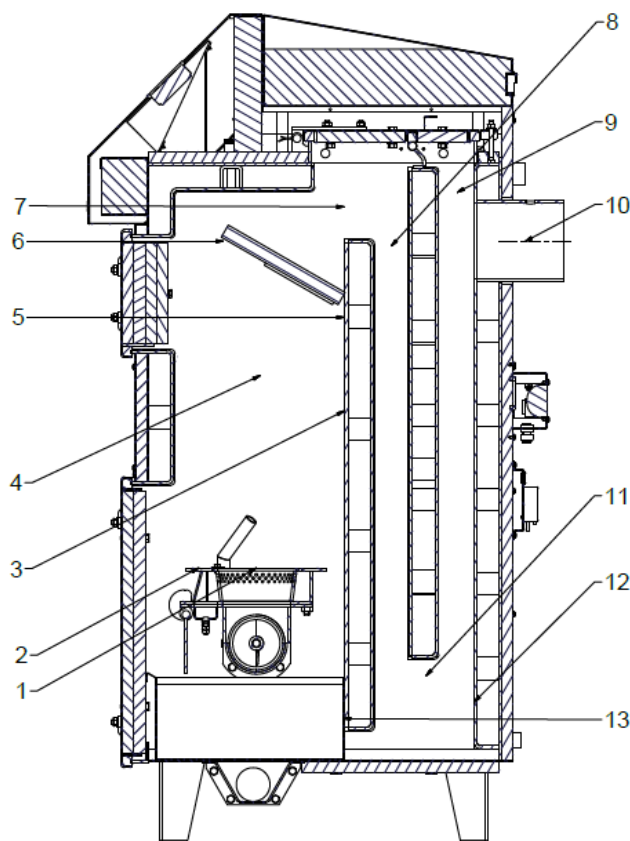
K měření teplot byly použity přístroje:

- Datalogger Almemo 2690-8 firmy Ahlborn (obr. 13.1)
- Snímač teplot Almemo ZKA029-RA Thermo E4 s plochým konektorem (NiCr-Ni, typ K)
- Termočlánek typ K (Cr-Al, -200 až 1250 °C)



Měření probíhalo ve zkušebně firmy Benekov na testovacím kotli Benekov C26, což je nový nástupce kotle Benekov C25. Kotel se liší pouze emisní zátěží pro okolí odpovídající 4. emisní třídě dle ČSN EN 303-5 a designem.

Po instalaci termočlánků trvalo 45min. než kotel najel na jmenovitý výkon (uhlí o výhřevnosti 16,5MJ/kg, teplota vody 73°C). Po změření teplot se snížil výkon, aby mohly být termočlánky instalovány do dalších částí kotle, a po 5min., kdy kotel opět najel na jmenovitý výkon, se měření opakovalo.



10.4 Místa měřených teplot

Umístění	Hodnota
1	1046
2	650
3	683
4	859
5	546
6	605
7	406
8	229
9	144
10	138
11	285
12	116
13	76

Tab. 10.5 Naměřené hodnoty v °C

Naměřené hodnoty ve spalovací komoře se od hodnot vypočtených v programu CFX mírně liší a to s maximální odchylkou +30°C.

Z naměřených a vypočtených hodnot je patrné, že ideálním místem pro umístění pěnokeramické vrstvy z hlediska teplot i přístupnosti je vrchní část spalovací komory, těsně pod vrchními dvířky kotle, kde se teplota pohybuje mezi 700-859°C.

## 11 NÁVRH VHODNÉHO OPATŘENÍ

Jako vhodné opatření ke snížení TZL u automatického kotle firmy Benekov jsem zvolil instalaci pěnové keramické vrstvy do spalovací komory a to těsně pod vrchní dvířka kotle (400mm nad hořákem). Hlavním úkolem pěnokeramické vrstvy je změna rychlostního profilu proudu spalin, zrovnomnění a tím zpomalení tuhých částic (fixní uhlík, saze) tak, aby bylo podpořeno jejich dohořívání ve spalovacím prostoru. Následně pak průchod tuhých částic pěnokeramickou vrstvou o dostatečné teplotě pro podpoření vyhořívání nespáleného tuhého zbytku. Navrhované umístění jsem volil ze dvou důvodů, a to kvůli dostatečně vysoké teplotě pro dohoření tuhých zbytků a sazí procházejících vrstvou, a snadnému přístupu a manipulaci s pěnokeramickou vrstvou.

Soukromá česká firma Láník s.r.o. z Boskovic, kterou jsem oslovil, vyrábí žáruvzdorné keramiky a mnou preferované pěnové keramické filtry. Po navázání spolupráce mi zaslali několik vzorků s různou porézností. Vystala přede mnou otázka, jakou poréznost filtru vybrat, aby nedošlo k zanesení a byl přítom splněn účel. Firma Láník disponuje několika druhy filtrů (liši se hlavně chemickým složením a maximální teplotou využití) pod označením VUKOPOR o poréznostech 10-80PPI.

Zvolil jsem filtr VUKOPOR S, který je vhodný do teploty max. 1480°C a je složen z karbidu křemičitého (SiC), oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) a oxidu křemičitého ( $SiO_2$ ). Tento filtr se oproti jiným vyznačuje velmi dobrou tepelnou vodivostí, stabilitou a odolností vůči náhlým tepelným změnám. Je tvořen otevřenou 3D strukturou keramické matrice o systému vzájemně propojených buněk.

Pro testování jsem navrhl dvě pěnokeramické desky o těchto rozměrech a poréznostech:

- 2x deska o rozměrech 290x167, tloušťce 10mm a poréznosti 45PPI
- 2x deska o rozměrech 290x167, tloušťce 10mm a poréznosti 35PPI

Tyto velikosti jsem volil z důvodu lepší manipulace a instalace přes vrchní dvířka kotle. Pěnokeramická vrstva (výkres č. 3) bude položena na žáruvzdorné keramice (výkres č. 2), která vyplňuje prostor mezi vrstvou a stěnou komory. Celý systém budou držet dvě navařené podpěry po delší straně spalovací komory z žáruvzdorné oceli (výkres č. 1). Navržená sestava je na obrázku č. 11.1.

Z ekonomického hlediska jsou pěnokeramické filtry výhodné. Cena zvolených filtrů je při kusové výrobě s porézností 45PPI 572,- Kč a s porézností 35PPI 494,- Kč.



Obr 11.1 Sestava pěnokeramické vrstvy s drážkou, žáruvzdorné keramiky a podpěr

Řešením proti ucpávání pěnokeramické vrstvy je její umístění do spalovací komory při teplotě 700-859°C, kde by měly šanci veškeré procházející tuhé zbytky a saze dohořet.

Pokud by došlo k ucpání, pěnokeramika by se díky své nízké hmotnosti proudem spalin a zvýšeným podtlakem vyvozeným spalinovým ventilátorem nadzvedla. Dotykové čidlo, umístěné těsně nad pěnokeramikou by okamžitě dalo signál řídicí jednotce pro zastavení chodu kotle.

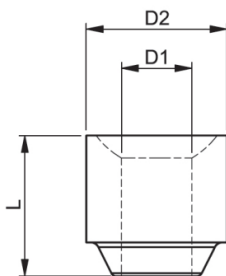
Problém nastává při najíždění a odstavování, kdy teplota vrstvy je nízká a tvorba sazí naopak značná. Je tedy nutné při těchto fázích pěnokeramickou desku nahřívat na min. 700°C ještě před zapálením hořáku. Teplotu desky bude měřit teplotní čidlo (termočlánek typu K (NiCr-Ni)).

Možnosti nahřívání pěnokeramické desky:

- Horký vzduch
  - Výhody: využití již při zapalování paliva
  - Nevýhody: velká spotřeba energie, složitější instalace
- Indukční ohřev
  - Výhody: vysoká životnost spirály, snadná a levná výměna a nekontaktnost, kdy spirála nemusí být položena přímo na pěnokeramice
  - Nevýhody: se vzdáleností spirály klesá účinnost, reaguje s ostatními kovovými částmi v kotli a kvůli záření je složitější dodržení legislativy

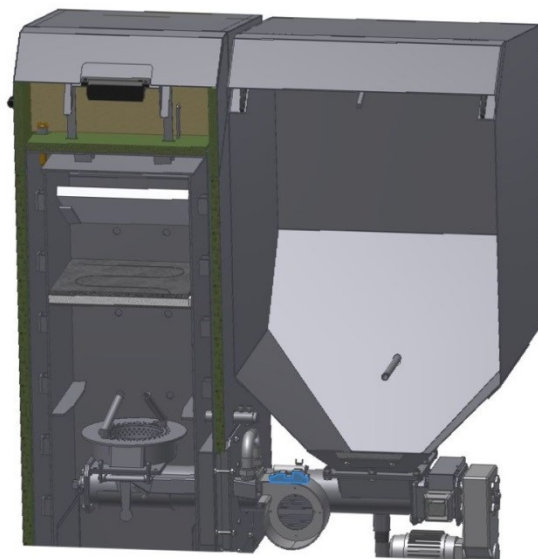
- Odporový drát
  - Výhody: ohřívá přímo desku, jednoduchá konstrukce
  - Nevýhody: nutná elektrická izolace, složitější výměna

Jako nejvhodnější variantu jsem zvolil ohřev odporovým drátem. V pěnokeramické desce je 3mm drážka jíž povede odporový drát Isachrom 60 o průměru 0,5mm (max. teplota ohřevu 1150°C, hodnota odporu 5,65Ω/m). Pro elektrickou a mechanickou ochranu je obalen keramickými korálky o vnějším průměru 3mm, vnitřním průměru 1mm a délce 5mm (obr 11.2). Zakončení vyřeším keramickou svorkovnicí, zapouzdřenou v ocelové hadici, zavedenou do rozvaděče. Tato svorkovnice spojuje odporový drát s napájecím drátem, který je z mědi. Teplota ovšem nesmí překročit cca 1000°C kvůli tání mědi. Druhá svorkovnice spojuje horký měděný drát se studeným, který je izolovaný ideálně silikonovým vodičem, napojený právě do rozvaděče. Celý napájecí kabel je pro mechanickou odolnost a elektrickou izolaci opět obalen keramickými korálky.



Obr. 11.2 Keramický korálek [28]

Na následujícím obrázku č. 11.3 je umístění navržené sestavy v kotli Benekov C25.



Obr. 11.3 Umístění navržené sestavy v kotli Benekov C25

## 12. MODEL TEPLOTNÍHO A RYCHLOSTNÍHO PROFILU VE SPALOVACÍ KOMOŘE

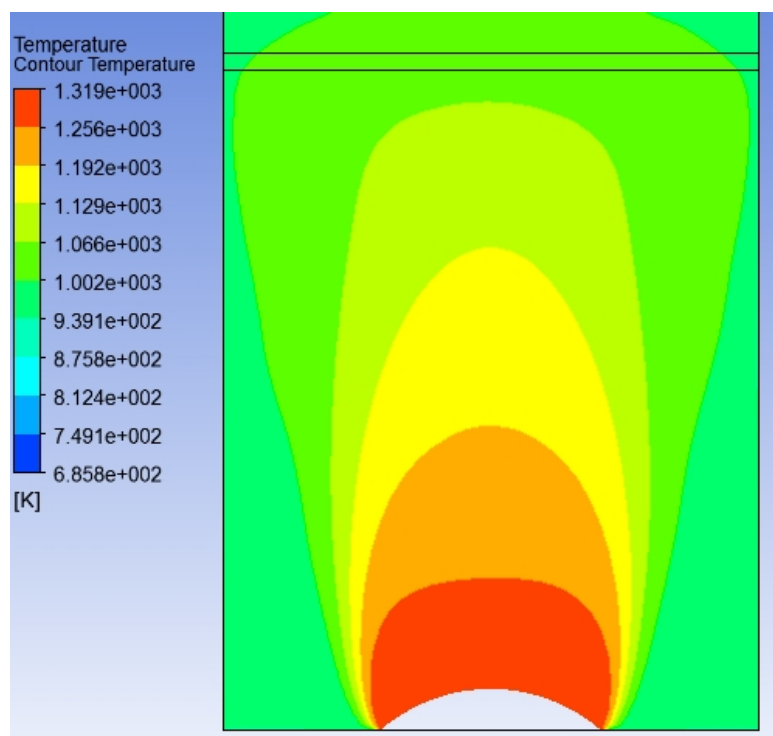
Pro ověření změny rychlostního profilu po umístění pěnokeramické vrstvy do vrchní části spalovací komory (400mm nad hořák) a dostatečné teploty na vrstvě jsem opět provedl modelaci v programu CFX.

Do již vymodelované spalovací komory v programu Inventor jsem umístil pěnokeramickou vrstvu. Tento model jsem poté implementoval v programu Ansys Workbench, kde jsem vytvořil potřebnou síť. Modelu s vytvořenou sítí jsem v CFX programu zadal další okrajové podmínky, tentokrát pro pěnokeramickou vrstvu.

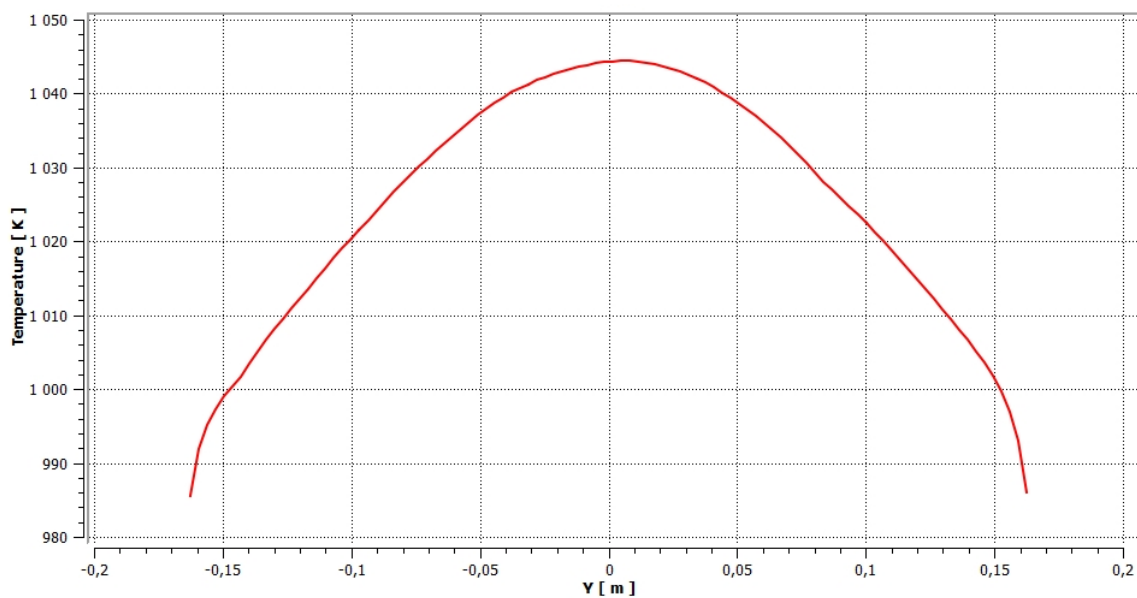
Okrajové podmínky	Hodnota	Jednotka
Poréznost	0,80	[%]
Tlaková ztráta	16,9	[Pa]

Tab. 12.1 Okrajové podmínky pro pěnokeramickou vrstvu

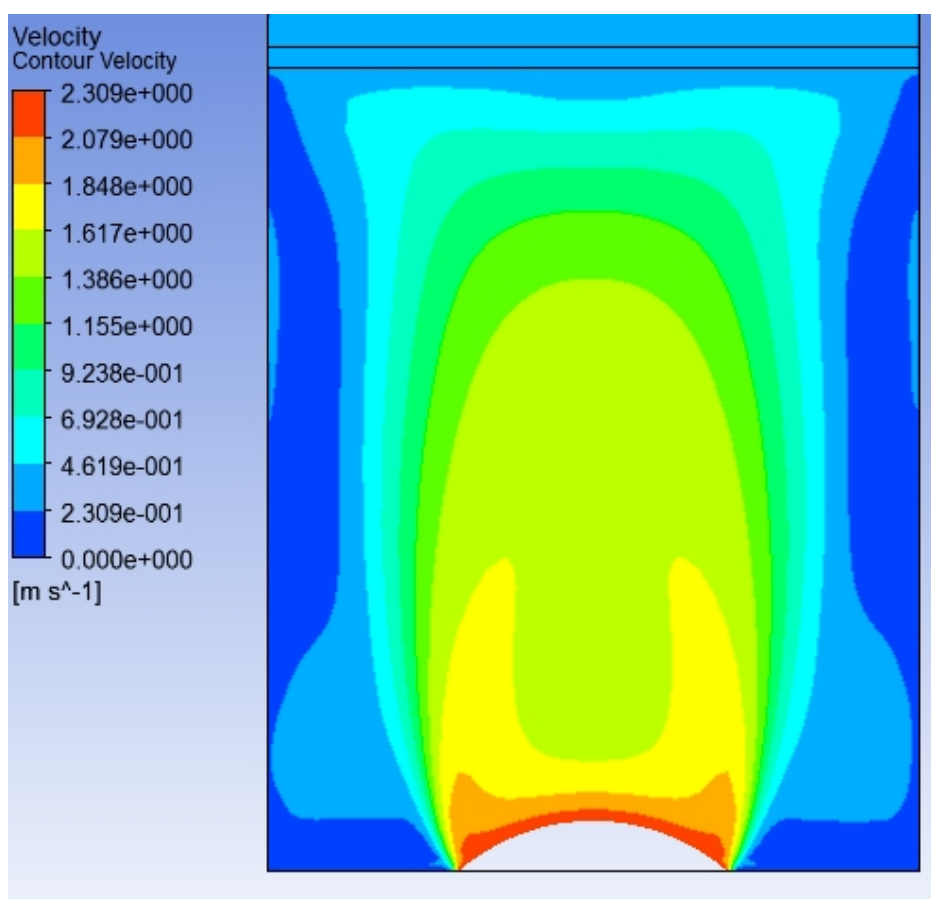
Na následujících obrázcích jsou teplotní a rychlostní profily ve spalovací komoře včetně grafů průběhů rychlosti a teplot v pěnokeramické vrstvě. Na obrázku 12.5 jde vidět zrovnoměnění toku spalin po průchodu pěnokeramickou vrstvou.



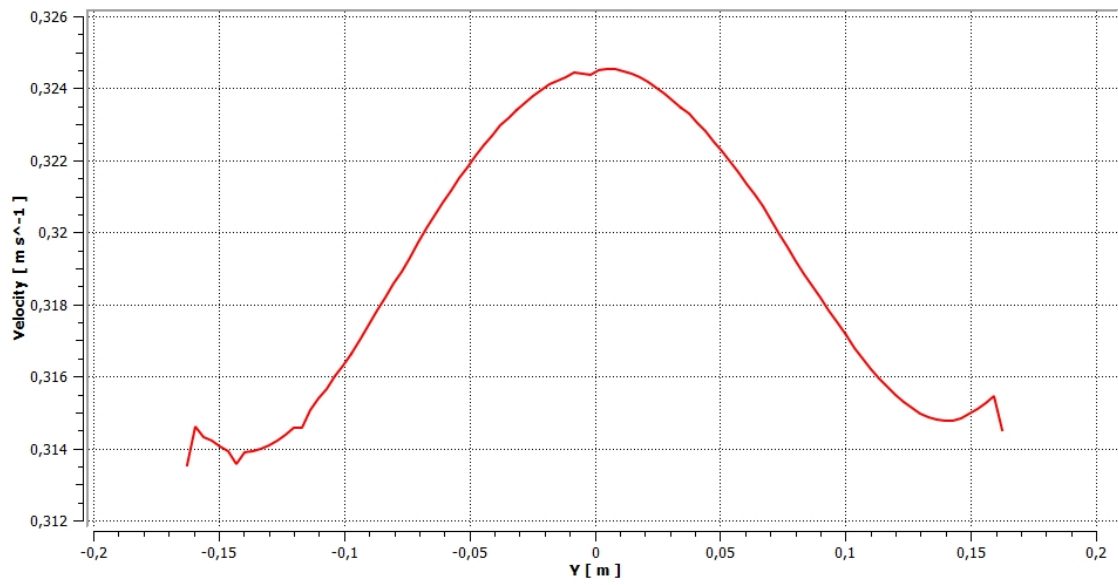
Obr. 12.1 Teplotní profil spalin ve spalovací komoře



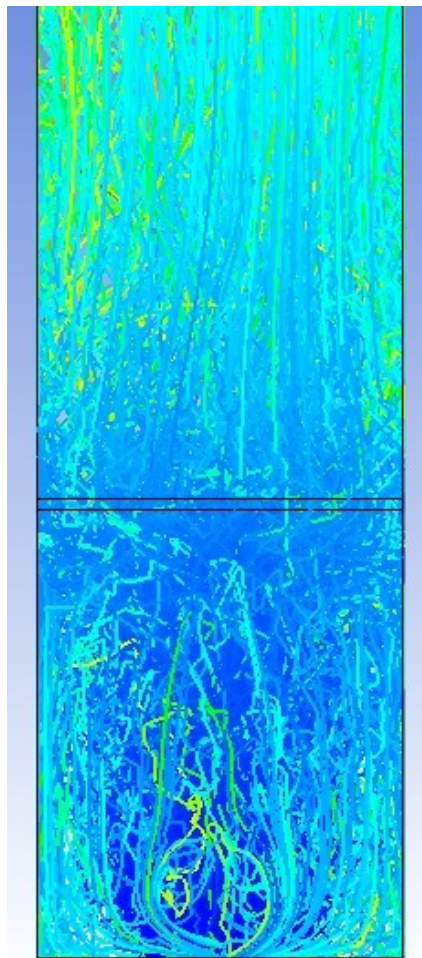
Obr. 12.2 Průběh teplot v pěnokeramické vrstvě



Obr. 12.3 Rychlostní profil spalin ve spalovací komoře



Obr. 12.4 Průběh rychlosti spalin v pěňokeramické vrstvě



Obr. 12.5 Zrovnoměření toku spalin po průchodu vrstvou

Jak jde vidět na obrázku 12.1 a 12.2, teploty v celém průřezu pěňokeramické vrstvy se pohybují mezi 713-772°C. Chladnější okraje vrstvy nejsou pro mě směrodatné, protože v daném místě bude od stěny kotle 20mm vrstva žáruvzdorné keramiky, na které budou pěňokeramické desky ležet. Těmito okraji tedy spaliny proudit nebudou, a proto nejnižší teplota funkční části desky dle programu CFX je 729°C. Tato teplota je plně dostačující pro dohoření tuhých částic a sazí.

Rychlostní profil spalin vychází dle mého předpokladu. Vypočtená průměrná rychlost v navrhovaném umístění pěňokeramiky před její instalací je 0,64m/s, což jde vidět i na obrázku 12.3 v místě, kde pěňokeramická vrstva ještě rychlostní profil neovlivňuje. Těsně před vrstvou se rychlost zpomalí téměř na polovinu. V podélném průřezu vrstvy je rychlost 0,32m/s (obr. 12.4). Rychlosti v krajích filtru z důvodu žáruvzdorné keramiky pro mě opět nejsou směrodatné.

Výsledky modelace rychlostního a tepelného proudění spalin potvrdili mé předchozí úvahy. Instalací pěňokeramické vrstvy se proud spalin zrovnoměří a díky dostatečně vysoké teplotě v celém objemu i na povrchu vrstvy je reálné vyšší množství vyhořených tuhých částic a sazí.



## 13. ZÁVĚREČNÉ MĚŘENÍ A HODNOCENÍ NAVRHOVANÉHO OPATŘENÍ

Měření probíhalo ve zkušebně firmy Benekov na testovacím kotli Benekov C26, což je nový nástupce kotle Benekov C25. Kotel se liší pouze emisní zátěží pro okolí odpovídající 4. emisní třídě dle ČSN EN 303-5 a designem. V době testování byla navíc spalovací komora vyzděna žáruvzdornou keramikou, proto se musel patřičně zmenšit rozměr pěnokeramické desky. Ve třetím tahu byl ještě vložen 12lamelový ekonomizér.

### 13.1 Měření povrchových teplot pěnokeramické vrstvy v kotli

K měření teplot byly použity přístroje:

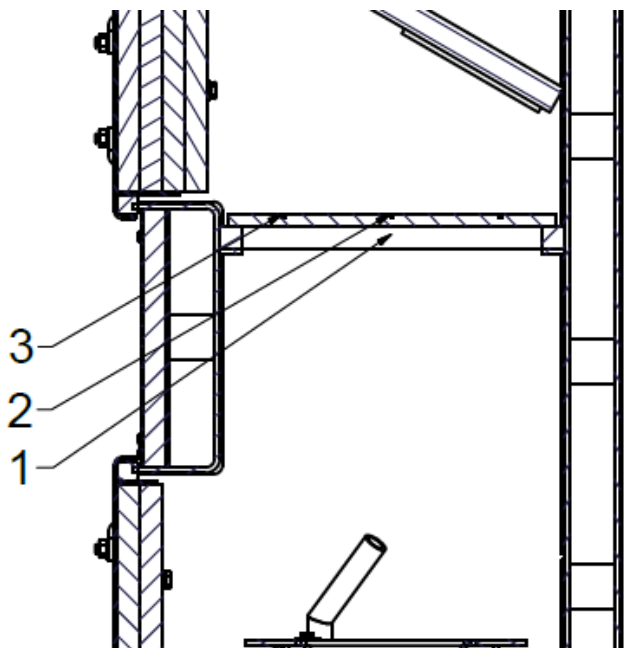
- Datalogger Almemo 2690-8 firmy Ahlborn (obr. 13.1)
- Snímač teplot Almemo ZKA029-RA Thermo E4 s plochým konektorem (NiCr-Ni, typ K)
- Termočlánek typ K (Cr-Al, -200 až 1250 °C)



Obr. 13.1 Datalogger Almemo 2690-8 [29]

Po instalaci termočláneku trvalo 45min. než kotel najel na jmenovitý výkon (uhlí o výhřevnosti 16,5MJ/kg, teplota vody 73°C). Po změření teploty se snížil výkon, aby

mohl být termočlánek instalován na jinou část pěnokeramické vrstvy (poréznost 45PPI), a po 5min., kdy kotel opět najel na 100% výkon, se měření opakovalo.



Obr. 13.2 Místa měřených teplot

Umístění	Hodnota
1	847
2	817
3	771

Tab. 13.1 Naměřené hodnoty v °C

Naměřené hodnoty jsou mírně vyšší oproti hodnotám teplotního profilu vygenerovaným programem CFX. Maximální odchylka je +45°C. Tyto teploty jsou ideální pro vyhoření usazených tuhých zbytků a sazí v celém objemu pěnokeramické vrstvy.

### 13.2 Měření koncentrace TZL bez a při použití pěnokeramické vrstvy

Dle zkušebního ústavu v Brně kotel vypouští 54mg/m<sup>3</sup> tuhých znečišťujících látek. Přístroj na měření prachu WÖHLER SM 500, který firma Benekov vlastní, se ve výsledných hodnotách mírně liší. Během posledních měření se výsledná hodnota pohybovala mezi 50 až 67 mg/m<sup>3</sup>. Hodnoty jsou odlišné v důsledku použitého paliva a v drobných změnách směru proudění spalin díky vloženým přepážkám.

Při mém měření bylo spalováno hnědé uhlí Ořech 2 (dodavatel Ridera) o výhřevnosti 16,5MJ/kg. Proces probíhal s přebytkem vzduchu okolo 1,5.

Pěnokeramická vrstva byla do spalovací komory vložena ještě před zápalením a při najíždění kotle na jmenovitý výkon nebyla nahřívána. Každé měření koncentrace TZL trvalo jednu hodinu.

K měření koncentrace TZL bylo použito:

- Přístroj na měření prachu WÖHLER SM 500 (obr. 13.3)
  - Přístroj dále měří:
    - koncentraci kyslíku v suchých spalínách
    - koncentraci oxidu uhelnatého v suchých spalínách
    - diferenční tah komínu
    - teplotu spalin (-20 až 800°C)



Obr. 13.3 Přístroj k měření prachu WÖHLER SM 500 [30]

Naměřené hodnoty bez pěnokeramiky (protokol o měření viz příloha 1 a 2):

- Kotlové těleso se standartním ekonomizérem v druhém tahu, ve třetím tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kotlového tělesa mezi prvním a druhým tahem je přepážka. Spalovací komora vyložena keramikou, včetně dvou vodorovných přepážek. Výkon ventilátoru 59%, škrticí klapka otevřena na 100%

Parametr	Průměr	Jednotka
O <sub>2</sub>	6,4	[%]
CO <sub>2</sub>	12,5	[%]
CO	33	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
NO <sub>x</sub>	637	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
SO <sub>2</sub>	1620	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
TZL	67	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>

Tab. 13.2 Naměřené hodnoty bez pěnokeramiky

- Kotlové těleso se standartním ekonomizérem v druhém tahu, ve třetím tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kotlového tělesa mezi prvním a druhým tahem je přepážka. Spalovací komora vyložena keramikou. Výkon ventilátoru 59%, škrticí klapka otevřena na 100%

Parametr	Průměr	Jednotka
O <sub>2</sub>	7,1	[%]
CO <sub>2</sub>	12	[%]
CO	24	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
NO <sub>x</sub>	638	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
SO <sub>2</sub>	1385	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
TZL	50	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>

Tab. 13.3 Naměřené hodnoty bez pěnokeramiky

Naměřené hodnoty s pěnokeramikou (protokol o měření viz příloha 3 a 4):

- Kotlové těleso se standartním ekonomizérem v druhém tahu, ve třetím tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kotlového tělesa mezi prvním a druhým tahem je přepážka. První tah kotlového tělesa je vyložen keramikou, 400mm nad hořákem **10mm vrstva pěnokeramiky 35PPI**. Výkon ventilátoru 59%, škrticí klapka otevřena na 100%

Parametr	Průměr	Jednotka
O <sub>2</sub>	6,7	[%]
CO <sub>2</sub>	12	[%]
CO	137	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
NO <sub>x</sub>	592	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
SO <sub>2</sub>	1506	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
TZL	63	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>

Tab. 13.4 Naměřené hodnoty s pěnokeramikou o poréznosti 35PPI

- Kotlové těleso se standartním ekonomizérem v druhém tahu, ve třetím tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kotlového tělesa mezi prvním a druhým tahem je přepážka. První tah kotlového tělesa je vyložen keramikou, 400mm nad hořákem **10mm vrstva pěnokeramiky 45PPI**. Výkon ventilátoru 62%, škrticí klapka otevřena na 100%

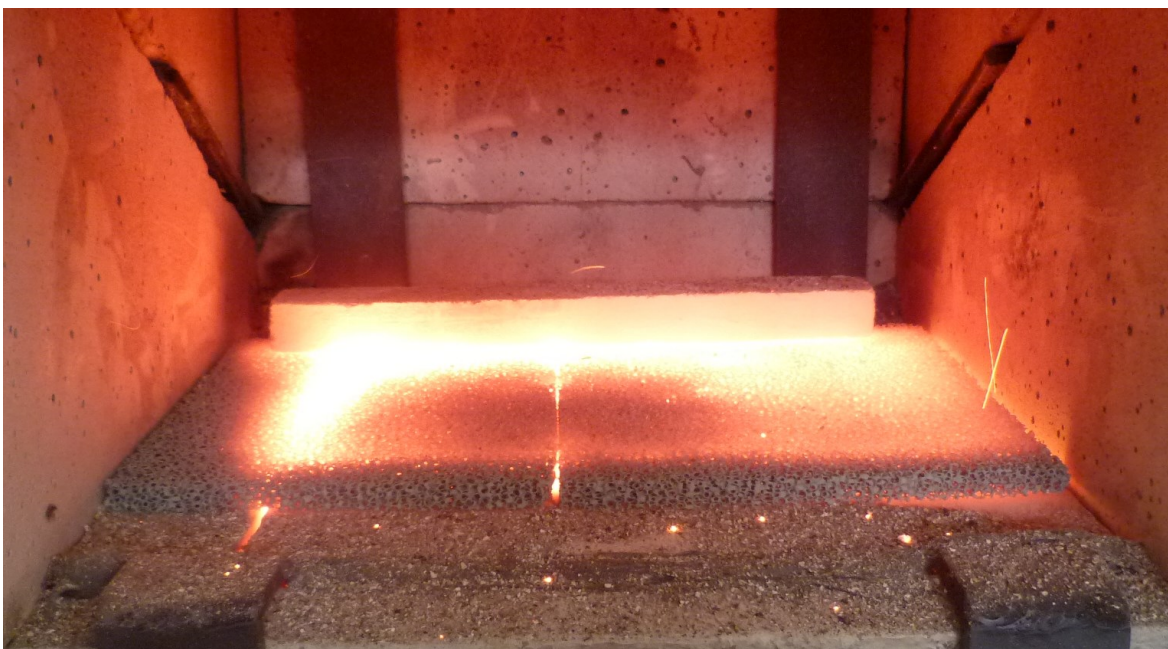
Parametr	Průměr	Jednotka
O <sub>2</sub>	5,4	[%]
CO <sub>2</sub>	13,2	[%]
CO	184	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
NO <sub>x</sub>	544	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
SO <sub>2</sub>	1296	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>
TZL	47	[ mg/m <sup>3</sup> ] při 10% O <sub>2</sub>

Tab. 13.5 Naměřené hodnoty s pěnokeramikou o poréznosti 45PPI

Na následujících obrázcích 13.4 a 13.5 lze vidět uložení pěnokeramiky ve spalovací komoře před zkouškou a během zkoušky. Místo mnou navrhovaných podpěr byly kvůli vyzdění komory žáruvzdornou keramikou provizorně vyrobeny jiné podpěry, které byly uchyceny právě za žáruvzdornou keramiku. Prostor mezi keramikou a stěnou kotle byl utěsněn kamnářským tmelem.



Obr. 13.4 Pěnokeramická vrstva ve spalovací komoře před zkouškou



Obr. 13.5 Pěnokeramická vrstva ve spalovací komoře během zkoušky

Jako jednoznačně lepší varianta se jeví použití pěnokeramické vrstvy o poréznosti 45PPI. Hodnota vypouštěných TZL dosáhla  $47 \text{ mg/m}^3$ , což sice není kýžená hodnota  $40 \text{ mg/m}^3$  a méně, ale je to nejlepší naměřený výsledek na kotli Benekov řady C. Výkon spalínového ventilátoru se musel zvýšit z 59% ( $P=24,78\text{W}$ ,  $n=1770\text{ot/min}$ ) na 62% ( $P=26,04\text{W}$ ,  $n=1860\text{ot/min}$ ). Při použití vrstvy s porézností 35PPI byla naměřena hodnota vypouštěných TZL  $63\text{mg/m}^3$ .

Během zkoušky, která trvala jednu hodinu, došlo jen k minimálnímu zanesení. Velká část tohoto zanesení byla nejspíš způsobena tím, že při najíždění a odstavování kotle nebyla pěnokeramická deska nahřívána.

Zanesení bylo kontrolováno jak vizuálně, tak zkouškou tlakové ztráty vrstvy. Lze říct, že umístění pěnokeramické vrstvy do spalovací komory a zaručení odpovídající teploty vrstvy, zamezuje usazování sazí, respektive umožňuje jejich vyhoření. Pokusy s umístění podobných vrstev na konci kotle, dle dostupných informací, končily značným ucpáváním vrstvy v průběhu cca 30min.

Pro zvýšení účinnosti pěnokeramické vrstvy doporučuji použití místo dvou pěnokeramických desek pouze jednu o rozměru 290x334mm a to z důvodu malé mezery, která mezi dvěma deskami vzniká. Další možností k dosažení lepších výsledků je větší tloušťka pěnokeramické vrstvy. Vyšší poréznost v jednotkách PPI již nedoporučuji z důvodu větší šance ucpání filtru.

Vrstva má být pro pevné částice průchozí. Jejím principem je zpomalení částic a jejich kontakt s plochou o dostatečné teplotě na vyhoření sazí. Dále pak zrovnoměnění rychlostního profilu spalin a tím i eliminace intenzivního jádrového toku v komoře s potenciálem únosu TZL z hořáku.

### **13.3 Měření tlakové ztráty při použití pěnokeramické vrstvy**

Po instalaci pěnokeramické vrstvy principiálně vzroste tlaková ztráta v kotli. Hodnota zvýšení tlakové ztráty je pro mě důležitá a to z důvodu ověření dostatečného výkonu spalinového ventilátoru G1G108.

K měření tlaků byly použity přístroje:

- Datalogger Almemo 2690-8 firmy Ahlborn (obr. 13.1)
- Snímač tlaku Almemo FD A602-S2K s plochým konektorem ( $\pm 250\text{Pa}$ )
- Silikonové a kovové trubičky
- Rotametr
- Ventilátor

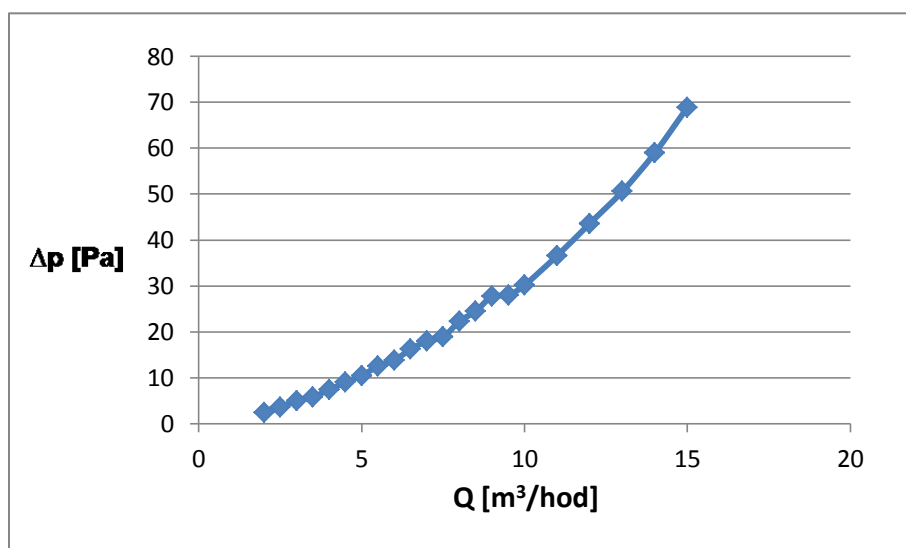
Tlaková ztráta pěnokeramického filtru byla měřena:

- Mimo prostor kotle

Měření tlakové ztráty mimo prostor kotle probíhalo tak, že se do trubky o průměru 40mm vložila pěnokeramická vrstva a ventilátorem se přes vrstvu foukal čistý vzduch.

<b>Průtok</b> [ m <sup>3</sup> / hod ]	<b>Tlaková ztráta</b> [Pa]	<b>Průtok</b> [ m <sup>3</sup> / hod ]	<b>Tlaková ztráta</b> [Pa]
2	2,4	7,5	18,9
2,5	3,6	8	22,3
3	5	8,5	24,5
3,5	5,8	9	27,7
4	7,4	9,5	28
4,5	9	10	30,2
5	10,5	11	36,6
5,5	12,5	12	43,6
6	13,8	13	50,6
6,5	16,2	14	59
7	18	15	68,9

Tab. 13.6 Naměřené tlakové ztráty při patřičném průtoku vzduchu



Obr. 13.6 Graf závislosti tlakové ztráty na průtoku



- V prostoru kotle

Měření tlakové ztráty následovalo hned po změření redukce TZL. Při jmenovitém výkonu byl naměřen rozdíl tlaků před a za filtrem 16,9Pa a před filtrem a za ventilátorem, tedy tlaková ztráta celého spalínového traktu 48,9Pa.



Obr. 13.7 Měření rozdílů tlaků před a za filtrem

Z výsledků je patrné, že tlaková ztráta pěnokeramické vrstvy 16,9Pa je minimální. Výkon ventilátoru se musel zvýšit z 59% ( $P=24,78\text{W}$ ,  $n=1770\text{ot/min}$ ) na 62% ( $P=26,04\text{W}$ ,  $n=1860\text{ot/min}$ ).

## 14. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout opatření ke snížení úletu tuhých znečišťujících látek z automatického kotle firmy Benekov o jmenovitém výkonu 25kW spalující hnědé uhlí. V současné době je hodnota vypouštěných TZL  $54\text{mg/m}^3$  při 10%  $\text{O}_2$ , což kotel zařazuje do čtvrté emisní třídy dle ČSN EN 303-05. Cílem je redukce pod  $40\text{mg/m}^3$  a tím dosáhnout páté emisní třídy.

Tuhé částice jsou v současnosti v kotli redukovány keramickým reflektorem umístěným ve vrchní části spalovací komory a ekonomizérem v druhém tahu. Z granulometrické zkoušky byla zjištěna průměrná velikost částic vycházejících z kotle  $17,52\mu\text{m}$  a nedopal daného vzorku 57,93%. Myšlenkou k úspěchu nyní bylo snížení vysokého nedopalu v tuhých zbytcích popílku s ohledem na tvorbu sazí a dále snížení únosu pevných částic ze spalovací komory.

Jako nejvhodnější variantu, z hlediska nízkých pořizovacích i provozních nákladů, nízké spotřebě energie a vysoké účinnosti, jsem zvolil instalaci pěnové keramické vrstvy o tloušťce 10mm a poréznosti 45PPI po celém průřezu vrchní části spalovací komory, 400mm nad hořákem. Jejím principem je zpomalení částic a jejich kontakt s plochou o dostatečné teplotě na vyhoření sazí. Dále pak zrovnoměnění rychlostního profilu spalin a tím i eliminace intenzivního jádrového toku v komoře s potenciálem únosu TZL z hořáku.

Vypočtená teplota v navrženém místě, ověřená měřeními před i po instalaci pěnokeramické vrstvy a teplota získaná modelací teplotního profilu spalin v programu CFX, se pohybuje mezi  $700\text{-}847^\circ\text{C}$ . Tyto teploty jsou dle mého názoru optimální k dohoření tuhých zbytků a sazí usazených na pěnokeramické vrstvě s ohledem na tvar komory, spalované palivo a další parametry provozu kotle.

Problém s nízkou teplotou při najíždění a odstavování kotle je vyřešen drážkou v pěnokeramické vrstvě, ve které je vložený odporový drát Isachrom 60 obalený pro mechanickou a elektrickou ochranu keramickými korálky. Ten vrstvu při nízkých teplotách nahřívá a zabraňuje tím její ucpání.

Navrženým způsobem snížení koncentrace TZL, kdy pěnokeramická vrstva volně leží na žáruvzdorné keramice a žáruvzdorné oceli přivařené k stěnám kotle, došlo k redukcii pevných částic na  $47\text{mg/m}^3$ , což sice není kýžená hodnota pod  $40\text{mg/m}^3$ , ale je to prozatím nejlepší naměřený výsledek na kotli.

Zanesení pěnokeramické vrstvy po 2hodinách testování bylo minimální. Kontrola proběhla jak vizuálně, tak zkouškou tlakové ztráty vrstvy, která je 16,9Pa. Lze říct, že

umístění pěnokeramické vrstvy do spalovací komory a zaručení odpovídající teploty vrstvy zamezuje usazování sazí, respektive umožňuje jejich vyhoření.

Tento výsledek je prvotním krokem k dalšímu výzkumu snížení emisí TZL. Firma Benekov má zájem nadále testovat možnosti zvýšení účinnosti pěnokeramických vrstev např. větší tloušťkou vrstvy.

## 15. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Metodický pokyn Ministerstva životního prostředí oborou ochrany ovzduší k definici nízkoemisního spalovacího zdroje* [online].  
Dostupné z [http://www.mzp.cz/cz/definice\\_nizkoemisniho\\_spalovaciho\\_zdroje](http://www.mzp.cz/cz/definice_nizkoemisniho_spalovaciho_zdroje)
- [2] *Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě* [online].  
Dostupné z <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [3] *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (2)* [online]. Dostupné z <http://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [4] Materiál firmy Benekov: *Pracovní dokument o možných požadavcích na Ekodesign a Energetické značení pro kotle na pevná paliva (<500 kW)*
- [5] *Kotlíková dotace* [online].  
Dostupné z <http://lokalni-topeniste.kr-moravskoslezsky.cz/node/78>
- [6] NOSKIEVIČ, P.: *Spalování uhlí*, Ostrava: VŠB, 2005 ISBN 80-248-0204-X
- [7] *BENEKOVterm s.r.o.* [online]. Dostupné z <http://benekov.cz/cs/uvod>
- [8] KOLONIČNÝ, J., HORÁK, J., PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ, S.: *Kotle malých výkonů na pevná paliva*, Ostrava: VŠB, 2011 ISBN 978-80-248-2542-7
- [9] KOLONIČNÝ, J., BOGOCZOVÁ, V., HORÁK, J.: *Postupy správného topení*, Ostrava: VŠB, 2010 ISBN 978-80-248-2255-6
- [10] *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1)* [online]. Dostupné z <http://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [11] *Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů* [online]. Dostupné z <http://vytapani.tzb-info.cz/ochrana-ovzdusi/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [12] *Prezentace Ochrana ovzduší* od Ing. Jana Matouška, Ph.D.
- [13] *Úvod do teorie spalování tuhých paliv* [online]. Dostupné z <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/spalovani-tuhych-paliv.pdf>
- [14] NOSKIEVIČ, P., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T.: *Malé zdroje znečišťování*, Ostrava: VŠB, 2004
- [15] *Tuhé znečišťující látky a těžké kovy* [online].  
Dostupné z <http://www.biomasa-info.cz/cs/ekotzl.htm>
- [16] *Znečišťující látky v ovzduší* [online].  
Dostupné z <http://www.ohk-most.cz/Files/OHK/Most/VUHU-Nezkracenaverze.pdf>

- [17] *VOC* [online]. Dostupné z <http://www.bio-chem.cz/cs/bio-prostredi/voc>
- [18] BLAHOŽ, V., KADLEC, Z.: *Základy sdílení tepla*, Ostrava, 2000  
ISBN 80-902001-1-7
- [19] *Retortové hořáky Ling* [online].  
Dostupné z <http://www.ling.cz/cz/technicke-specifikace.html>
- [20] *Návod k obsluze a instalaci kotle Benekov C25* [online]. Dostupné z  
<http://benekov.cz/files/documents/products/66/navod-benekov-c-cz-2012-06.pdf>
- [21] VEJVODA, J., BURYAN, P., MACHAČ, P.: *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*, Praha: VSCHT 2002
- [22] *Rozptyl látek znečišťující ovzduší* [online].  
Dostupné z <http://www.uake.cz/OZP/content/section38.html>
- [23] CHOBOT, I.: *Drobné prachové částice v plynných produktech spalování*, Brno: VUT, 2012. Bakalářská práce. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.
- [24] HEMERKA, J.: *Odlučování tuhých částic*, Praha: ČVUT, 1994 ISBN 80-01-01088-0
- [25] Příručka firmy Láník: *Filtry, filtrace a filtrování*, Boskovice, 2011
- [26] ŠENK, V.: *Keramické porézní materiály – příprava, struktura a vlastnosti*, Brno: VUT, 2011. Diplomová práce. Vedoucí práce Jaroslav Cihlář.
- [27] GRUNWALDOVÁ, V.: *Velikost a tvar částic*, [online]. Dostupné z  
<http://tresen.vscht.cz/min/sites/default/files/tvar%20a%20velikost%20castic%20VSCHT.pdf>
- [28] *Essentra components – keramické korálky* [online].  
Dostupné z <http://www.essentracomponents.cz/keramicke-koraliky>
- [29] *Ahlborn* [online].  
Dostupné z <http://ahlborn.cz/cs/produkt/datalogger-almemo-2690-8kl/>
- [30] *Wohler SM500- technika na míru* [online].  
Dostupné z <http://www.woehler.cz/>
- [31] *Severočeské doly – Bílinské uhlí* [online].  
Dostupné z [http://www.sdas.cz/dokumenty/Katalog\\_SD\\_2012\\_13.pdf](http://www.sdas.cz/dokumenty/Katalog_SD_2012_13.pdf)

## 16. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Protokol o měření TZL 2014/13 – bez pěnokeramické desky

Příloha č. 2: Protokol o měření TZL 2014/14 – bez pěnokeramické desky

Příloha č. 3: Protokol o měření TZL 2014/15 – s pěnokeramickou deskou o porezitě 35PPI

Příloha č. 4: Protokol o měření TZL 2014/16 – s pěnokeramickou deskou o porezitě 45PPI

Příloha č. 5: Diagram pro určení emisivity oxidu uhličitého v závislosti na teplotě a součinu parciálního tlaku a účinné tloušťky vrstvy

Příloha č. 6: Diagram pro určení emisivity vodní páry v závislosti na teplotě a součinu parciálního tlaku a účinné tloušťky vrstvy

Příloha č. 7: Diagram pro určení korekčního součinitele  $\beta$

Výkres 01: Žáruvzdorná podpěra (formát A4)

Výkres 02: Žáruvzdorná keramika (formát A4)

Výkres 03: Pěnokeramická vrstva (formát A4)

Výkres 04: Navržená sestava (formát A3)

Výkres 05: Kotel Benekov C25 – pravý- uhlí (formát A1)

Kompaktní disk CD



# PROTOKOL O MĚŘENÍ 2014/13

## Kotel BENEKOV C26

Verze: 2.0.32

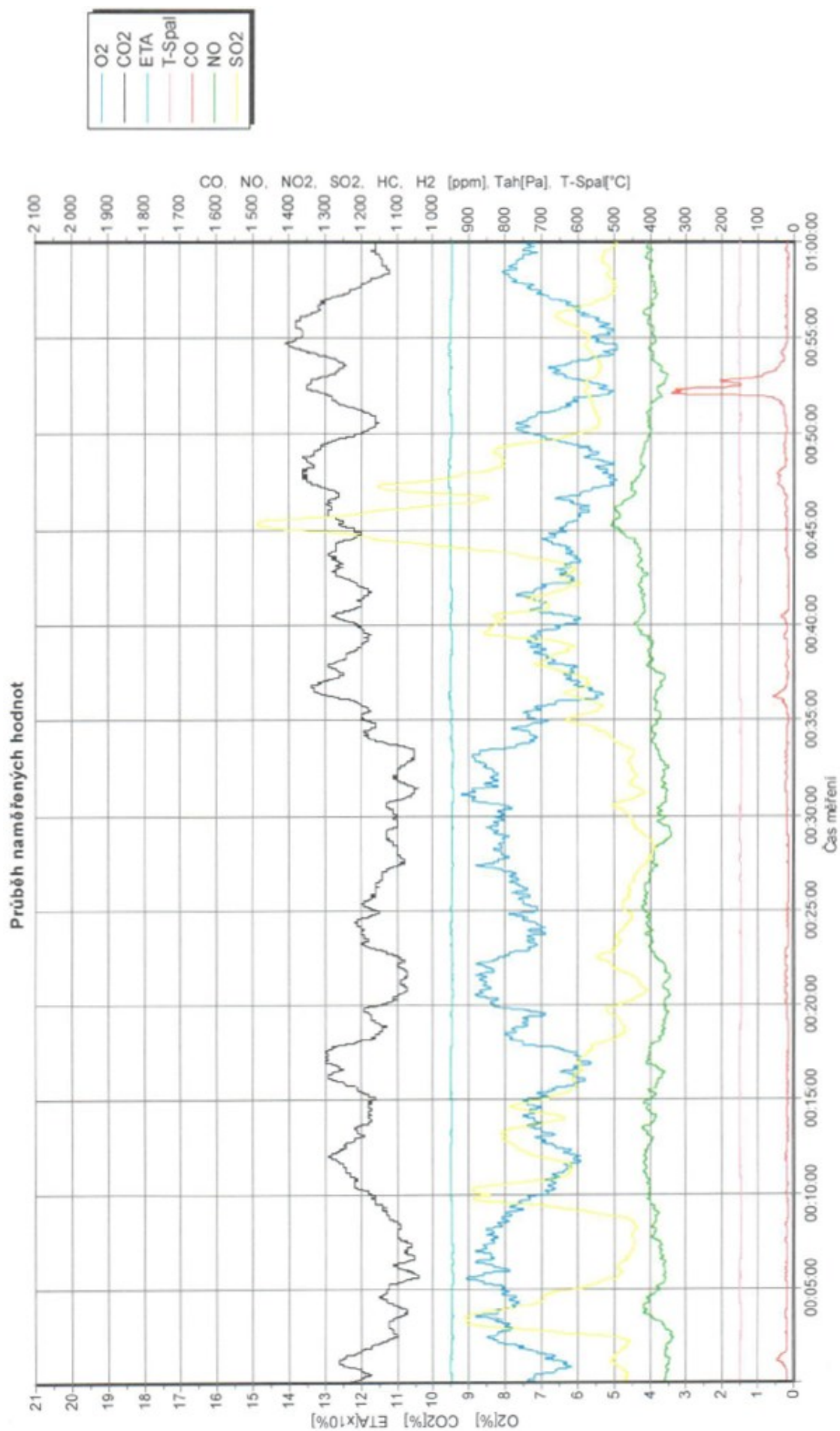
Datum: 3.4.2014 Palivo: hnědý uhlí, Ofrech 2, přesítě - dodavatel RIDERA  
 Teplota okolí: 20,6 °C Výhřevnost: 16500 kJ/kg

Popis kotle: Kotel 111900301, regulátor CLIMATIX2, verze programu 12.7.2013. Línový hořák s retortou a roštěm o průměru 276 mm se zuby 5,5 mm. Ventilátor EBM G1G108. Pohor: plochá převodovka RAVEO (40W, 3.3 oz/min). Kotelové těleso se standardním ekonomizérem v 2. tahu, ve 3. tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kotelového tělesa mezi 1. a 2. tahem je přepážka. První tah kotelového tělesa vyložen keramikou.



Parametr	Průměr	Parametr	Průměr	Parametr	Průměr
Tepl. vody - výstup	77,13 °C	Tah komina	10 Pa	O <sub>2</sub>	7,1 %
Tepl. vody - vstup	57,58 °C	Teplota spalin	149,3 °C	CO <sub>2</sub>	12,0 %
Teplotní spád	19,55 °C	ETA	94,9 %	λ	1,52 [-]
Tepl. chladicí vody	8,45 °C	Spotřeba paliva	5,17 kg/h	CO	24 ppm
Průtok chladicí vody	1119 l/h	Příkon	26,57 kW	NOx	638 ppm
Výkon	24,88 kW	Účinnost přímá	93,6 %	SO <sub>2</sub>	1385 ppm
		Popel	0 kg/h	Prach	3,3 mg
		Nedopal	0 %		

Poznámky: Požadovaná teplota 85°C, Podavač zapnuto 2 sec, Podavač vypnuto 14 sec, Ventilátor: výkon 59%, Škrticí klapka otevřena na 100%.  
 Emise prachu: 50 mg/m<sup>3</sup> při O<sub>2</sub> = 10%.  
 Na podavači namontována protizakurčovací trubka: zásobník zcela bez kouřel





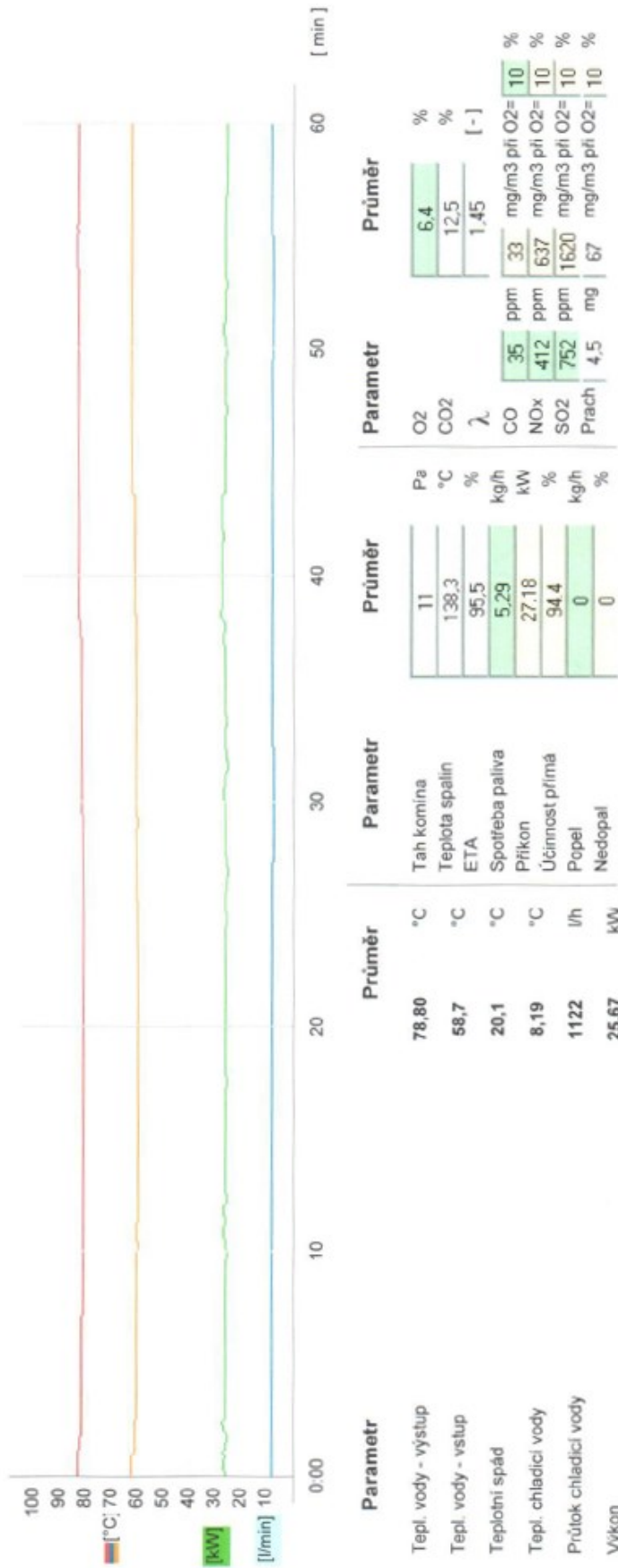


# PROTOKOL O MĚŘENÍ 2014/14

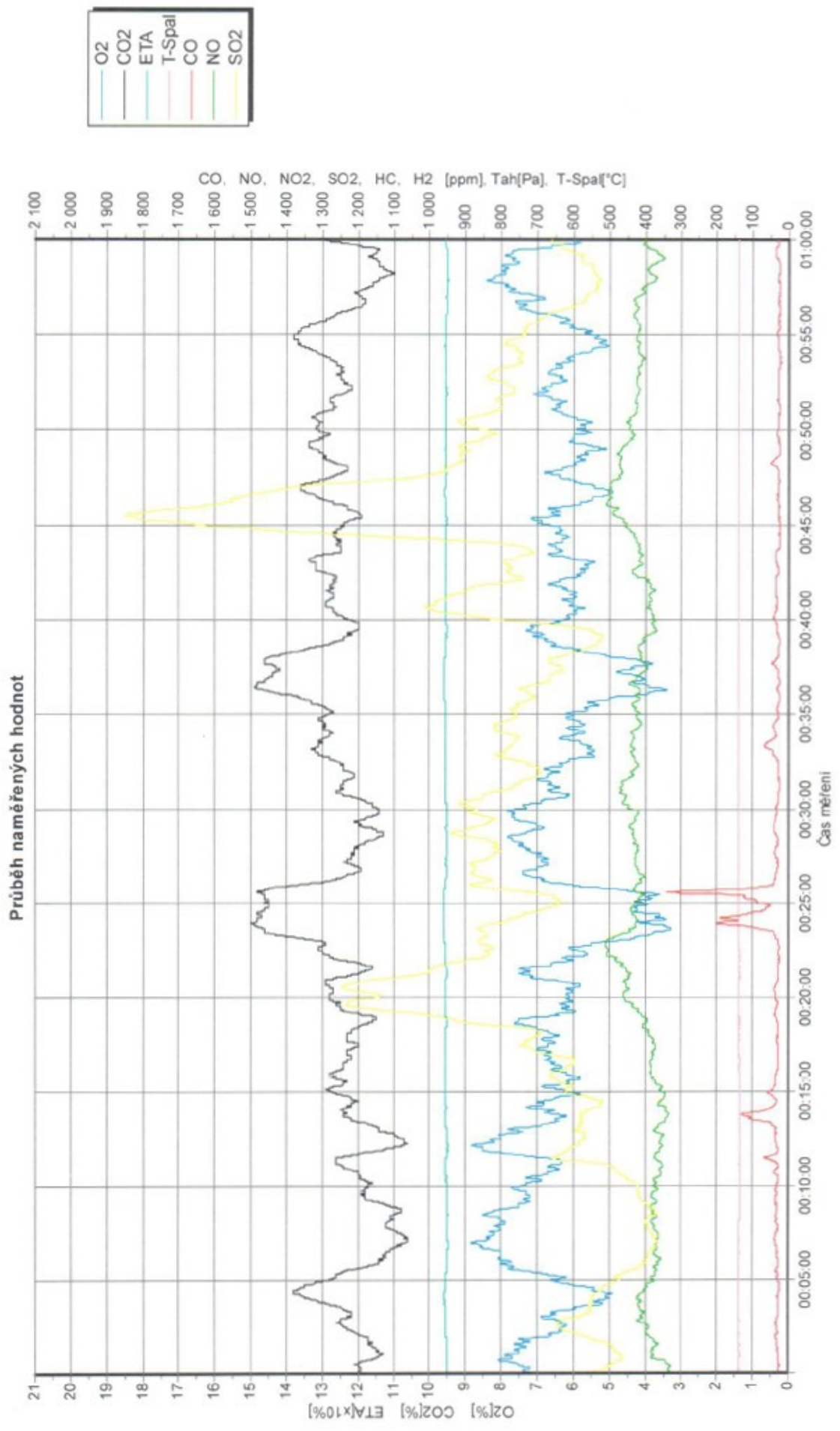
## Kotel BENEKOV C26

Verze: 2.0.32

Datum: 4.4.2014 Palivo: hnědé uhlí, Dřech 2, přelitě - dodavatel RIDERA  
 Teplota okolí: 19,0 °C Vyhřevnost: 16500 kJ/kg  
 Popis kotle: Kotel 111900301, regulátor CLIMATIK2, verze programu 12.7.2013. Láhový hořák s roštěm o průměru 276 mm se zubý 5,5 mm. Ventilátor EBM G1G108. Pohon: plochá převodovka RAVEO (40W, 3,3 ot/min). Kotelové těleso se standardním ekonomizérem v 2. tahu, ve 3. tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kotelového tělesa mezi 1. a 2. tahem je přepážka. První tah kotelového tělesa vyložen keramikou, včetně 2 vodorovných přepážek.



Poznámky: Požadovaná teplota 85°C, Podavač zapnuto 2 sec, Podavač vypnuto 14 sec, Ventilátor: výkon 59%, Škrticí klapka otevřena na 100%.  
 Emise prachu: 67 mg/m<sup>3</sup> při O<sub>2</sub> = 10%.  
 Na podavači namontována protizakufovací trubka: zásobník zcela bez kouřel





# PROTOKOL O MĚŘENÍ 2014/15

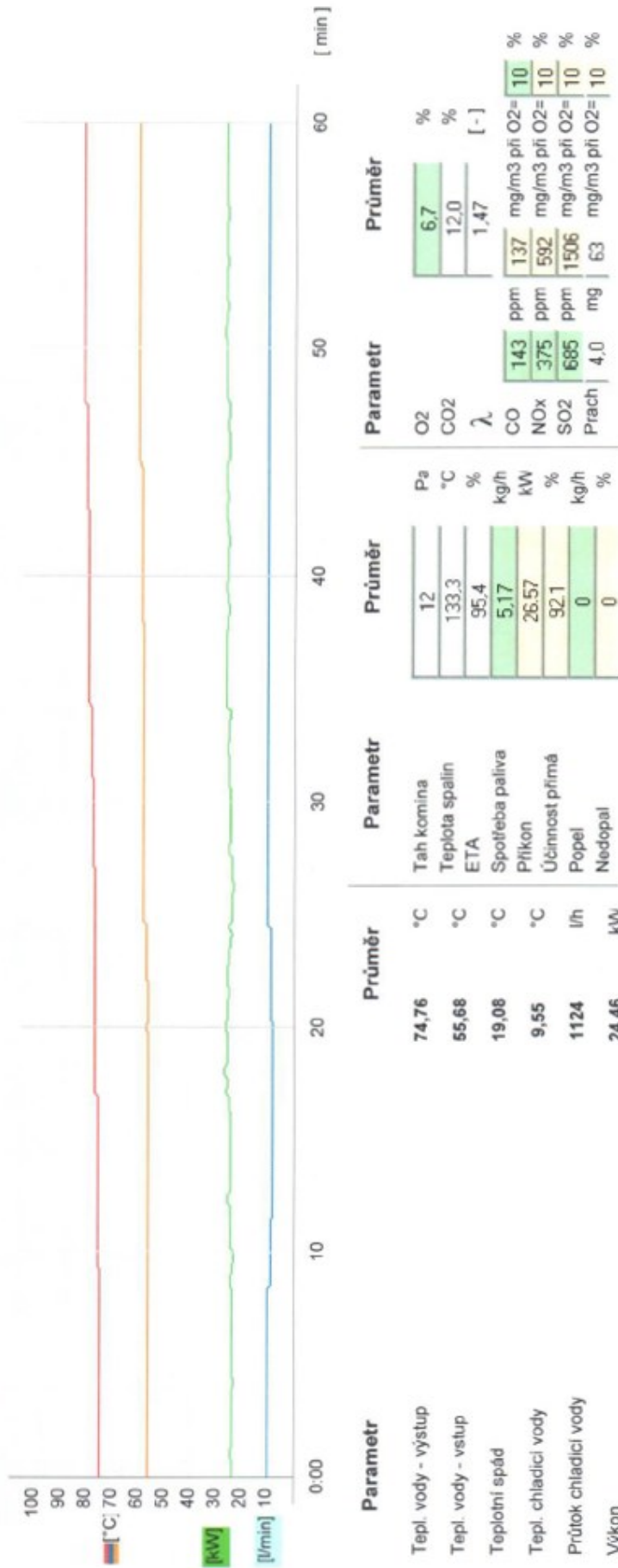
## Kotel BENEKOV C26

Verze: 2.0.32

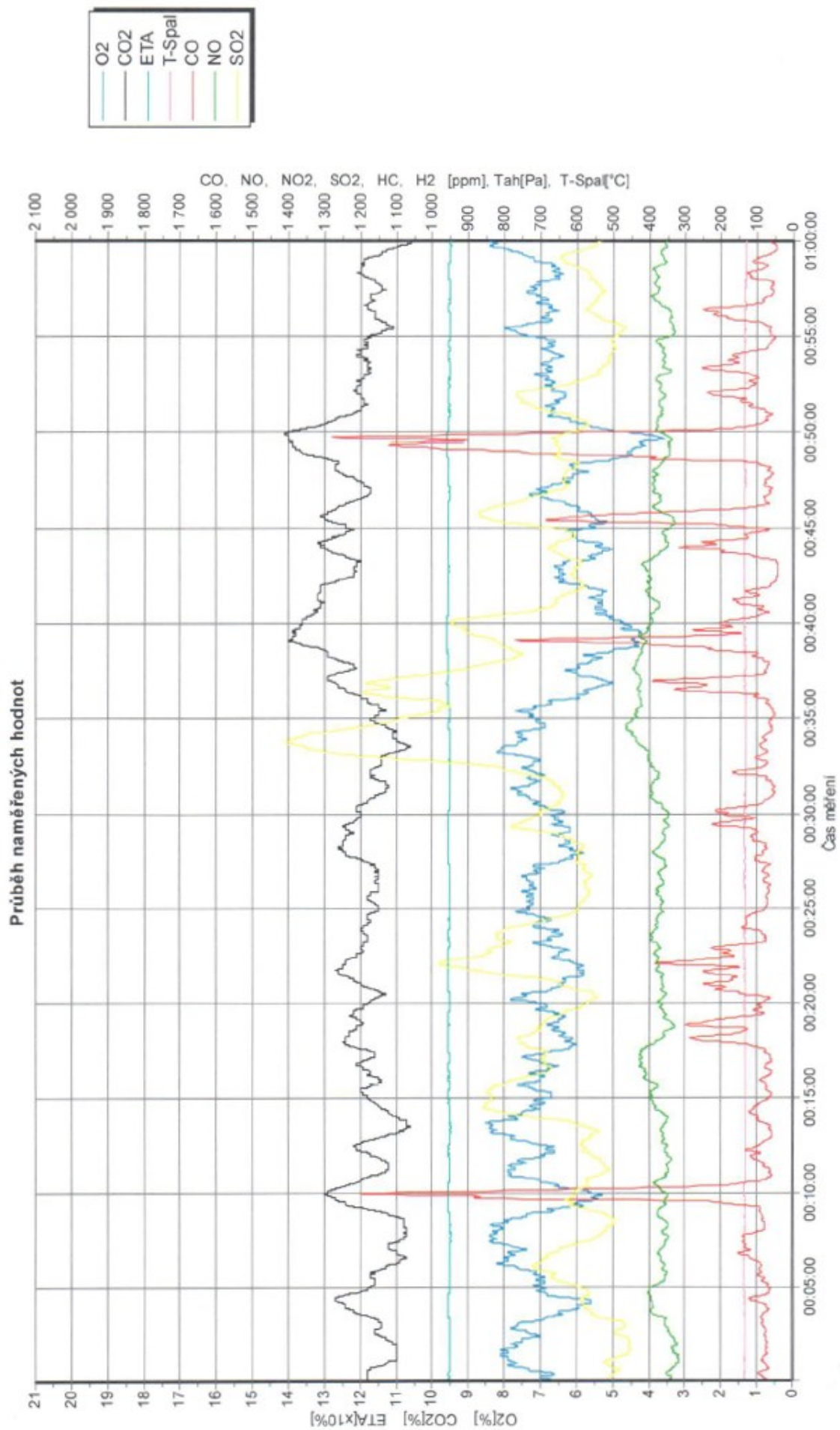
Datum: 11.4.2014 Palivo: hnědý uhlí, Ořech 2, přeseité - dodavatel RIDERA

Teplota okolí: 13,2 °C Výhřevnost: 16500 kJ/kg

Popis kotle: Kotel 111900301, regulátor CLIMATIX2, verze programu 12.7.2013. Láhový hořák s retortou a roštem o průměru 276 mm se zuby 5,5 mm. Ventilátor EBM G1GT08. Pohon: plochá převodovka RAVEO (40W, 3,3 ot/min). Kolové těleso se standardním ekonomizérem v 2. tahu, ve 3. tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kolového tělesa mezi 1. a 2. tahem je přepážka. První tah kolového tělesa vyložen keramikou, 400 mm nad hořákem 10 mm vrstva pěnokeramiky 35 PPI (dodal Bc. Tomáš Habr).



Poznámky: Požadovaná teplota 85°C, Podavač zapnuto 2 sec, Podavač vypnuto 14 sec, Ventilátor: výkon 59%, Škrtilí klapka otevřena na 100%.



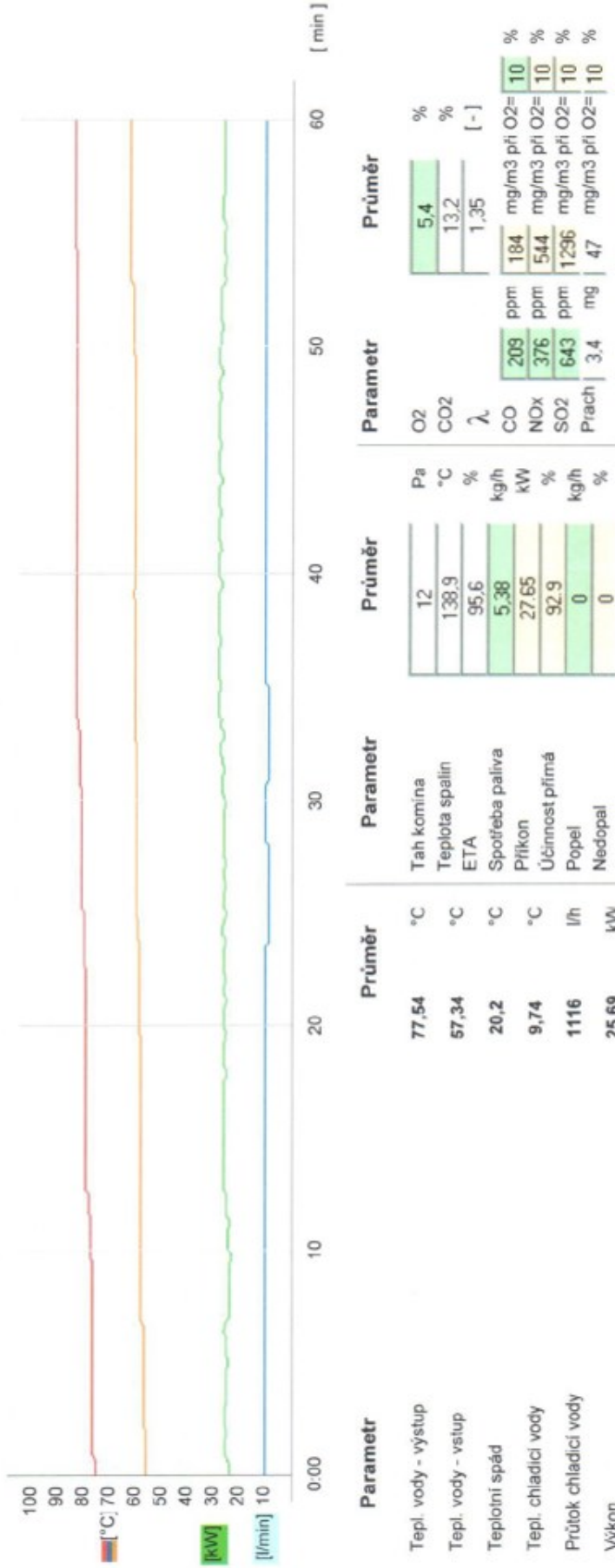


# PROTOKOL O MĚŘENÍ 2014/16

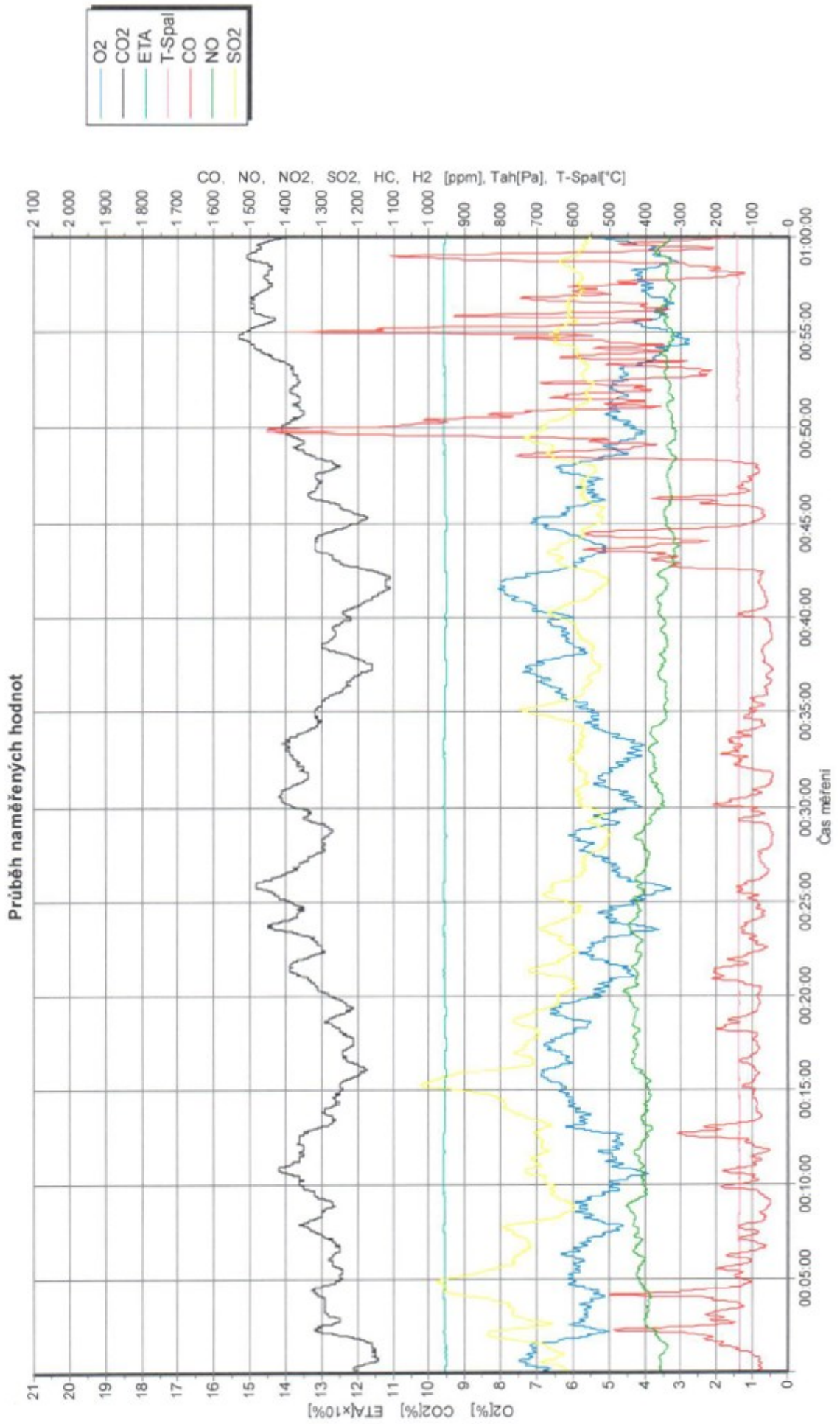
## Kotel BENEKOV C26

Verze: 2.0.32

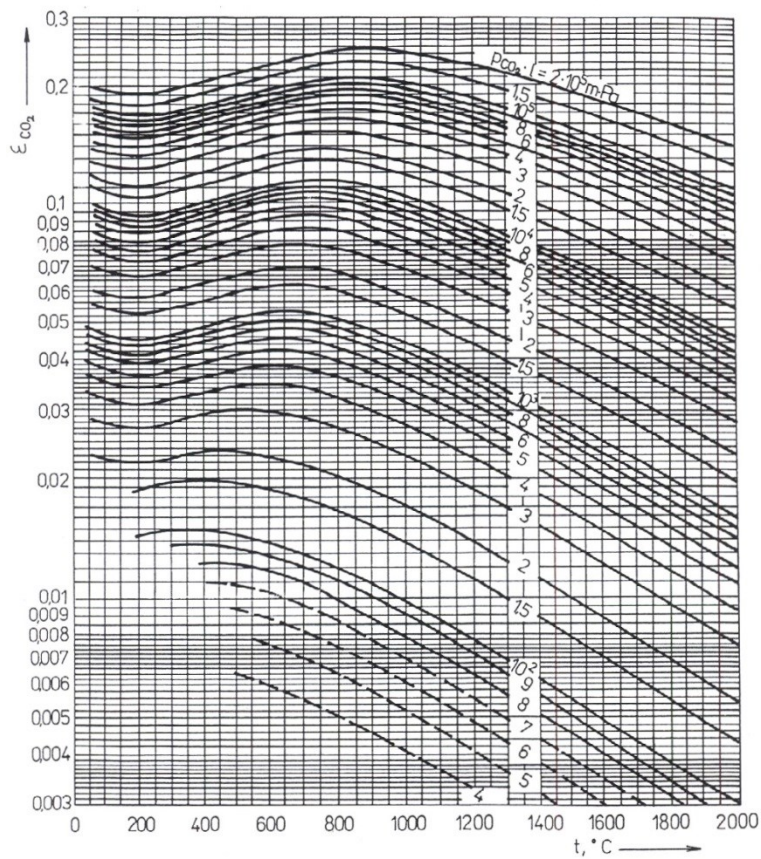
Datum: 11.4.2014 Palivo: Hnědý uhlí, Ořech 2, přestíté - dodavatel: RIDERA  
 Teplota okolí: 17,0 °C Výhřevnost: 16500 kJ/kg  
 Popis kotle: Kotel 111900301, regulátor CLIMATIX2, verze programu 12.7.2013. Láhový hořák, s roštem o průměru 276 mm se zuby 5,5 mm. Ventilátor EBM G1G108. Pohon: plochá převodovka RAVED (40W, 3.3 ot/min). Kotelové těleso se standardním ekonomizérem v 2. tahu, ve 3. tahu dlouhý ekonomizér s 12 lamelami. Na dně kotelového tělesa mezi 1. a 2. tahem je přepážka. První tah kotelového tělesa vyrobeno keramikou, 400 mm nad hořákem 10 mm vrstva pěňokeramiky 45 PFI (dodal Bc. Tomáš Habr).



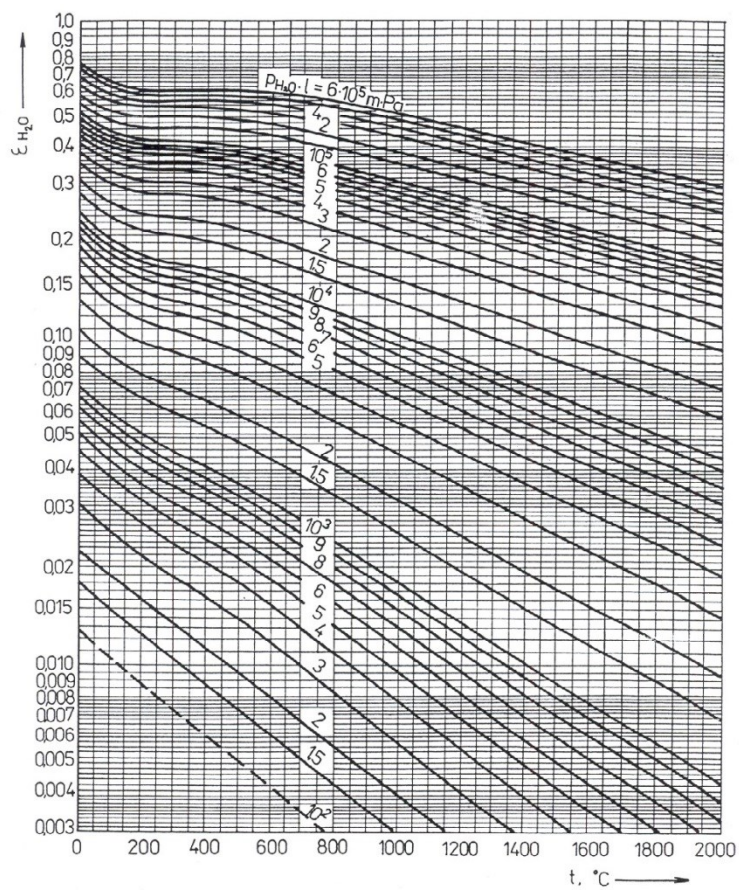
Poznámky: Požadovaná teplota 85°C. Podavač zapnuto 2 sec, Podavač vypnuto 14 sec, Ventilátor výkon 62%. Škrticí klapka otevřena na 100%.



Příloha č. 5



Příloha č. 6



Příloha č. 7

