

# EMISNÍ CHARAKTERISTIKY PŘI SPALOVÁNÍ ODPADNÍCH PRODUKTŮ NA HOŘÁKOVÉM TOPENÍŠTI

## EMISSION CHARACTERISTICS DURING WASTE PRODUCTS COMBUSTION IN THE FURNACE BURNER

David Černý<sup>1</sup>, Jan Malat'ák<sup>1</sup>, Jiří Bradna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta; <sup>2</sup>VÚZT, v. v. i., Praha

### Abstract

The article assesses the thermal emission properties of selected fuels from biomass in the form of pellets and loose materials burned in blast furnaces. Biofuels samples are made from wheat and rape straw and bark. Methodology work is therefore based on the determination of fuel samples elemental composition. There are carried out theoretical calculations of combustion characteristics based on elementary analysis. Thus determined values are used for subsequent measurement by thermal emission gas analyzer GA-60. Thermal emission concentrations are assessed depending on the excess air coefficient and are statistically evaluated by regression analysis.

The resulting values of the elemental and stoichiometric analysis show the different parameters of the individual examined biofuels samples. Large concentrations of nitrogen and sulfur in the fuel itself had samples from rape straw pellets. More than double amount of ash has a fuel sample from the bark. It is not recommended burning crushed bark on selected burner furnace based on the resulting parameters of the thermal-emission measurements, which indicate the overall progress of carbon monoxide and dioxide emissions depending on the inlet combustion air.

**Keywords:** wheat and rape straw, bark, stoichiometric analysis, combustion equipment, emission

### ÚVOD

Otázka spalování rostlinné biomasy a vedlejších produktů na malých spalovacích zařízeních je dost problematická s ohledem na využití současných moderních spalovacích zařízení, které jsou výhradně určené pro spalování dřevní biomasy.

S dohlednou vyčerpatelností fosilních energetických zdrojů roste význam obnovitelných zdrojů energie a stává se tak jednou z hlavních podmínek trvale udržitelného rozvoje nejen zemědělství, ale i celé společnosti. Udává se, že za posledních dvacet let se celosvětový podíl rostlinné biomasy (v převážné většině se jedná o dřevo) na celkové spotřebě primárních energetických zdrojů zvýšil o 8 %. Tento nárůst se projevuje nejen v rozvojových zemích, ve kterých je dříví často jediným zdrojem energie (čtyři pětiny dřeva vytěženého v některých rozvojových zemích se spotřebovávají jako dřevo palivové), ale spotřeba dřeva, resp. paliv na bázi dřeva, vzrůstá i ve vyspělých zemích.

Pro vlastní energetické využití produktů ze zemědělské a lesnické činnosti (ale i jiných materiálů) je nutné, aby spalovací proces probíhal za optimálních podmínek. Bez těchto předpokladů není spalování přínosem. Proto je vždy potřebné spalovat v konkrétním zařízení pouze takové palivo, které je určené druhem, strukturou, jakostí apod. pro dané spalovací zařízení (Friberg, 2002; Johansson, 2004; Yang, 2005).

Má-li se o biomase rozhodnout, zda je vhodná pro spalování v určitém typu spalovacího zařízení, nebo má-li se posoudit jakost biopaliv z fytomasy s ohledem na jejich využití, je zapotřebí znát vlastnosti biopaliv, které je dostatečně charakterizují. Z energetického hlediska je při posuzování zásadní prvková a stechiometrická analýza. Stechiometrické výpočty spalovacích procesů doplňují charakteristiky paliva a jsou základem pro

jakýkoliv tepelný výpočet. Jsou důležité zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako pro kontrolu práce stávajících spalovacích zařízení (Nordin, 1994; Olsson, 2003; Kjällstrand, 2004; Malat'ák, 2010).

Tuhá biopaliva začínají hrát důležitou roli ve společné energetické politice EU. Tuhá biopaliva mohou částečně nahradit např. fosilní paliva, a tím omezit objemy odpadů vznikajících při jejich těžbě a zpracování, a mohou tak přispět ke zvýšení efektivity zdrojů. Použití tuhých biopaliv může být zvláště důležité v řídké zalidněných oblastech pro zajištění tamějších energetických potřeb. Využití tuhých biopaliv slouží také jako prostředek ke splnění cílů směrnice o skládkách odpadů prostřednictvím snížení množství ukládaných biologicky rozložitelných odpadů na skládky (Winter, 1999; Hedberg, 2002; Malat'ák, 2008).

Cílem článku je posoudit na vybraných palivech z rostlinné a dřevní biomasy ve formě peletek tepelně-emisní vlastnosti na hořákovém topeništi. Výchozím bodem měření je určení prvkového složení vzorků paliv. Na základě prvkových rozborů jsou uskutečněny teoretické výpočty spalovacích charakteristik a to za dokonalého spalování a za součinitele přebytku vzduchu, který je zvolen na základě požadavků Vyhlášky č. 13/2009 Sb. Takto určené hodnoty jsou použity pro následné měření tepelně-emisních koncentrací. Tepelně-emisní koncentrace jsou posouzeny v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu a jsou statisticky vyhodnoceny regresní analýzou. Výsledné parametry ukazují na celkový průběh spalování vybraných paliv na hořákovém topeništi v závislosti na přiváděném spalovacím vzduchu.

## MATERIÁL A METODIKA

Praktická část práce zahrnuje stanovení prvkových rozborů jednotlivých použitých vzorků paliv a určení stechiometrických analýz, které jsou základem pro posouzení tepelně-emisních vlastností. Po zhodnocení vzorků paliv následuje tepelně-emisní měření. Metodika práce je proto rozdělena do dvou dílčích metodik:

a) Metodika prvkové a stechiometrické analýzy:

1. Prvková analýza původního vzorku.
2. Stechiometrická analýza původního vzorku za normálních podmínek a referenčního obsahu kyslíku ve spalínách.

b) Metodika tepelně-emisního měření:

1. Analýza výchozích podmínek tepelně-emisního měření:
  - Spalovací zařízení
  - Vzorky paliv
  - Měřicí zařízení
2. Stanovení a analýza koncentrací tepelně-emisního měření spalovacího zařízení:
  - Přepočty koncentrací spalin na normální podmínky a pro referenční obsah kyslíku ve spalínách
  - Vyhodnocení jednotlivých koncentrací spalin
3. Stanovení a vyhodnocení grafické závislosti oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého na součiniteli přebytku vzduchu
4. Regresní analýza – matematické vyjádření jednotlivých složek spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu.

Při využití biomasy jako nosiče energie je důležitá elementární (prvková) analýza, která je základem každého výpočtu tepelné práce spalovacích zařízení. Prvkové složení biomasy má vliv na veškeré stechiometrické výpočty, výpočty tepelných účinností a

ztrát spalovacích zařízení, významně ovlivňuje tepelnou práci spalovacích zařízení. U tuhých a kapalných biopaliv se pro zjištění prvkového složení používá tzv. elementární (prvkové) analýzy, kterou se zjišťuje procentuální hmotnostní podíl uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu. Nehořlavé látky paliv, tj. obsah popele a obsah veškeré vody, se určí spálením, resp. sušením příslušného vzorku. Prvkové rozborů použitých vzorků paliv jsou provedeny v Laboratoři elementární organické analýzy (VŠCHT Praha). Prvky uhlík, vodík a dusík byly stanoveny na analyzátoru CHN Perkin-Elmer 2400. Pro stanovení chloru a síry byly vzorky spáleny v kyslíko-vodíkovém plameni na Wickboldově aparatuře.

Stechiometrické výpočty spalovacích procesů doplňují charakteristiky paliva a jsou základem pro jakýkoliv tepelný výpočet. Jsou důležité zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako pro kontrolu práce stávajících spalovacích zařízení. Při těchto výpočtech se stanoví:

- výhřevnost paliva;
- množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování paliva;
- množství a složení spalin;
- měrná hmotnost spalin (Malařák, 2010).

Měření je uskutečněno na horkovzdušným hořákovým spalovacím zařízením v souladu s ČSN 07 0240 „Teplovodní a nízkotlaké parní kotle – základní ustanovení“, s ČSN 124070 „Zařízení odlučovací – metody měření veličin“, s ČSN 44 1310 „Označování analytických ukazatelů a vzorce přepočtů výsledků rozborů na různé stavy paliva“ a s ČSN 38 5509 (hodnoty molekulové hmotnosti a molárního objemu). Tepelně technické parametry horkovzdušných kamen jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Tepelně technické parametry horkovzdušných kamen

Parametr	Hodnota	
Jmenovitý výkon [kW]	18	
Regulovatelný výkon [kW]	8 - 18	
Spotřeba paliva [kg . h <sup>-1</sup> ]	1,5 – 4,9	
Doba hoření při jmenovitém výkonu a plném zásobníku [h]	12	
Kapacita zásobníku paliva [l]	50	
Průměr kouřovodu [mm]	80	
Hmotnost [kg]	96	
Rozměry kamen: šířka x hloubka x výška [mm]	410 x 820 x 1075	
Teplota spalin	■ při jmenovitém výkonu [°C]	210
	■ při minimálním výkonu [°C]	110
Účinnost při jmenovitém výkonu [%]	88	
Hmotnostní průtok spalin na výstupu	■ při jmenovitém výkonu [kg.s <sup>-1</sup> ]	0,0138
	■ při minimálním výkonu [kg.s <sup>-1</sup> ]	0,010
Jmenovité napětí:	1 PEN 50 Hz 230 V	
Elektrické krytí:	IP20	
<i>Jmenovitý elektrický příkon: odtahový ventilátor 92 W, ventilátor 120 W, podávací motor 19 W, zařízení pro podpal 1500 W = celkový max. 1 731 W</i>		

Energeticky využitelnou biomasu většinou nelze ve spalovacích zařízeních použít přímo, ale je třeba ji upravit do vhodného tvaru a rozměrů. Pro vlastní analýzu je vybrána biomasa ve formě peletky a nadrcená kůra ze smrku. Peletky o průměru 8 mm jsou vyrobeny z pšeničné a řepkové slámy.

Měření emisních koncentrací je provedeno na měřicím zařízení kouřových plynů Madur GA – 60. Přístroj Madur GA-60 je víceúčelový analyzátor kouřových plynů. Jeho princip je založen na využití elektrochemických převodníků. Přístroj GA-60 má standardně pět převodníků s možností zabudovat šestý převodník. Standardní vybavení představuje převodníky na analýzu těchto složek spalin: kyslík (O<sub>2</sub>), oxid uhelnatý (CO), oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>), oxid siřičitý (SO<sub>2</sub>) a chlorovodík (Cl).

Během přímého měření jsou měřeny hodnoty teploty okolí, teploty spalin a chemické složení plynů v rozsahu O<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>. Signál převodníků je úměrný objemové koncentraci měřené složky v ppm.

Převodník pro stanovení kyslíku vykazuje na jednotlivých komponentách měřených plynů jen zanedbatelnou závislost. Podobně se chovají převodníky pro stanovení CO a NO, které mají zabudovány vnitřní filtry absorbující rušivé složky. Další převodníky reagují na koncentrace ostatních složek.

Přístroj GA-60 přebírá signály ze všech převodníků a s využitím charakteristik převodníků, nastavených kalibračními plyny, pak průběžně vypočítává koncentrace jednotlivých složek. Zároveň průběžně kompenzuje neselektivitu převodníků řešením soustavy čtyř rovnic o čtyřech neznámých.

Výsledné tepelně-emisní koncentrace spalin v ppm z analyzátoru Madur GA-60 jsou převedeny na normální podmínky a přepočteny jednak na mg.m<sup>-3</sup> a na referenční množství kyslíku ve spalinách O<sub>r</sub> = 11 %, které je pro použité zařízení podle dané vyhlášky a směrnice.

## VÝSLEDKY

Výsledné parametry prvkového rozboru vzorků paliv z rostlinné biomasy a kůry jsou uvedeny v tabulce 2.

V tabulce 3 je uskutečněna stechiometrická analýza původního vzorku za normálních podmínek a referenčního obsahu kyslíku ve spalinách. Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin jsou udávány za tzv. normálních podmínek, tj. při teplotě t = 0°C a tlaku p = 101,325 kPa a na referenční obsah kyslíku ve spalinách O<sub>r</sub> = 11 %.

Tab. 2: Analýza vzorků dřevní, rostlinné biomasy a odpadních tuhých látek

Číslo vzorku	Vzorek	Obsah vody (% hm.)	Popel (% hm.)	Hořlavina prchavá (% hm.)	Hořlavina neprchavá (% hm.)	Spalné teplo (MJ.kg <sup>-1</sup> )	Výhřevnost (MJ.kg <sup>-1</sup> )	Uhlík C (% hm.)	Vodík H (% hm.)	Dusík N (% hm.)	Síra S (% hm.)	Kyslík O (% hm.)	Chlór Cl (% hm.)
Značka	W	A	V	NV	Q <sub>s</sub>	Q <sub>i</sub>	C	H	N	S	O	Cl	
1	Pšeničná sláma – pelety (Ø 8 mm)	5,28	6,90	70,40	17,42	17,12	15,99	43,38	4,58	0,63	0,09	39,14	0,18
2	Řepková sláma – pelety (Ø 8 mm)	5,45	4,83	72,28	17,44	17,36	16,15	43,70	4,90	0,72	0,23	40,17	-
3	Kůra	8,5	13,33	62,8	25,4	16,48	15,62	38,7	2,98	0,13	0,04	36,28	-

Při spalovacích zkouškách vzorků pelet byly sledovány především emisní koncentrace oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Tyto emisní koncentrace byly během laboratorního měření řízeny především množstvím přiváděného spalovacího vzduchu do spalovací komory. Během měření byl regulován spalovací vzduch z minimální na maximální koncentraci. Souhrnné výsledné závislosti jsou uvedeny na obrázku 1 – 6. Množství přiváděného spalovacího vzduchu je reprezentován na obrázku součinitelem přebytku vzduchu.

Při spalování pelet z pšeničné slámy podněcuje vzrůstající množství spalovacího vzduchu k nárůstu koncentrací oxidu uhelnatého podle rovnice:

$$CO = 36,259n^{1,4445} \quad (\text{mg.m}^{-3}) \quad (1)$$

a na druhé straně ke zmenšení koncentrace oxidu uhličitého podle rovnice:

$$CO_2 = 22,21n^{-0,9998} \quad (\%) \quad (2)$$

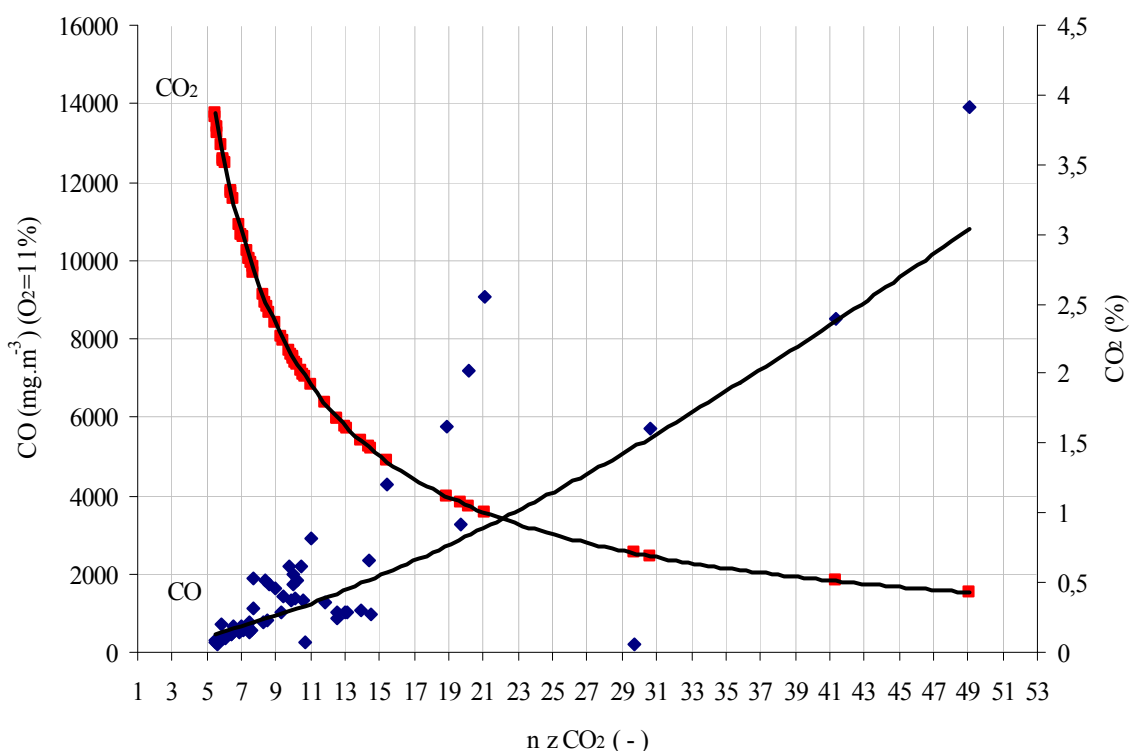
Tyto koncentrace v rámci pokusů byly stanoveny nad třiceti násobek součinitele přebytku vzduchu. Nad větším součinitelem přebytku vzduchu, jak je vidět na obrázku č. 1, dochází k utlumení spalovacího pochodu a snížení spalovací teploty na hranici 110°C. Toto ochlazení spalin lze definovat rovnicí:

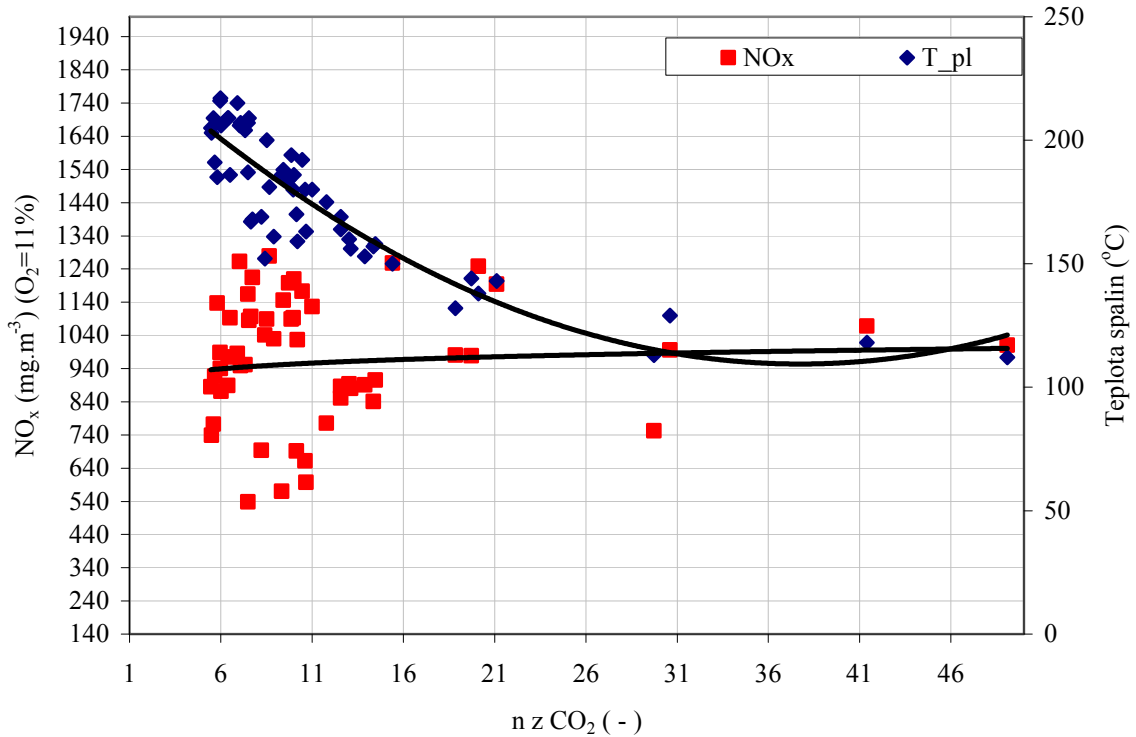
$$T_{sp} = 0,0906n^2 - 6,8388n + 238,42 \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

Vliv koncentrací oxidů dusíku na množství spalovacího vzduchu se při měření nepotvrdil (viz. obr. 2).

Tab. 3 Stechiometrická analýza původních vzorků paliv za normálních podmínek a referenčního obsahu kyslíku ve spalínách  $O_r = 11\%$ 

Palivo		Pšeničná sláma – pelety (Ø 8 mm)	Řepková sláma – pelety (Ø 8 mm)	Kůra
<b>Objemové spalování</b>				
$O_{min}$	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	0,79	0,81	0,63
$L_{min}$	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	3,76	3,84	3,02
$L_{skut}$	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	7,90	8,07	6,34
$n$	Součinitel přebytku vzduchu (-)	2,10	2,10	2,10
$v_{sp}^v$	Objemové množství vlhkých spalín ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	8,81	9,02	7,12
$v_{sp}^s$	Objemové množství suchých spalín ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	7,92	8,08	6,43
$v_{spmin}^s$	Teoretické objemové množství suchých spalín ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	3,75	3,82	3,08
$v_{CO_2}$	Objemové množství $CO_2$ ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	0,81	0,81	0,72
$v_{SO_2}$	Objemové množství $SO_2$ ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	0,00	0,00	0,00
$v_{H_2O}$	Objemové množství $H_2O$ ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	0,89	0,94	0,69
$v_{N_2}$	Objemové množství $N_2$ ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	6,17	6,31	4,95
$v_{O_2}$	Objemové množství $O_2$ ( $m^3_{N.kg^{-1}}$ )	0,87	0,89	0,70
Vyjádření jednotlivých složek spalín v % obj.				
$CO_{2max}$	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách (% obj.)	21,48	21,22	23,35
$CO_2$	Oxid uhličitý (% obj.)	0,02	9,01	10,12
$SO_2$	Oxid siřičitý (% obj.)	9,16	0,02	0,00
$H_2O$	Voda (% obj.)	0,01	10,37	9,70
$N_2$	Dusík (% obj.)	70,04	69,93	69,55
$O_2$	Kyslík (% obj.)	10,11	9,85	9,80


 Obr. 1: Emisní koncentrace  $CO$  a  $CO_2$  v závislosti na součiniteli přebytku vzduch při spalování pelet z pšeničné slámy



Obr. 2: Emisní koncentrace  $\text{NO}_x$  a teplota spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduch při spalování pelet z pšeničné slámy

Výsledné emisní koncentrace při spalování pelet z řepkové slámy za vzrůstajícího množství spalovacího vzduchu vede k nárůstu koncentrací oxidu uhelnatého podle rovnice:

$$\text{CO} = 52,091n^2 - 513,51n + 2098,3 \quad (\text{mg.m}^{-3}) \quad (4)$$

a na druhé straně ke zmenšení koncentrace oxidu uhličitého podle rovnice:

$$\text{CO}_2 = 20,29n^{-0,9998} \quad (\%) \quad (5)$$

Tyto koncentrace v rámci pokusů byly stanoveny nad dvanácti násobek součinitele přebytku vzduchu. Nad větším součinitelem přebytku vzduchu, jak je vidět na obrázku 3, dochází k utlumení spalovacího pochodu a snížení spalovací teploty pod hranici  $200^\circ\text{C}$ . Toto ochlazení spalin lze definovat rovnicí:

$$T_{\text{sp}} = -0,7912n^2 + 12,234n + 192,59 \quad (^\circ\text{C}) \quad (6)$$

Na rozdíl od předchozího měření, teplota spalin byla mnohem vyšší (průměrně  $t_{\text{sp}}=238^\circ\text{C}$ ) než u pelet z pšeničné slámy (průměrně  $t_{\text{sp}}=176^\circ\text{C}$ ), proto docházelo k nárůstu emisí oxidů dusíku v závislosti na množství přiváděného spalovacího vzduchu (viz. obr. 4). Za těchto spalovacích teplot vzdušný dusík reagoval s kyslíkem za vzniku oxidů dusíku. Vliv koncentrací oxidů dusíku na součiniteli přebytku vzduchu je popsán rovnicí:

$$\text{NO}_x = 567,94n^{0,6038} \quad (\text{mg.m}^{-3}) \quad (7)$$

Při spalovacích zkouškách kůry docházelo v oblastech velmi nízkého součinitele přebytku vzduchu k velmi vysokým emisním koncentracím oxidu

uhelnatého, který v průběhu zvyšování součinitele přebytku vzduchu roste podle rovnice:

$$\text{CO} = 36,259n^{1,4445} \quad (\text{mg.m}^{-3}) \quad (8)$$

Tato koncentrace oxidu uhelnatého roste do součinitele přebytku vzduchu 17, po překročení této hranice dochází k útlumu spalovacího procesu a opětovnému nárůstu koncentrace oxidu uhelnatého.

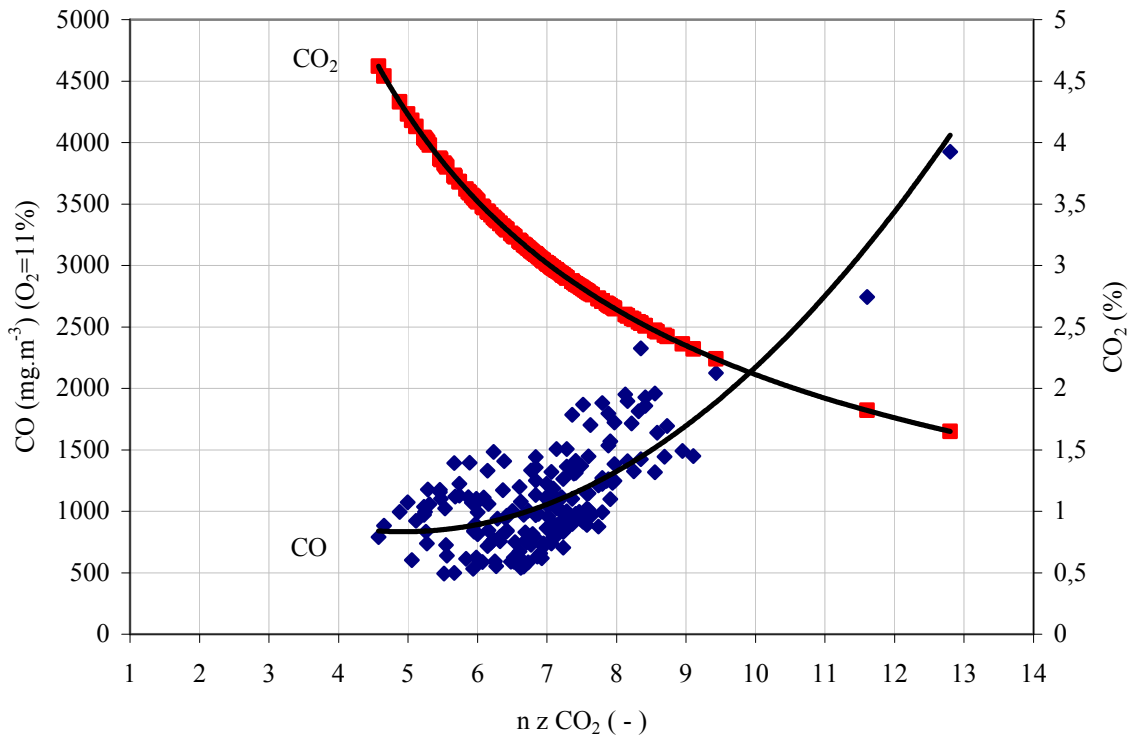
Oxid uhličitý má klesající průběh v závislosti na množství přiváděného spalovacího vzduchu. Tyto emisní koncentrace se pohybují při dosaženém nízkém součiniteli přebytku vzduchu okolo 7 je hodnota CO cca  $6000 \text{ mg.m}^{-3}$  a koncentrace  $\text{CO}_2$  se pohybuje na 3,5 % což významně převyšuje emisní limity.

S rostoucím součinitelem přebytku vzduchu, jak je vidět na obrázku 5 a 6, dochází k utlumení spalovacího pochodu a snížení spalovací teploty na hranici  $150^\circ\text{C}$ . Toto ochlazení spalin lze definovat rovnicí:

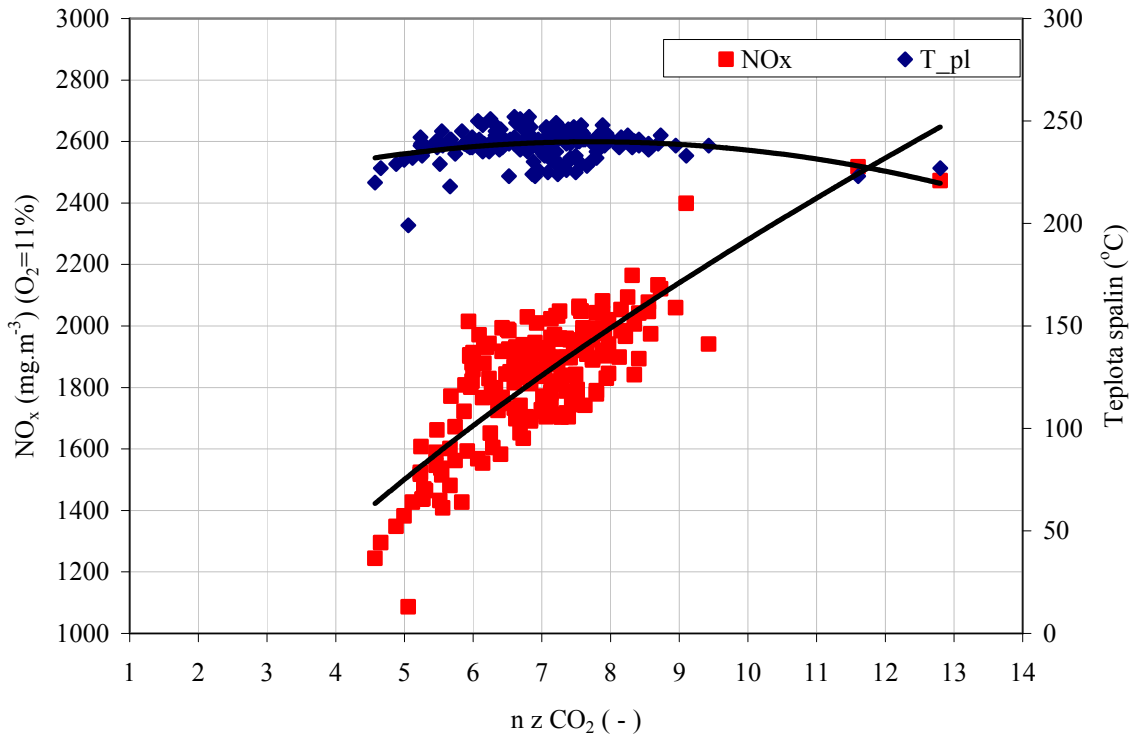
$$T_{\text{sp}} = -0,0909n^2 + 2,1036n + 217,29 \quad (^\circ\text{C}) \quad (9)$$

Významný průběh dosahovaly emisní koncentrace oxidů dusíků. Průměrná teplota odcházejících spalin se pohybovala okolo  $200^\circ\text{C}$ . Takto vysoká teplota nezpůsobovala, jak je vidět z grafu přímý vliv na koncentrace oxidů uhlíků, ale za působení vzdušného kyslíku docházelo k nárůstu těchto koncentrací podle rovnice:

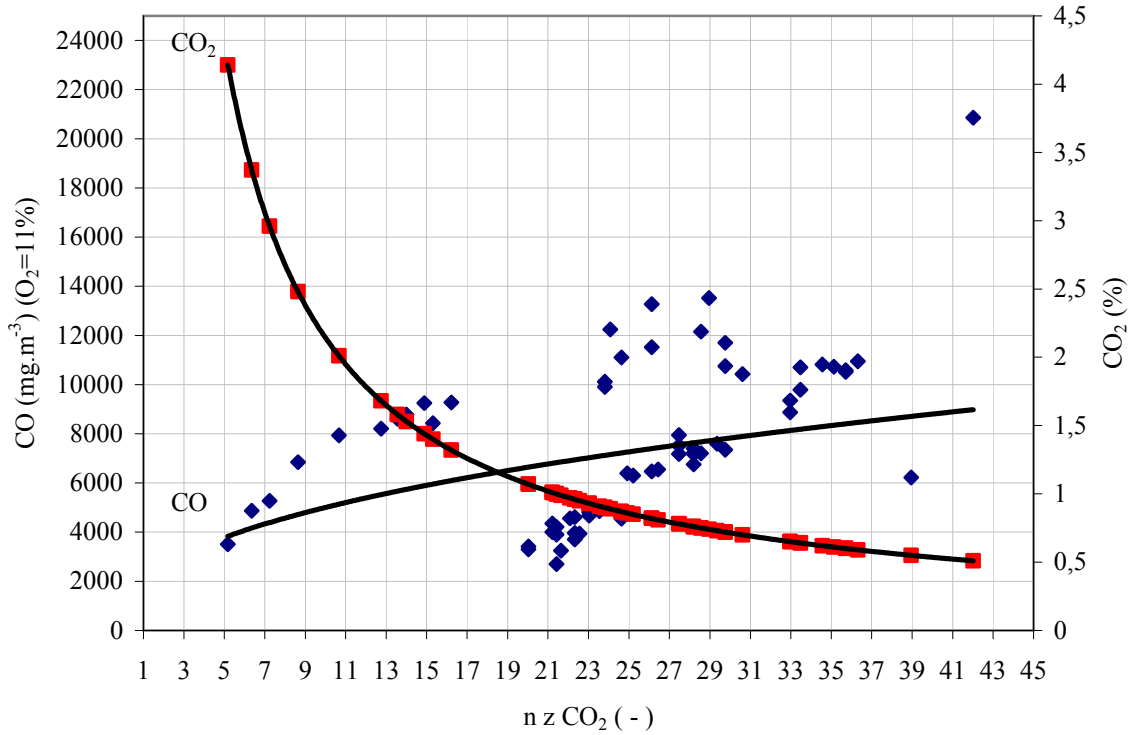
$$\text{NO}_x = 899,51n^{0,1362} \quad (\text{mg.m}^{-3}) \quad (10)$$



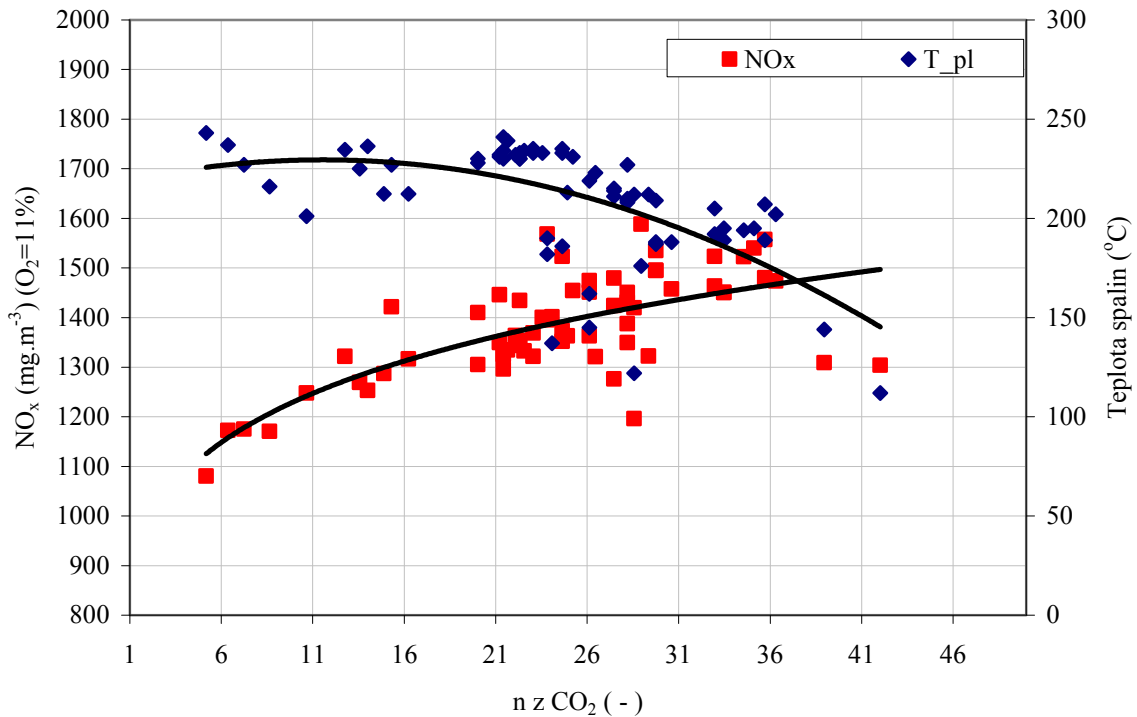
Obr. 3: Emisní koncentrace  $\text{CO}$  a  $\text{CO}_2$  v závislosti na součiniteli přebytku vzduch při spalování pelet z řepkové slámy



Obr. 4: Emisní koncentrace  $\text{NO}_x$  a teplota spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu při spalování pelet z řepkové slámy



Obr. 5: Emisní koncentrace CO a CO<sub>2</sub> v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu při spalování kůry



Obr. 6: Emisní koncentrace NO<sub>x</sub> a teplota spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu při spalování kůry

## ZÁVĚRY A DISKUSE

Výsledky uskutečněných analýz ukazují na fakt, že vzorky paliv mají vlastnosti, které ovlivňují jejich energetické využití. Jedno z hledisek jsou koncentrace síry, chlóru a dusíku v posuzovaných vzorcích. Především množství dusíku u rostlinné biomasy je velmi důležitý faktor, neboť samotné energetické rostliny vykazují vyšší množství dusíku v palivu (Specifikace vlastností biopaliv podle normy ČSN 14961; Směrnice č. 55 – 2008) oproti fosilním palivům. Zejména zvýšený obsah tohoto prvku omezuje využití těchto paliv přímo ve spalovacích zařízeních. V posuzovaných biopalivech dosahovaly velkých koncentrací dusíku vzorky pelet řepkové slámy.

Síra odchází rovněž z větší části během spalování do plynné fáze jako  $\text{SO}_2$  nebo  $\text{SO}_3$ . Emise síry u tepelných zařízení na využití tuhých paliv z obnovitelných zdrojů nepředstavují zpravidla žádný problém co se týče limitních hodnot, což potvrzují vybrané vzorky. Výjimkou jsou pelety z řepkové slámy, které v daném stavu vzorku dosahovaly koncentrace síry 0,23 % hm. Takto zvýšená koncentrace síry ve vzorku může být způsobena znečištěním dané lokality emisemi oxidů síry. Rozhodujícím faktorem koncentrace síry v biopalivu může být její korozivní chování na spalovací zařízení. Ostatní hodnoty prvkového rozboru splňují optimální parametry pro použití těchto vzorků biopaliv ve spalovacích zařízeních.

Minimální výhřevnost tuhých paliv, určených ke spalování v malých stacionárních zařízeních podle Vyhlášky č. 13/2009 Sb., o stanovení požadavků na kvalitu paliv pro stacionární zdroje z hlediska ochrany ovzduší, nesmí být v bezvodém stavu nižší než  $12 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . Minimální výhřevnost tuhých paliv, určených ke spalování ve středních stacionárních zařízeních, nesmí být v bezvodém stavu nižší než  $10 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . Tyto podmínky jsou u všech posuzovaných vzorcích splněny.

Obsah veškeré vody obsažené ve vzorcích je dost nízký, což má pozitivní přínos ve výhřevnosti paliv. Vlhkost ovlivňuje chování při spalování a objem spalin produkovaných na jednotku energie. Obecně platí, že obsah vlhkosti dřevní štěrky nemá přesáhnout 30 % hm. U slámy je přijatelný obsah vlhkosti do 20 % hm., proto u topeniště menšího tepelného výkonu by mělo být palivo sušší.

Obsah popele v původních vzorcích peletovaných paliv oproti dřevní hmotě není nízký, jak je vidět z prvkových rozborů ve vybraných biopalivech. Více než dvojnásobné množství popele mají vzorky paliv z kůry. Takto velké množství popele významně ovlivňuje tepelné vlastnosti posuzovaných tuhých paliv a následně ovlivňuje jak výběr, tak i nastavení spalovacího zařízení.

Výsledné hodnoty ze stechiometrické analýzy ukazují na rozdílné tepelně-emisní parametry posuzovaných vzorků paliv. Jak vyplývá ze stechiometrie posuzovaných paliv, parametry výhřevnosti, obsahu vody a hustoty energie ovlivňují výběr a návrh spalovacího zařízení. Koncentrace N (dusíku), S (síry) a Cl (chlóru) v posuzovaných

vzorcích, jak potvrzují prováděné rozborů vzorků, je poměrně velmi široká.

Výsledné emisní koncentrace při spalování pelet z pšeničné slámy v oblastech velmi nízkého součinitele přebytku vzduchu ukazují na velmi nízké emisní koncentrace oxidu uhelnatého a naproti tomu na relativně velké koncentrace oxidu uhličitého, který je produktem dokonalého hoření. Tyto emisní koncentrace se pohybují při dosaženém nízkém součiniteli přebytku vzduchu (okolo 5,2), do  $1000 \text{ mg.m}^{-3} \text{ CO}$  a 3,8 %  $\text{CO}_2$ .

Takto stanovené výsledné koncentrace ukazují na optimální hranici součinitele přebytku vzduchu pro pelety z pšeničné slámy a spalovacího zařízení s hořákovým topeništěm. Optimální hranice pro spalování se pohybuje v rozmezí 4 – 9 součinitele přebytku vzduchu. Při překročení této hranice dochází k neúměrnému nárůstu koncentrace hořlavých složek ( $\text{CO}$  nad  $2000 \text{ mg.m}^{-3}$ ) a k následnému ochlazení plamene přiváděným spalovacím vzduchem.

Řepková sláma na rozdíl od pšeničné slámy má lepší stechiometrické vlastnosti, což se projevilo v samotném průběhu spalovacích zkoušek. V oblastech velmi nízkého součinitele přebytku vzduchu dochází k velmi nízkým emisním koncentracím oxidu uhelnatého a naproti tomu k relativně velkým koncentracím oxidu uhličitého, který je produktem dokonalého hoření. Tyto emisní koncentrace se pohybují při dosaženém nízkém součiniteli přebytku vzduchu (okolo 5), do  $1000 \text{ mg.m}^{-3} \text{ CO}$  a 4,5 %  $\text{CO}_2$ , což se příznivě projevilo v samotném procesu spalování.

Takto stanovené emisní koncentrace ukazují na optimální hranici součinitele přebytku vzduchu pro pelety z řepkové slámy na spalovacím zařízení s hořákovým topeništěm. Optimální hranice pro spalování se pohybuje v rozmezí 4 – 6 součinitele přebytku vzduchu. Při překročení této hranice dochází k neúměrnému nárůstu koncentrace hořlavých složek ( $\text{CO}$  nad  $2000 \text{ mg.m}^{-3}$ ) a k následnému ochlazení plamene přiváděným spalovacím vzduchem.

Kůra ve formě jemně nadrcené sypké hmoty je spalována v hořákovém topeništi, kde jsou sledovány především emisní koncentrace oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého jako u předchozích měření. V oblastech velmi nízkého součinitele přebytku vzduchu dochází k velmi vysokým emisním koncentracím oxidu uhelnatého, které v průběhu zvyšování součinitele přebytku vzduchu neustále rostou.

Naměřené jednotlivé emisní koncentrace ukazují na překročení emisních limitů oxidu uhlíku ve všech naměřených oblastech součinitele přebytku vzduchu. Vzhledem k tomu, že na hořákovém spalovacím zařízení není možnost nastavit menší množství spalovacího vzduchu, nelze doporučit spalování nadrcené kůry na tomto hořákovém topeništi.

Tento článek řeší naléhavé otázky energetického využívání paliv na bázi biomasy v moderních spalovacích zařízeních. Vědecké práce autorů Johanssona (2004) a Olssona (2003) ukazují na velmi dobré emisní vlastnosti při spalování biomasy v moderních spalovacích zařízeních. Má-li se však rozhodnout o biomase, zda je vhodná pro spálení v určitém typu spalovacího zařízení, nebo má-li se



posoudit jakost biopaliv, je zapotřebí znát ty jejich vlastnosti, které je dostatečně charakterizují. Z energetického hlediska je zásadní prvková a stechiometrická analýza. Stechiometrické výpočty spalovacích procesů doplňují charakteristiky paliva a jsou základem pro jakýkoliv tepelný výpočet. Jsou důležité zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako při kontrole práce stávajících spalovacích zařízení. Těmto aspektům je nutné věnovat trvalou pozornost. (Malatřák, 2010).

Z toho vyplývají i požadavky na kvalitu paliv z biomasy. Vysoká kvalita peletky z biomasy je požadovaná především pro spalování v malých spalovacích zařízeních. Pro větší spalovací zařízení, která jsou vybavena čištěním plynu a procesem řízení spalování, není rozhodující kvalita paliva. Významné je proto rozdělit dva typy peletkových paliv, a to pro průmyslová a nebo pro malá domácí spalovací zařízení (Oberbergera, 2004).

Kvalita paliva je rozhodující, na což ukazují i výsledky autora Olssona (2004), který na jednom spalovacím zařízení odzkoušel smrkové peletky od několika výrobců. Z ekologického hlediska je lepší používat peletky vyrobené z dřevní hmoty pro domácnosti a peletky z rostlinné biomasy lze používat bez obtíží pro větší spalovací zařízení.

## PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl v rámci řešení interního grantu IGA TF na České zemědělské univerzitě v Praze č. 31170/1312/3114.

## LITERATURA

- FRIBERG, R.; BLASIAK, W.: Measurements of mass flux and stoichiometry of conversion gas from three different wood fuels as function of volume flux of primary air in packed bed combustion. *Biomass and Bioenergy* 23 (2002) Published by Elsevier Ltd., pp. 189 – 208, ISSN: 0961-9534
- HEDBERG, E.; et al.: Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove. In: *Atmospheric Environment* 36 (2002), Published by Elsevier Ltd., pp. 4823–4837, ISSN: 1352-2310
- JOHANSSON, L.S., et al.: Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. In: *Atmospheric Environment* 38 (2004) Published by Elsevier Ltd., pp. 4183–4195, ISSN: 1352-2310
- KJALLSTRAND, J.; OLSSON, M.: Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances. In: *Biomass and Bioenergy* 27 (2004) Published by Elsevier Ltd., pp. 557–561, ISSN: 0961-9534
- MALATŘÁK, J.; JEVIČ, P.; VACULÍK, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3
- MALATŘÁK, J.; VACULÍK, P.: Zpracování biologicky rozložitelných odpadů. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 168 s., ISBN: 978-80-213-1747-5
- NORDIN, A.: Chemical elemental characteristics of biomass fuels. In: *Biomass Bioenergy* 6 (1994), Published by Elsevier Ltd., pp. 339–347, ISSN: 0961-9534
- OBERBERGERA, I.; THEKA, G.: Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. In: *Biomass and Bioenergy* 27 (2004) Published by Elsevier Ltd., pp. 653–669, ISSN: 0961-9534
- OLSSON, M.; et al.: Specific chimney emissions and biofuel characteristics of softwood pellets for residential heating in Sweden. In: *Biomass and Bioenergy* 24 (2003) Published by Elsevier Ltd., pp. 51 – 57, ISSN: 0961-9534
- OLSSON, M.; KJALLSTRAND, J.: Emissions from burning of softwood pellets. *Biomass-and-Bioenergy*. 2004; 27(6), Oxford, UK: Published by Elsevier Ltd., pp. 607-611 ISSN: 0961-9534
- Směrnice č. 55 – 2008 s požadavky pro propůjčení ochranné známky – Topné pelety z bylinné fytoomasy
- Technická norma ČSN 07 0240 (070240). Teplovodní a nízkotlaké parní kotle. Základní ustanovení. ČNI, 1993, 64 s.
- Technická norma ČSN 12 4070 (124070). Zařízení odlučovací. Metody měření veličin. ČNI, 1990, 28 s.
- Technická norma ČSN 38 5509 (385509). Plyná paliva. Fyzikální konstanty. ČNI, 1991, 32 s.
- Technická norma ČSN 44 1310 (441310). Tuhá paliva - Označování analytických ukazatelů a vzorce přepočtů výsledků na různé stavy paliva. ČNI, 2001, 16 s.
- Technická norma ČSN EN 14961-1 (838202). Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky. ČNI, 2009, 60 s.
- Vyhláška č. 13/2009 Sb., o stanovení požadavků na kvalitu paliv pro stacionární zdroje z hlediska ochrany ovzduší
- WINTER, F.; WARTHA, C.; HOFBAUER, H.: NO and N<sub>2</sub>O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat. In: *Bioresource Technology* 70 (1999) Published by Elsevier Ltd., pp. 39 – 49, ISSN: 0960-8524
- YANG, Y.B., et al.: Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach—identification of the controlling factors, *Fuel* 84 (2005), Published by Elsevier Ltd., pp. 2116–2130, ISSN: 0016-2361

**Abstrakt:**

Článek posuzuje tepelně-emisní vlastnosti vybraných paliv z biomasy ve formě peletek a sypké látky spalované na hořákovém topeništi. Vzorčky biopaliv jsou vyrobené z pšeničné a řepkové slámy a z kůry. Metodika práce je proto založena na určení prvkového složení vzorků paliv. Na základě prvkových rozborů jsou uskutečněny teoretické výpočty spalovacích charakteristik. Takto určené hodnoty jsou použity pro následné tepelně-emisní měření analyzátozem spalin GA-60. Tepelně-emisní koncentrace jsou posouzeny v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu a jsou statisticky vyhodnoceny regresní analýzou.

Výsledné hodnoty z prvkové a stechiometrické analýzy ukazují na rozdílné parametry jednotlivých posuzovaných vzorků biopaliv. Velkých koncentrací dusíku a síry v samotném palivu měly vzorky pelet z řepkové slámy. Více než dvojnásobné množství popele má vzorek paliva z kůry. Na základě výsledných parametrů tepelně-emisního měření, které ukazují na celkové průběhy emisí oxidu uhelnatého a uhličitého v závislosti na přiváděném spalovacím vzduchu, nelze doporučit spalování nadrcené kůry na vybraném hořákovém topeništi.

**Klíčová slova:** pšeničná a řepková sláma, kůra, stechiometrická analýza, spalovací zařízení, emise

**Kontaktní adresa:****Ing. David Černý**

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Kamýcká 129, Praha 6 – Suchdol

tel.: 224 383 205

e-mail: dcerny@tf.czu.cz

**Recenzovali:** Ing. J. Skalický, CSc., Ing. M. Šlajs