

Tepelně-emisní charakteristiky briket z odpadní biomasy na spalovacím zařízení s ručním podáváním

Thermal emission characteristics of briquettes from waste biomass in combustion equipment with manual fuel feeding

¹Jiří Bradna, ²Jan Malat'ák, ²David Černý

¹Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i.

²Česká zemědělská univerzita v Praze

Abstrakt

Příspěvek se zabývá aktuální problematikou energetického využití tuhé odpadní biomasy ve formě briket ze zemědělské, lesnické a zpracovatelské produkce. Využití odpadní biomasy jako obnovitelného zdroje energie tvoří významný potenciál náhrady fosilních paliv při vytápění. Cílem měření je především stanovení emisních koncentrací sledovaných látek v produkovaných plynných spalinách různých směsí lisovaných vzorků paliv. Vzorky jsou lisovány ve tvaru briket o průměru 65 milimetrů. Při vlastním měření jsou sledovány emisní koncentrace oxidu uhličitého (CO₂), oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO_x) a teploty spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu n. Měření emisních parametrů vzorků se uskutečnilo na krbových akumulacích kamnech o výkonu 8 kW.

U lokálních spotřebičů s ručním přikládáním na tuhá paliva, která se především používají v domácnosti, nelze řešit systém čištění spalin jako u větších zařízení, a proto je nutné preferovat standardizovaná tuhá paliva vysoké jakosti. Z výsledků měření emisí je patrné, že přebytek vzduchu je velmi důležitou provozní veličinou, která ovlivňuje jak koncentrace sledovaných emisí, tak i v ohništi spalovací teplotu.

Abstract

This paper deals with current issues of solid waste biomass energy use in the form of briquettes from agricultural, forestry and manufacturing production. The use of waste biomass as a renewable source of energy is a significant potential for replacing fossil fuels for heating. The measurement objective is mainly determining emission concentrations of the monitored substances in the flue gas produced by various mixtures of pressed fuel samples. The samples are pressed in the form of briquettes with a diameter of 65 mm. During the actual measurement are monitored emission concentrations of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and the exhaust gas temperature depending on the coefficient of excess air n. The measurement of samples emission parameters was carried out in the fireplace accumulator stove with output of 8 kW.

In the small local combustion equipment for solid fuel with manual fuel feeding, which is mainly used in homes, can not be solved gas cleaning system as used in larger devices, and therefore it is necessary to prefer standardized solid fuel with high quality. The emission results show that excess air is a very important process variable that affects both the concentration of monitored emissions, as well as combustion temperature in the fireplace.

Klíčová slova: sláma, štěpka, melasa, cukrovarnické řízky, kal, oxidy uhlíku a dusíku, teplota spalin

Key words: straw, wood chips, molasses, beet pulp, sludge, carbon and nitrogen oxides, flue gas temperature

Úvod

Odpad, který nemůže být recyklován, opětovně použit nebo využit jiným způsobem (např. energeticky) by měl být bezpečně spálen (nesplní-li účinnost spalování odpadů kritéria pro energetické využití odpadů), a jeho skládkování by mělo být až jako poslední možnost (1). Oba tyto způsoby vyžadují pečlivé sledování s ohledem na jejich potenciál k působení škod na životním prostředí. Evropská unie proto přijala směrnici zakládající přísná pravidla pro skládkování. Směrnice (směrnice o skládkách odpadů) mj. zakazuje skládkovat určité typy odpadů, jako např. celé použité pneumatiky, a nastavuje cíle pro snížení množství skládkovaného biologicky rozložitelného odpadu, čímž sleduje záměr na omezení znečištění podzemních a povrchových vod a půdy a omezování uvolňování skládkového plynu (metanu) (2). Jiné směrnice předepisují přísné emisní limity pro spalování odpadů. Evropská unie chce také dosáhnout snížení emisí dioxinů a kyselých plynů (NO_x , SO_2 , HCl), které mohou škodit lidskému zdraví (3).

Energetické využívání odpadní biomasy jako obnovitelného zdroje energie má celou řadu pozitivních aspektů a napomáhá řešit problémy nejen ekologické, ale i zemědělsko – lesnické (4). Palivo na bázi biomasy neobsahuje téměř žádnou síru a emise oxidu siřičitého. Ostatní škodliviny v emisích z odpadní biomasy jsou ve srovnání s emisemi z fosilních paliv příznivější. Podroštný popel z fytopaliv je možno z větší části použít jako hnojivo s příznivým obsahem vápníku, hořčíku, draslíku a fosforu (5).

Pod pojmem znečišťující látky jsou v naší současné legislativě označovány tuhé, kapalné a plynné látky, které přímo anebo po chemické či fyzikální změně v ovzduší, nebo po spolupůsobení s jinou látkou nepříznivě ovlivňují ovzduší, a tím ohrožují a poškozují zdraví lidí, ostatních organismů nebo majetek. Mezi hlavní znečišťující plynné látky patří především SO_2 , CO , CO_2 a NO_x (6).

Tento příspěvek řeší naléhavé otázky energetického využívání paliv na bázi odpadní biomasy v malém spalovacím zařízení s ručním podáváním paliva ve formě briket. Vědecké práce například autorů Johanssona 2003 (7) a Olssona 2004 (8) poukazují na velmi dobré emisní vlastnosti při spalování biomasy v moderních spalovacích zařízeních. Má-li se však rozhodnout o odpadní biomase, zda je vhodná pro spálení v určitém typu spalovacího zařízení, je zapotřebí znát ty její vlastnosti, které ji dostatečně charakterizují. Jednou z těchto vlastností jsou tepelně-emisní charakteristiky.

Materiál a metody

V rámci výzkumného úkolu byla na krbových akumulacích kamnech s otevřeným systémem a jmenovitým teplem výkonem 8 kW experimentálně spalována odpadní biomasa ve formě briket o průměru 65 milimetrů. Základním úkolem práce je stanovit jednotlivé tepelně-emisní koncentrace CO , CO_2 , NO_x a teplotu spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu.

Pro stanovení hmotnostních toků, emisních faktorů a charakteristiky tuhých částic při termickém zpracování briket z biomasy je použit přístroj GA – 60. Jedná se o víceúčelový analyzátor kouřových plynů. Standardní vybavení představuje převodníky na analýzu těchto složek spalin: kyslík (O_2), oxid uhelnatý (CO), oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2), oxid siřičitý (SO_2) a chlorovodík (Cl). Přístroj GA – 60 umožňuje měřit jak teplotu okolí (t_{ok}), tak teplotu spalin (t_{sp}). Prostřednictvím těchto měření je posuzováno palivo i spalovací zařízení, pokud jde o jeho tepelné parametry a emisní poměry.

Vzorky tuhých odpadních surovin pro výrobu briket jsou získány z oblasti Středočeského kraje v období roku 2012. Jednak je vybrána odpadní biomasa ze zemědělské činnosti, jako je pšeničná sláma, chrastice rákosovitá, topolová štěpka z lesnické činnosti, odpad po čištění zrnin z úpravny zrní na mouky, sušený stabilizovaný kal z provozu čistírny

odpadních vod Praha, cukrovarnické řízky a melasa z provozu cukrovaru. Tyto odpadní suroviny jsou smíchány v poměru uvedené v tabulce č. 1 a nalisovány do tvaru briket o průměru 65 mm na briketovacím zařízení od firmy Brikliis, spol. s.r.o.

Tab. 1 Vzorky briket o průměru 65 mm

Číslo vzorku	Typy vzorků briket a poměr suroviny
1	Pšeničná sláma
2	Chrastice rákosovitá a topolová štěpka v poměru 1 : 1 a 10 % hnědého uhlí
3	Odpad po čištění zrnin
4	Pšeničná sláma a 15 % cukrovarnických řízků
5	Dřevní štěpka a 10 % sušeného stabilizovaného kalu
6	Pšeničná sláma a 10 % melasy

Provozní zkoušky proběhly podle ČSN EN 13229 „Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody“ (9). Protože bylo zkoušeno topné zařízení s uzavíratelným ohništěm, hodnoty tahu komína v závislosti na jmenovitém tepelném výkonu se pohybovaly v předepsaném rozmezí 12 ± 2 Pa (hodnoty statického tlaku v měřicím úseku spalin). Při měřeních byla průměrná koncentrace oxidu uhelnatého a dalších plynných emisí přepočtena na 13 % obsah kyslíku (O_2). Podle zmíněné normy musí průměrné hodnoty oxidu uhelnatého ve spalinách splňovat mezní hodnoty pro příslušnou třídu CO tak, jak uvádí tab. 2.

Tab. 2 Třídy emisí oxidu uhelnatého pro lokální spotřebiče na pevná paliva podle ČSN EN 13229

Třída CO spotřebiče	Spotřebiče s uzavřenými dvířky
	Mezní hodnoty tříd emisí CO (při 13 % O_2) %
Třída 1	$\leq 0,3$ ¹⁾
Třída 2	$> 0,3 \leq 0,8$ ¹⁾
Třída 3	$> 0,8 \leq 1,0$ ¹⁾

¹⁾ $1 \text{ mg.m}_N^{-3} = 0,0001 \%$

Kamna jsou určena ke spalování jakéhokoliv dřeva nebo dřevěných briket. Jejich hlavní částí je krbová vložka z ocelového plechu, nebo kamnářské litiny tloušťky 5 - 8 mm. Je obložena ze stran a ze shora feolitovými cihlami, které umožňují naakumulovat tepelnou energii a vydávat ji určitou dobu po skončení topení. Akumulační cihly jsou obloženy izolační vrstvou speciálně vyrobenou a tvarovanou z izolace Kalcium - silikát. Dvířka jsou opatřena keramickým sklem s odolností do 750 °C. Spaliny jsou odváděny z topeniště do kouřovodu o průměru 150 mm. Spalovací kamna jsou připojena odvodem spalin do komína.

Veškeré naměřené hodnoty jsou statisticky vyhodnoceny statistickou regresní analýzou s vyjádřením regresní rovnice a hodnotou spolehlivosti a jsou přepočítávány na normální podmínky (při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ kPa}$) a pro referenční obsah kyslíku ve spalinách $O_F = 13 \%$.

Výsledky a diskuse

Výsledné tepelně-emisní koncentrace v ppm jsou z analyzátoru spalín převedeny na normální podmínky a na $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, dále pak přepočteny na 13 % referenční obsah kyslíku ve spalínách. Jako první jsou vyneseny závislosti oxidu uhelnatého a uhlíčitého na velikosti součinitele přebytku vzduchu. Při výpočtu součinitele přebytku jsou právě použity emisní koncentrace oxidu uhlíčitého, podle rovnice (5):

$$n = 1 + \left(\frac{CO_{2\max}}{CO_2} - 1 \right) \cdot \frac{V_{sp,\min}^s}{L_{\min}}$$

kde:

$CO_{2\max}$ teoretická objemová koncentrace oxidu uhlíčitého v suchých spalínách při $n = 1$ (%)

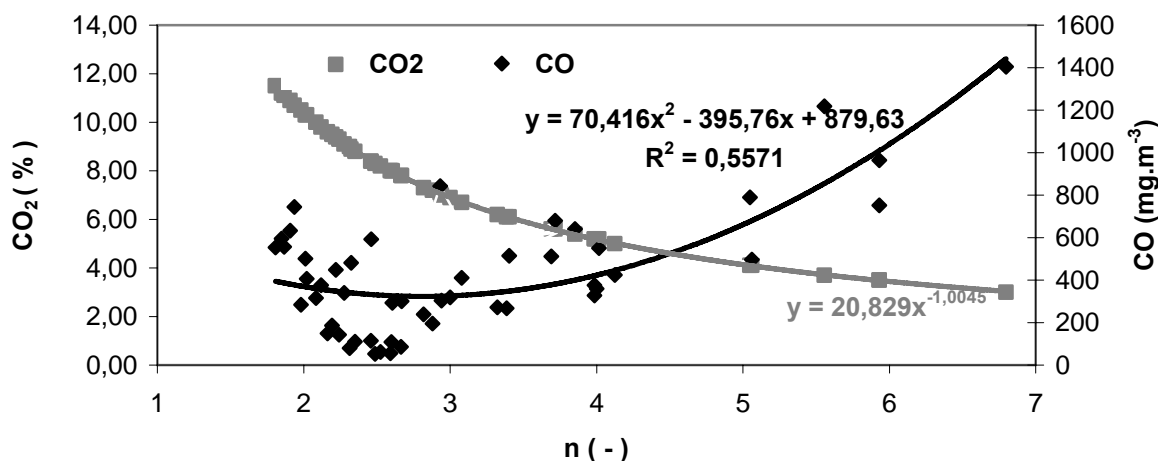
CO_2 je naměřená hodnota koncentrace oxidu uhlíčitého v suchých spalínách (%)

$V_{sp,\min}^s$ teoretické objemové množství suchých spalín při $n = 1$ ($\text{m}^3_{\text{N}}\cdot\text{kg}^{-1}$)

L_{\min} teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování při $n = 1$ ($\text{m}^3_{\text{N}}\cdot\text{kg}^{-1}$)

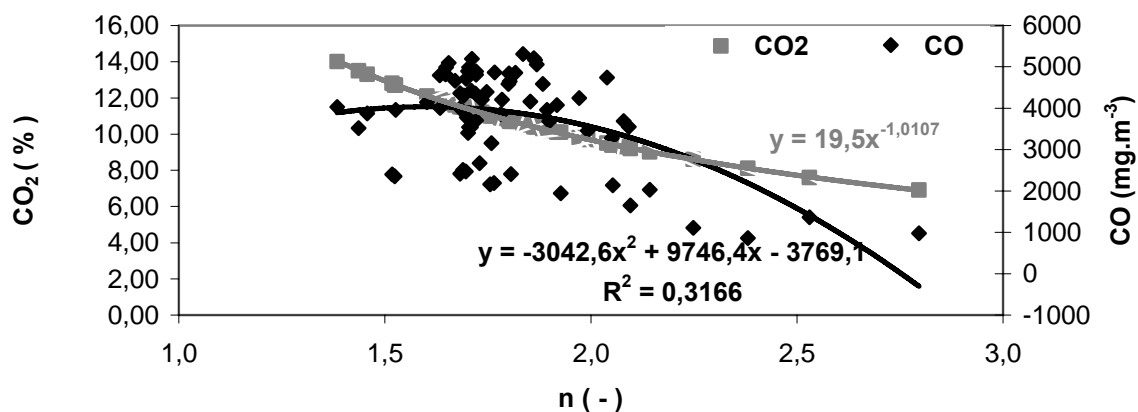
Výsledné hodnoty emisních koncentrací oxidu uhelnatého a uhlíčitého v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu jsou uvedeny na obr. 1 – 6.

Pšeničná sláma

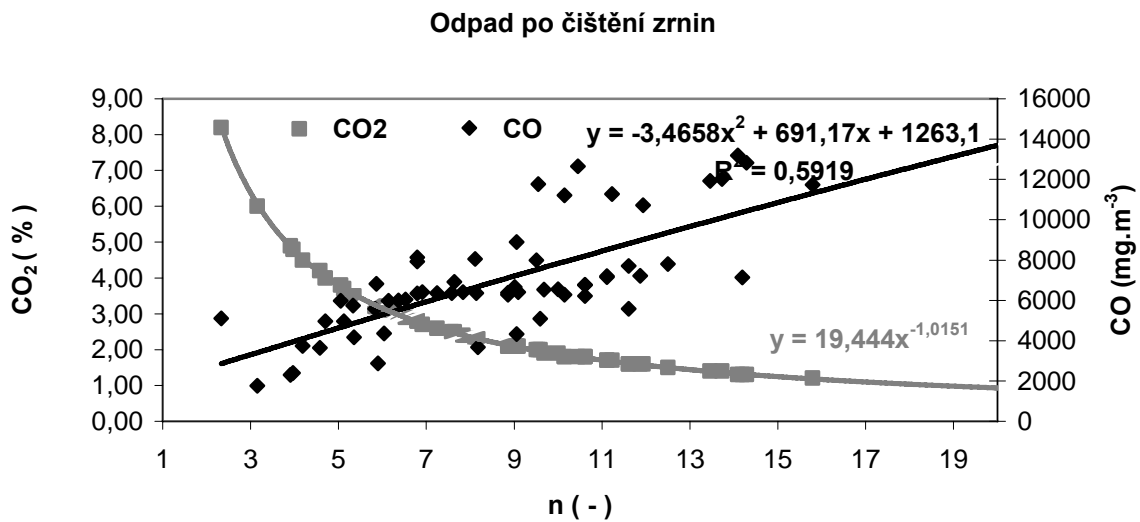


Obr. 1 Výsledné emisní koncentrace oxidu uhelnatého a uhlíčitého

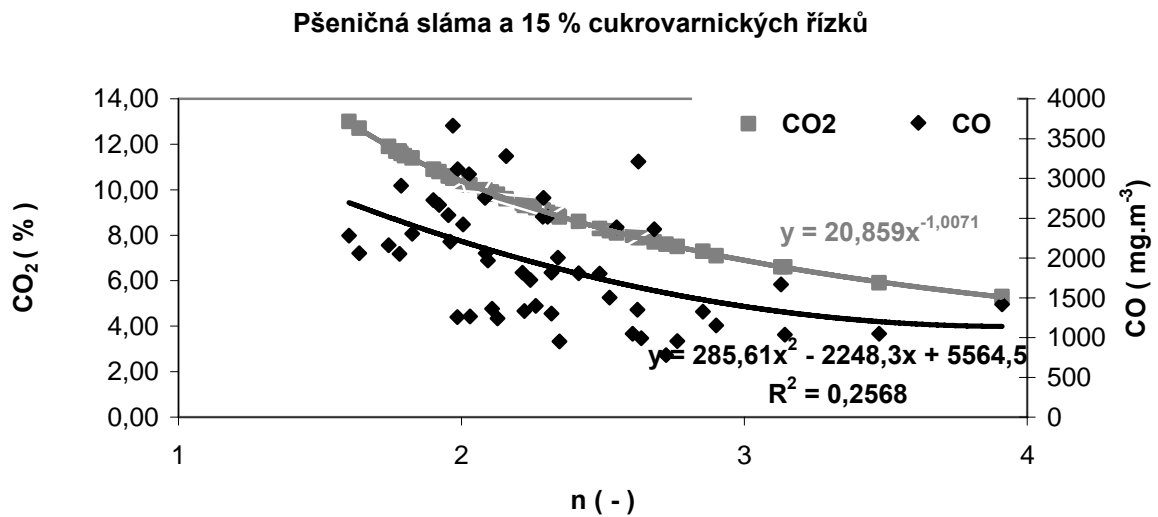
Chrastice rákosovitá a topolová štěpka v poměru 1 : 1 a 10 % hnědého uhlí



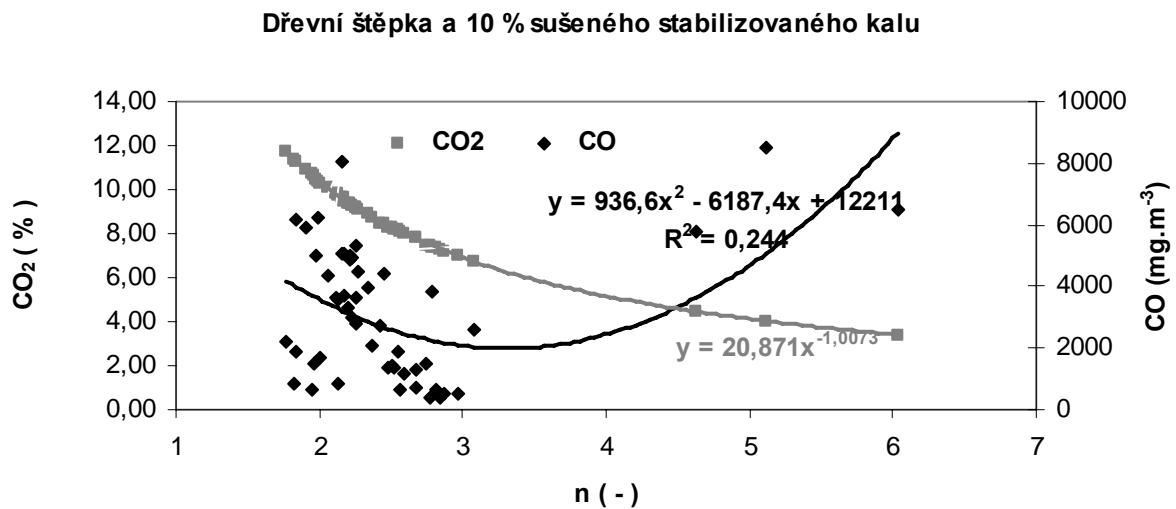
Obr. 2 Výsledné emisní koncentrace oxidu uhelnatého a uhlíčitého



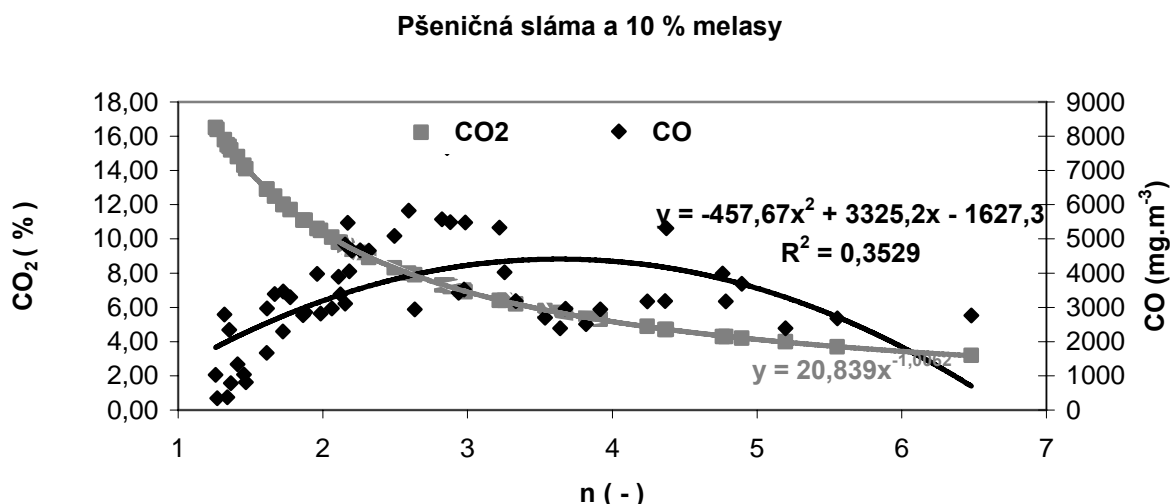
Obr. 3 Výsledné emisní koncentrace oxidu uhelnatého a uhlíčitého



Obr. 4 Výsledné emisní koncentrace oxidu uhelnatého a uhlíčitého



Obr. 5 Výsledné emisní koncentrace oxidu uhelnatého a uhlíčitého



Obr. 6 Výsledné emisní koncentrace oxidu uhelnatého a uhlíčitého

Grafické znázornění oxidu uhelnatého a oxidu uhlíčitého v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je významné vzhledem k jeho průběhu. Především závislost oxidu uhlíčitého, produkt dokonalého spalování, v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je ve všech případech podobný. S rostoucím množstvím vzduchu dochází k poklesu koncentrace oxidu uhlíčitého z max. koncentrace do minimální, kde dochází k ochlazení plamene a naředění spalin spalovacím vzduchem.

Vzhledem k tomu, že uhlovodíky a další neúplně spálené produkty se chovají stejně jako oxid uhelnatý, představuje tato emisní složka významný indikátor kvality spalovacího procesu (10). Oxid uhelnatý, produkt nedokonalého spalování, nejdříve v oblasti velmi nízkého součinitele přebytku vzduchu klesá až do optimálních hodnot, u každého posuzovaného vzorku odpadní biomasy jsou optimální hodnoty posunuty v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu. Po překročení těchto optimálních hodnot součinitele přebytku vzduchu dochází k postupnému nárůstu oxidu uhelnatého až do jeho maximální koncentrace. Tento průběh lze sledovat u vzorků briket pšeničné slámy a dřevní štěpky s 10 % sušeného stabilizovaného kalu. Ostatní vorky mají opačný průběh až na vzorek briket z odpadu po čištění zrnin, kde dochází hned od počátku k postupnému nárůstu oxidu uhelnatého.

Proč nastal jiný průběh emisních koncentrací oxidu uhelnatého při spalování u vybraných vzorků, lze spatřovat ve více faktorech, jako je např. výhřevnost, podíl prchavé hořlaviny ve vzorku a množství spalovacího vzduchu přiváděného do spalovacího prostoru. Také v samotném spalovacím zařízení u těchto vzorků dochází k různému stupni promísení prchavých hořlavých látek se spalovacím vzduchem a stupněm prohoření, část hořlaviny nestačí prohořet a je unášena společně se spalinami.

Z takto vyjádřených charakteristik průběhu spalování lze spalovací zařízení optimalizovat s co největší účinností spalování. Z obrázků 1 – 6 je patrné, že u každého vzorku je nastavení individuální. Tato optimální hranice přívodu spalovacího vzduchu do spalovací komory se pohybuje okolo trojnásobku součinitele přebytku vzduchu.

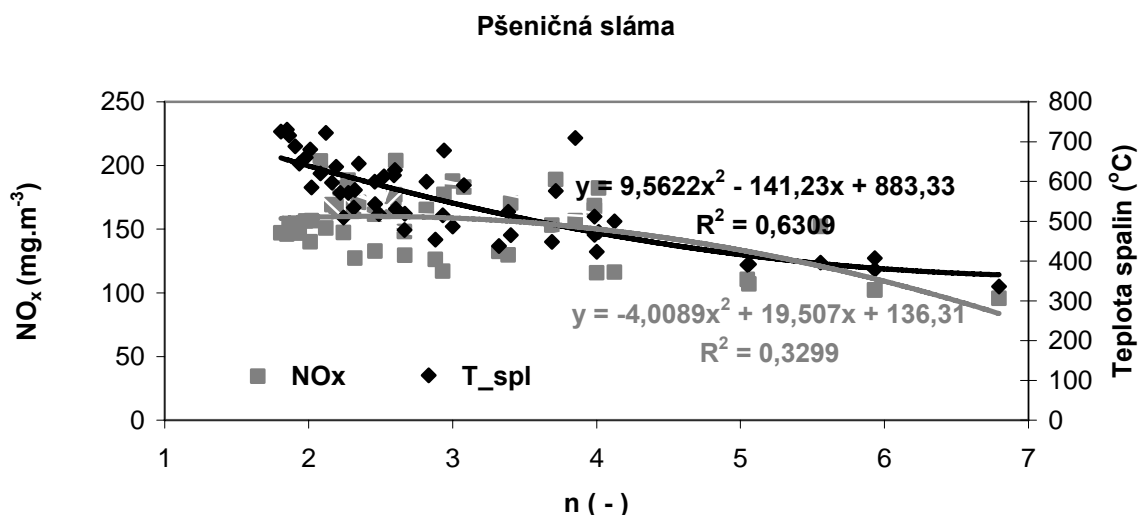
Neméně významnou emisní složkou jsou emisní koncentrace oxidů dusíku a teplota spalin. Výsledné hodnoty emisních koncentrací oxidů dusíků a uhlíčitého v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu jsou uvedeny na obr. 7 – 12.

Průběh teploty spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je ve všech případech shodný. S rostoucím množstvím vzduchu dochází k poklesu teploty spalin z

maximální teploty na minimální, kde dochází k ochlazení plamene a naředění spalín spalovacím vzduchem.

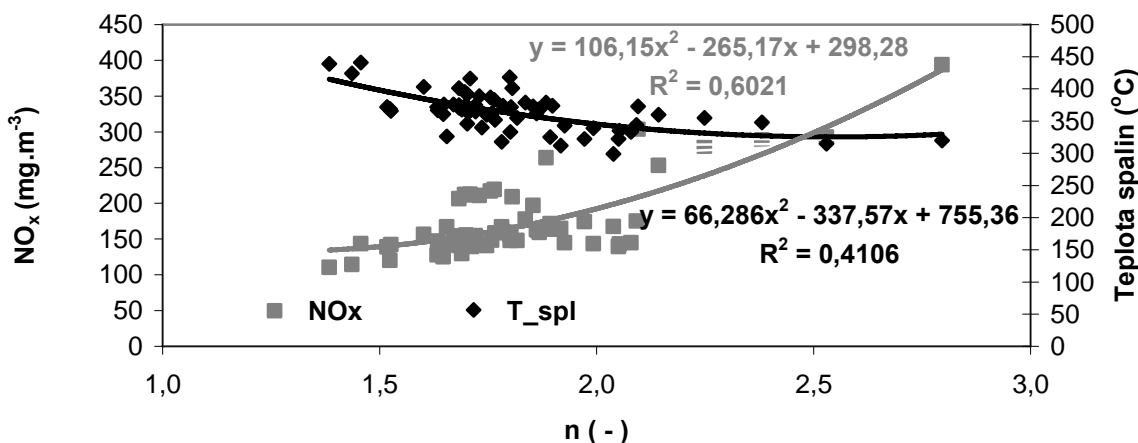
Koncentrace oxidů dusíku v oblasti nízkých hodnot součinitele přebytku vzduchu jsou závislé především na spalovacích teplotách (teplotě spalín). V průběhu zvyšování součinitele přebytku vzduchu jednak dochází k ochlazení spalovací teploty (teploty spalín). S přibývajícím množstvím atmosférického dusíku ve spalovacím vzduchu (součinitele přebytku vzduchu) roste koncentrace oxidů dusíku. Tento průběh lze pozorovat skoro u všech vzorků odpadní biomasy. U jediného vzorku pšeničné slámy je tento průběh opačný. Teplota spalín při nízkém součiniteli přebytku vzduchu vysoce překročila hodnotu 700 °C a v průběhu zvyšování součinitele přebytku vzduchu teplota spalín klesla pouze na hodnoty okolo 400 °C.

Z výsledných emisních koncentrací oxidů dusíku a teploty spalín v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu lze spalovací zařízení optimalizovat s co nejmenšími emisními koncentracemi oxidů dusíku a tepelnými ztrátami. Z obrázků 7 – 12 je patrné, že u každého vzorku odpadní biomasy je nastavení individuální. Tato optimální hranice přívodu spalovacího vzduchu do spalovací komory se pohybuje rovněž okolo trojnásobku součinitele přebytku vzduchu.

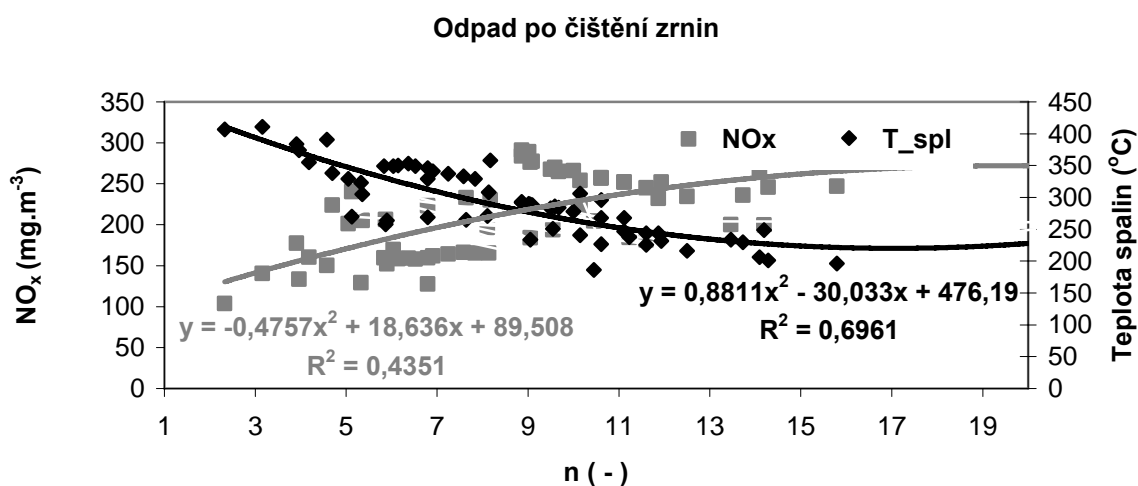


Obr. 7 Výsledné emisní koncentrace oxidů dusíků a teploty spalín

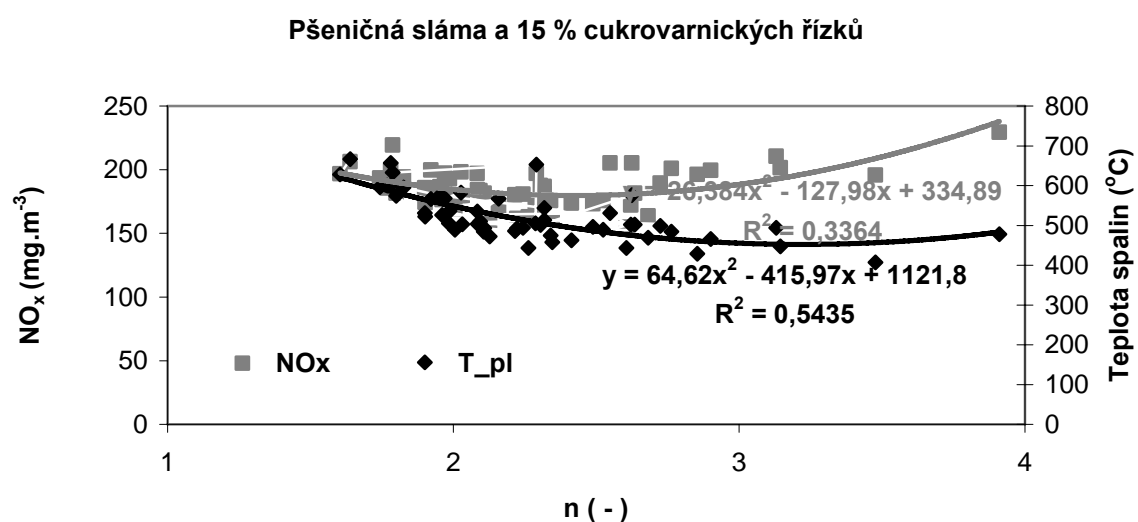
Chrastice rákosovitá a topolová štěpka v poměru 1 : 1 a 10 % hnědého uhlí



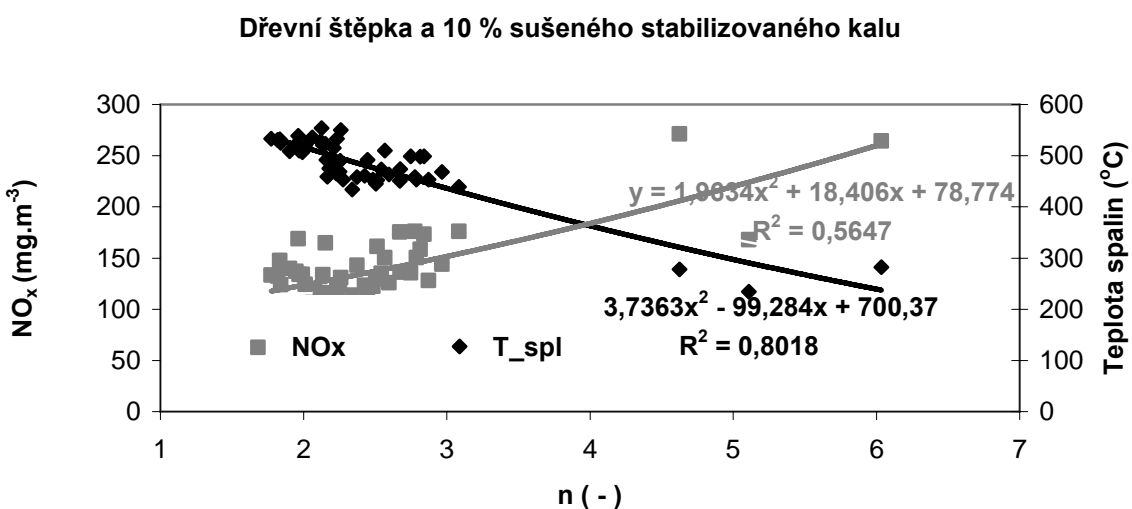
Obr. 8 Výsledné emisní koncentrace oxidů dusíků a teploty spalin



Obr. 9 Výsledné emisní koncentrace oxidů dusíků a teploty spalin

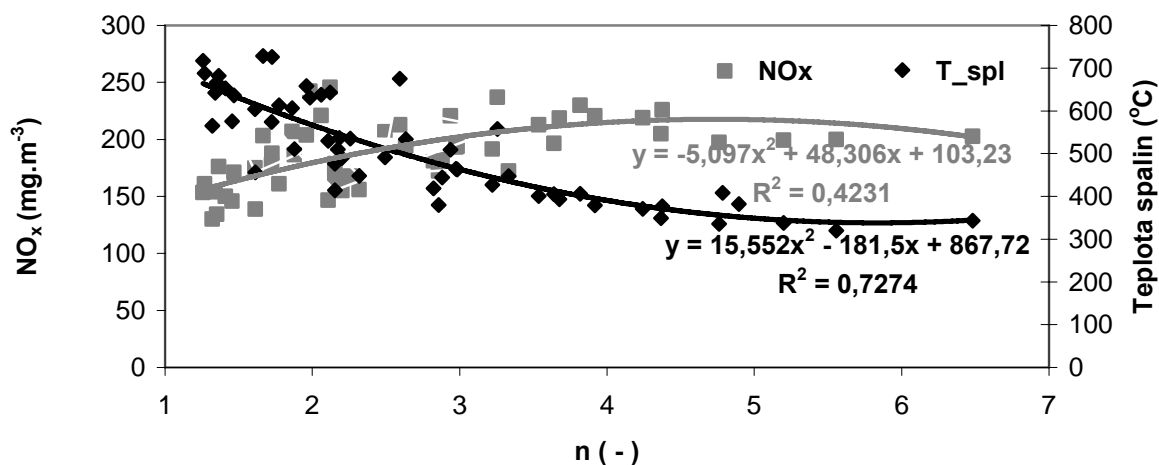


Obr. 10 Výsledné emisní koncentrace oxidů dusíků a teploty spalin



Obr. 11 Výsledné emisní koncentrace oxidů dusíků a teploty spalin

Pšeničná sláma a 10 % melasy



Obr. 12 Výsledné emisní koncentrace oxidů dusíků a teploty spalin

Příčinou vzniku vysokých emisí oxidů dusíku může být prvkové složení rostlinné odpadní biomasy, kdy vzorky mají obvykle větší množství dusíku v samotném palivu. U těchto paliv může docházet ke zvýšenému množství emisí oxidů dusíku ve spalinách. Další příčinou, která sebou přináší vznik oxidů dusíku, je vysoká teplota spalin, která je zapříčiněná přehřátím spalovacího prostoru spalovacího zařízení a vysoký součinitel přebytku vzduchu. Zvýšená teplota ve spalovacím prostoru zvyšuje spalnou teplotu, a to dává podnět ke vzniku vysokoteplotních oxidů dusíku (11). Velké množství spalovacího vzduchu ve spalovacím prostoru zvyšuje oxidační reakce spalin. Aby nedocházelo k nadměrným emisím oxidů dusíků, stačí upravit hmotnostní tok paliva do spalovacího prostoru, a tím i množství spalovacího vzduchu do spalovacího prostoru. Další řešení vyžaduje větší zásah do spalovacího prostoru spalovacího zařízení, jako je přemístění žáruvzdorných retort nebo výměníků tepla.

Rozdíl teplot spalin u jednotlivých vzorků odpadní biomasy lze odůvodnit množstvím vzduchu přiváděného do spalovacího zařízení, výhřevností vzorků a také hmotnostním podílem prchavé složky vzorku. Takto stanovené vysoké hodnoty teploty spalin mohou zvyšovat tepelnou ztrátu citelným teplem spalin.

Zahraniční výzkumné práce potvrdily závěry měření, že zvýšená teplota a vysoký obsah spalovacího vzduchu (z 5 % až na 21 %) má podstatný vliv na zvýšenou produkci oxidů dusíku z palivového dusíku (11 a 12). Klesající množství spalovacího vzduchu má za následek snižování emisí oxidů dusíku, ale také zvýšení emisí oxidu uhelnatého ve spalinách. Nové chemické senzory oxidu uhelnatého ve spolupráci s lambda sondou poskytnou účinnou kontrolu pro optimální výkon spalovacího zařízení s ohledem na emise a tepelnou účinnost (13 a 14).

Ve výzkumné práci Eskilsona 2012 (12) se nachází kompromis mezi nespálenými oxidy uhlíku a oxidy dusíku. Klesající množství vzduchu ve spalovací komoře snižuje množství oxidů dusíku ve spalinách, ale na druhé straně se zvyšují emise nespálených oxidů uhlíku. Nalezení optimálního nastavení součinitele přebytku vzduchu pro jednotlivé druhy paliv z biomasy řeší problém s emisemi oxidů dusíku a oxidu uhelnatého.

Vysoký obsah oxidu uhelnatého má odpadní biomasa i vlivem velké vlhkosti v palivu a vlivem špatné konstrukce spalovacího prostoru spalovacího zařízení. Obecně by měl být pro dokonalé prohoření přiveden sekundární vzduch, čas zdržení hořlavých plynných částic by měl být nejméně 0,5 s a teplota hoření by měla dosahovat kolem 1000 °C (13).

Závěry

Požadavky na kvalitu vytápění značně stoupají, a to i z pohledu jeho vlivu na životní prostředí. U lokálních spotřebičů na tuhá paliva, která se především používají v domácnosti, nelze řešit systém čištění spalin jako u větších zařízení, a proto je nutné preferovat standardizovaná tuhá paliva vysoké jakosti. Použitím uzavřené regulovatelné spalovací komory křbových vložek se odstraňují špatné spalovací podmínky otevřených krbů. U vložek kachlových kamen se prosazují především spalovací komory s horním odhoříváním, obzvláště tam, kde přicházejí v úvahu akumulární kamna. Z těchto důvodů byla jako ověřovaná spalovací zařízení zvolena akumulární kamna se jmenovitým tepelným výkonem 8 kW.

Co se týká emisí oxidu uhelnatého, spalovací zařízení má pracovat, jak prokazují výzkumy, ve jmenovitých parametrech, jakákoliv neřízená změna toku spalovacího materiálu a spalovacího vzduchu vede k vysokým emisím oxidu uhelnatého (11).

Každý typ spalovacího zařízení má vlastní charakteristický průběh emisí oxidu uhelnatého. Největší emise vznikají především v průběhu zapálení a zastavení spalovacího zařízení. Při nastavení spalovacího zařízení na zmenšení emisí v průběhu zapálení a zastavení dochází zase ke zvýšeným emisím v průběhu spalování. Při zastavení spalovacího zařízení palivo ve spalovacím prostoru ještě doutná a produkuje vysoké emise (14).

Největších emisních koncentrací oxidu uhelnatého a oxidů dusíku je dosaženo při vysokém součiniteli přebytku vzduchu. Vysoké množství spalovacího vzduchu ochlazuje spalovací prostor a má za následek vysoké emise oxidu uhelnatého ve spalinách (10).

Z obsahu oxidu uhličitého (CO₂) lze usuzovat na kvalitu (účinnost) spalování. Pokud je při malém přebytku vzduchu (dokonalé spalování) dosaženo nejvyšší možné koncentrace CO₂, jsou ztráty způsobené spalinami (při stejné teplotě spalin) minimální. Pro každé kapalné a tuhé palivo existuje maximálně dosažitelný podíl oxidu uhličitého CO₂ (tzv. CO_{2max}) ve spalinách, který je dán prvkovým složením hořlaviny paliva. Tato hodnota je ovšem u skutečných zařízení nedosažitelná (15).

Pro úplné spalování musí být přebytek vzduchu, jak je obecně známo, větší než 1, protože by jinak nebylo k dispozici dostatečné množství kyslíku. Jestliže je oproti tomu přebytek vzduchu příliš velký (větší než 2 – 3), tak dochází pro nadbytečný přívod vzduchu k ochlazení plamene a spalování se stává vlivem nízké teploty rovněž nedokonalé (5).

Článek vznikl za finanční podpory grantové agentury Technické fakulty 2013 na České zemědělské univerzitě v Praze č. 31170/1312/3116.

Literatura

- (1) Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic (Directive on waste).
- (2) Směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách odpadů (Directive on the landfill of waste).
- (3) Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/76/ES o spalování odpadu (Directive on the incineration of waste).
- (4) McBurney, B., 1995. A Case Study of a Large Scale Wood Waste Power Generating Plant. Biologue - Regional Biomass Energy Program Report. The Official Publication of the National BioEnergy Industries Association. Vol.13. No.1.: 5 – 11.
- (5) Malaťák J., Passian L., 2011. Heat-emission analysis of small combustion equipments for biomass. Res. Agr. Eng., 57: 37–50.
- (6) Price, B., 1998. Electricity from Biomass. Financial Times Energy, G. Britain, 130 s.
- (7) Olsson, M.; et al., 2003. Specific chimney emissions and biofuel characteristics of softwood pellets for residential heating in Sweden. Biomass and Bioenergy, 24: 51 – 57.
- (8) Olsson M., Kjallstrand J., 2004. Emissions from burning of softwood pellets. Biomass-and-Bioenergy, 27(6): 607-611.

- (9) ČSN EN 13229: Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody. ČNI Praha, Praha 1998, 66.
- (10) Johansson, L.S., et al., 2003. Particle emissions from biomass combustion in small combustors. *Biomass and Bioenergy*, 25: 435 – 446.
- (11) Fiedler F., Persson T., 2009. Carbon monoxide emissions of combined pellet and solar heating systéme. *Applied Energy*, 86: 135–143.
- (12) Eskilsson, D., 2004. Optimisation of efficiency and emissions in pellet burners. *Biomass and Bioenergy* 27: 541–546
- (13) Vierle O., et al., 1999. Investigation of organic pollutants from house heating systems using biogenic fuels and correlations with other exhaust gas components. *Analytica Chimica Acta*, 393: 131–140.
- (14) Friberg R., Blasiak W., 2002. 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: 189 – 208.
- (15) Malat'ák J., Gurdil G.A., Jevič P., Selvi K.C., 2009. Biomass Heat-Emission Characteristics of Energy. *AMA - Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, Tokyo, 39 (4): 9 – 13.

Kontaktní adresa

Ing. Jiří Bradna, Ph.D.

Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i.

Drnovská 507, 161 01 Praha 6

Tel.: 233 022 473

e-mail: jiri.bradna@vuzt.cz

doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

Česká zemědělská univerzita v Praze

Kamýcká 129, 165 21 Praha 6

Tel.: 224 383 205

e-mail: malatak@tf.czu.cz