

## SROVNÁNÍ EMISÍ VYBRANÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK ZE SPALOVÁNÍ BIOMASY A UHLÍ V DOMÁCNOSTECH

Michal Šyc<sup>a</sup>, Jiří Horák<sup>b</sup>, František Hopan<sup>b</sup>, Kamil Krpec<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., Rozvojová 135/2, 165 02 Praha 6

e-mail: syc@icpf.cas.cz

<sup>b</sup>Výzkumné energetické centrum, Inovace pro efektivitu a životní prostředí, VŠB-TU Ostrava,

17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava

e-mail: jirka.horak@vsb.cz

*Emise znečišťujících látek z lokálních topenišť malých výkonů představují jeden z hlavních příspěvků k celkovému znečištění ovzduší. Vzhledem k současnému trendu přechodu z hnědého uhlí na biomasu je žádoucí stanovit vliv tohoto přechodu na emise některých polutantů. V práci jsou sledovány emise CO, TZL a vybraných POP ze spalování bukového dřeva a hnědého uhlí na nejčastěji používaných typech teplovodních kotlů v ČR. Sledován je jak vliv konstrukce kotle, tak vliv paliva. Z výsledků vyplývá, že stěžejním faktorem ovlivňujícím úroveň sledovaných polutantů je samotná konstrukce teplovodního kotle. Výraznější vliv záměny uhlí za biomasu, i vzhledem k podobnému obsahu Cl, na emise POP pozorován nebyl.*

Došlo: 28. 4. 2011, přijato: 23. 5. 2011

### 1. Úvod

V České Republice bylo hnědé uhlí po dlouhou dobu hlavním palivem používaným k vytápění v lokálních topeništích. V posledních letech je i za pomoci tlaku legislativních autorit zaznamenán částečný přechod z uhlí na biomasu. Jednou z hlavních motivací odklonu od fosilních paliv jsou snahy o snížení emisí některých skleníkových plynů v rámci boje proti globálním změnám klimatu. Pozitivní vliv přechodu z uhlí na biomasu, například u emisí oxidů síry, je vzhledem k nižšímu obsahu síry v biomase neoddiskovatelný. Otázkou je ovšem srovnání celkových emisí znečišťujících látek při spalování obou druhů paliv. Jako další významné polutanty zatěžující životní prostředí lze uvést zejména tuhé znečišťující látky (TZL) a persistentní organické polutanty (POP).

Emise znečišťujících látek z domácích topenišť výrazně přispívají k celkovému znečištění životního prostředí. Jejich vliv je dobře patrný například ze sezónních výkyvů koncentrací polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) získaných při dlouhodobých monitorovacích programech [1]. Některé zdroje uvádějí, že 35 % emisí primárních částic PM<sub>10</sub>, 20–45 % emisí PAU a 30–35 % emisí polychlorovaných dibenzo-*p*-dioxinů a furanů (PCDD/F) v EU pochází z lokálních topenišť [2,3,4]. Zdrojem těchto čísel jsou emisní bilance vypočítané na základě stanovených emisních faktorů (EF) a odhadů spotřeby jednotlivých paliv v domácích topeništích.

Publikované hodnoty emisních faktorů se ale významně liší [5]. Příčinami velkého rozptylu zjištěných hodnot EF jsou hlavně různorodá spalovací zařízení a paliva, nehomogenita samotného spalovacího procesu v malém zdroji - kotli, opominutí některých důležitých faktorů ovlivňujících emise, a také nejednotná metodika prováděných experimentů a použitých postupů.

Celkové emise polutantů jsou dány spalovacím zařízením, jeho stářím, konstrukcí, charakterem chodu

(periodický/neperiodický) apod. [6] Popsán je také například vliv četnosti přikládání u periodicky pracujících kotlů či vliv nižšího než nominálního výkonu na emise vybraných polutantů [7]. Uvedené skutečnosti jsou často v literatuře opomíjeny a je sledován čistě jen vliv paliva, důležitý je zejména obsah vlhkosti v něm. Čím vyšší je vlhkost paliva, tím je většinou nižší kvalita spalování a rostou emise TZL či PAH [7]. Pro emise chlorovaných POP je rozhodujícím faktorem obsah Cl v palivu. Například při spalování chlornatého polského černého uhlí byly zjištěny až řádově vyšší emise PCDD/F než z ostatních paliv [8]. Naopak vyšší koncentrace síry v palivu může tvorbu chlorovaných POP snížit, neboť síra inhibuje průběh katalytické Deaconovy reakce [9].

Stanovení emisí z lokálních topenišť je díky své komplexnosti metodicky velmi obtížné a je nutné se vypořádat s mnoha nestandardními podmínkami [10]. Důležité je dosažení správných isokinetických poměrů při odběrech, což je vzhledem k nízkým rychlostem spalin velmi obtížné. Z tohoto důvodu se používá různých ředících systémů pracujících na principu naředění spalin vzduchem o známém poměru. Odběr spalin je pak prováděn v ředícím systému, který je tomu konstrukcí i podmínkami přizpůsoben. Někdy je ovšem uváděn i vliv metodiky odběru, respektive použitého ředícího systému [11]. Z uvedených skutečností vyplývá, že celkové bilance a odhady emisí jednotlivých polutantů jsou zatíženy velkou nejistotou a další zpřesnění a systematické sledování je žádoucí.

Článek je zaměřen na srovnání emisí vybraných polutantů při spalování hnědého uhlí a bukové dřeva ve vybraných teplovodních kotlích, které jsou nejčastěji používané v ČR. Sledován byl také vliv typu zařízení - konstrukce kotle na emise znečišťujících látek. Všechny experimenty byly provedeny jednotnou metodikou na stejném pracovišti, takže získané výsledky mají komparativní charakter.

## 2. Experimentální část

### 2.1. Palivo

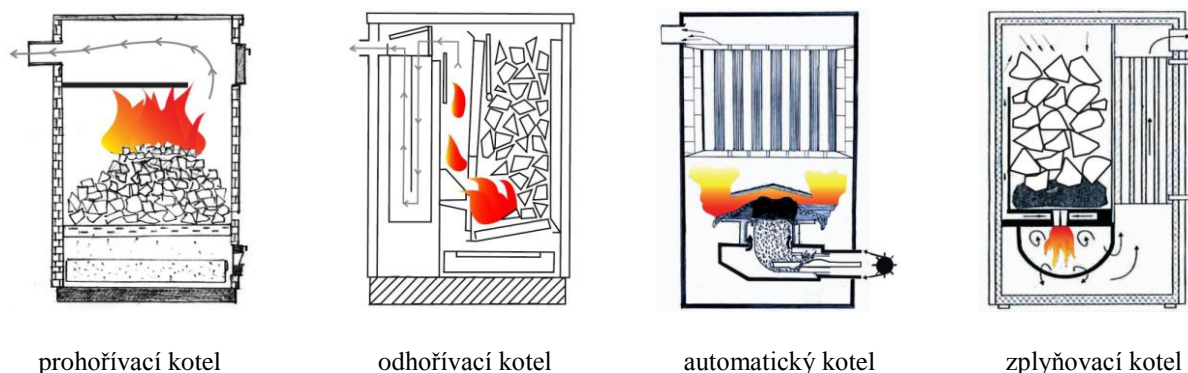
Spalovací experimenty byly realizovány s hnědým uhlím (HU, ořech 1 ze Severočeských dolů, a.s.) a s bukovým dřevem (BUK, kusové dřevo - ¼ špalku o průměru cca 15 cm a délce cca 30 cm). Rozměry paliv byly typické pro použití v ČR. Hrubý a prvkový rozbor obou paliv je uveden v Tab. 1. Z hlediska vzniku chlorovaných POP je důležitý obsah Cl a částečně také S. Obsah Cl je u obou paliv podobný, síry je cca 3x vyšší množství v hnědém uhlí než v bukovém dřevu.

**Tab. 1** Hrubý a elementární rozbor surového paliva

	HU	BUK
vlhkost (hm. %)	27,5	9,6
popel (hm. %)	4,2	0,83
hořlavina (hm. %)	68,3	89,6
Q <sub>s</sub> (MJ/kg)	20,6	17,0
Q <sub>i</sub> (MJ/kg)	19,1	15,7
C (hm. %)	46,9	41,1
H (hm. %)	3,83	5,11
N (hm. %)	0,65	0,09
O (hm. %)	16,4	43,1
S (hm. %)	0,62	0,22
Cl (mg/kg)	58	67

### 2.2. Spalovací zařízení

Testováno bylo 5 teplovodních kotlů lišící se svojí konstrukcí (viz Obr. 1), a to kotel:



**Obr. 1** Schéma testovaných teplovodních kotlů

### 2.3. Spalovací testy

Spalovací testy byly realizovány přibližně při jmenovitém výkonu dle postupů uvedených v EN 303-5. Každý spalovací test začal zapálením paliva, po zapálení byl spalovací proces veden tak, aby bylo dosaženo jmenovitého výkonu kotle co nejdříve. Kotel byl následně při jmenovitém výkonu provozován po dobu cca 2 hodin. Reprezentativní odběry a vzorkování spalin následovaly teprve po této dvouhodinové periodě. Délka spalovací periody se lišila dle spalovaného paliva. Při spalování uhlí byla délka jedné periody cca 4 hodiny,

- prohořivací (starý typ zařízení s manuálním přikládáním, bez nuceného tahu spalovacího vzduchu; celá dávka paliva hoří najednou na roštu ve spalovací komoře; zařízení pracuje se spalovací periodou),
- odhořivací (starší typ zařízení s manuálním přikládáním, bez nuceného tahu spalovacího vzduchu; kotel je rozdělen na dvě části - násypnou šachtu a spalovací komoru, částečné sušení, odplynění paliva a spalování probíhá i v násypné šachtě u hrany se spalovací komorou, hlavní část spalování ale probíhá až ve spalovací komoře),
- automatický (moderní odhořivací kotel s quasi-kontinuálním dávkováním paliva šnekovým podavačem a nucenou dopravou spalovacího vzduchu ventilátorem; spalovací část kotle je tvořena roštem, deflektorem tepla a retortou) a
- 2 typy zplyňovacích kotlů - na uhlí a na biomasu - lišící se konstrukcí hořáku a velikostí spalovací komory (moderní zplyňovací kotel s manuálním dávkováním a nuceným odtažením spalin odtažovým ventilátorem; kotel je tvořen zásobníkem paliva, roštem a pod ním umístěnou spalovací komorou).

Odhad zastoupení jednotlivých typů konstrukcí testovaných teplovodních kotlů a jejich podíl na vytápění v České republice lze najít v literatuře [8].

Kotle byly testovány na testovací trati pro malé spalovací zdroje složené z váhy, testované kotle, izolovaného komína, ředícího tunelu a spalinového ventilátoru. Testovací trať byla zkonstruována na základě normy EPA 5G, detailní popis trati včetně pozitivních přínosů zapojení ředícího tunelu byl již publikován dříve [10].

při spalování dřeva cca 2 hodiny. Odběr vzorků zahrnoval několik spalovacích period, tak aby celková doba odběru dosáhla 6 – 8 hodin. Vzhledem k nestabilitě a heterogenitě spalování v malých kotlích byla většina spalovacích testů (režimů) provedena opakovaně (třikrát). Celá testovací trať byla vždy mechanicky vyčištěna po trojici experimentů se stejným palivem a kotlem kvůli minimalizaci případného memory efektu.

Stanovené emisní faktory jsou vztaženy na výhřevnost paliva.

## 2.4. Vzorkování spalin a analytické metody

Obsah CO byl kontinuálně měřen v izolovaném komíně pomocí analyzátoru Advance Optima dle EN 15058 a ISO 10396. Tuhé znečišťující látky byly stanoveny v ředicím tunelu v souladu s ISO 9096. Analýza a odběr sledovaných POP byl proveden v souladu s EN 1948. Analýzy vzorků zajišťoval Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě.

## 3. Výsledky a diskuse

### 3.1. TZL, CO a PAU

Zjištěné emisní faktory nechlorovaných produktů nedokonalého spalování (např. CO, PAU) jsou uvedeny v Tab. 2. Z výsledků jsou patrné vysoké emise CO a PAU ze starých typů kotlů pracujících s prohořivacím a odhořivacím principem.

**Tab. 2 Emisní faktory CO, TZL a PAU**

kotel		TZL (g/GJ)	CO (g/GJ)	PAU (g/GJ)
prohořivací	HU	1 260	5 8760	5,21
	BUK	100	4 840	2,16
odhořivací	HU	256	4 320	2,08
	BUK	95,2	4 170	1,12
automatický	HU	46,6	450	0,0110
zplyňovací	HU	16,8	132	0,0299
	BUK	14,7	237	0,0441

PAU - suma 10 kongenerů - fluoranten, pyren, benzo(a)antracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, benzo(g,h,i)perylene, dibenzo(a,h)antracen, indeno(1,2,3-cd)pyren.

Vůbec nejvyšší emise byly zjištěny při spalování hnědého uhlí v prohořivacím kotli pracujícím se spalovací periodou. Příčinou takto vysokých hodnot je synergická kombinace vlastností hnědého uhlí a prohořivacího kotle. Při spalovacím testu bylo do kotle dle EN 303-5 na základní vrstvu žhavého paliva přiloženo cca 25 kg hnědého uhlí (palivo na přibližně 4 hodinovou spalovací periodu). Po přiložení poklesla koncentrace O<sub>2</sub> ve spalinách na 1,5 obj. %, koncentrace CO naopak vystoupala nad 10 obj. %. Tato fáze trvala zhruba 25 minut. Teprve následně došlo k významnějšímu zahoření těkavých produktů pomalého odplynění uhlí a koncentrace CO ve spalinách začala klesat. Příčinou tedy bylo pomalé odplynění uhlí v kombinaci s nízkou kvalitou spalování v prohořivacích kotlích dané špatným mícháním spalin ve spalovací komoře s výrazným lokálním deficitem spalovacího kyslíku, relativně nízká spalovací teplota a nehomogenní teplotní pole. Druhá nejvyšší hodnota EF byla zjištěna při spalování bukového dřeva na prohořivacím kotli. Všechny nevýhody prohořivacího kotle se uplatňují i při spalování bukového dřeva, rozdíl v emisích je dán hlavně rychlejším odplyněním dřeva oproti uhlí a snazším prostupem vzduchu skrze vrstvu paliva. Jen mírně nižší EF byly zjištěny u odhořivacího

kotle. V tomto typu konstrukce kotle dochází alespoň částečně odděleně k odplynění paliva a následnému spalování plyných produktů. V odhořivacím kotli dále neprochází spaliny skrze celou vrstvu přiloženého paliva, takže kvalita spalování paliv s vysokým obsahem prchavé hořlaviny je vyšší než v kotli prohořivacím (ten je určen primárně pro palivo s nízkým obsahem prchavé hořlaviny).

Nejnižší hodnoty EF byly zjištěny z obou typů moderních zařízení, a to z automatického a zplyňovacího kotle. U automatického kotle je spalovací proces nejlépe řízen, a to jak regulací dávkování paliva šnekem, tak pomocí regulace výkonu spalovacího ventilátoru. Teplota ve spalovací komoře je v tomto kotli také dostatečně vysoká, v blízkosti deflektoru dosáhla teplota až cca 1000 °C, na vstupu do tepelného výměníku (tj. na výstupu ze spalovací do post-spalovací zóny) pak bylo naměřeno cca 600 – 800 °C. Podobně nízké emise znečišťujících látek byly zjištěny i z moderních zplyňovacích kotlů. I u tohoto typu zařízení je ve spalovací komoře dostatečně vysoká teplota, a to kolem 1000 °C. Teplota v zásobníku paliva pak dosahuje 200 – 400 °C, což způsobí předsušení a odplynění paliva. Spalován je následně až vzniklý plyn.

Stanovit vliv obsahu popela na emise TZL nebylo možné, vzhledem k vysokému obsahu uhlíkatého nedopalu na zachycených částicích.

Dokonalost spalovacího procesu je závislá na poměru primárního a sekundárního vzduchu. Tento poměr je ovlivněn mechanickým nastavením regulačních klappek a jeho optimalizace bez měřicí techniky je v reálném provozu těžko proveditelná. Nastavení poměru bylo při spalovacích testech prováděno dle doporučení výrobců zařízení.

### 3.2. PeCBz a HxCBz

Ve spalinách byly sledovány také emise hexachlorbenzenu (HxCBz) a pentachlorbenzenu (PeCBz), jakožto nového POP dle Stockholmské konvence. Velmi podobné hodnoty EF byly zjištěny při všech spalovacích pokusech (viz Tab. 3). Klíčovým faktorem pro emise chlorovaných látek je obsah Cl v palivu, který byl jak u hnědého uhlí, tak u bukového dřeva velmi podobný. Mírně vyšší EF HxCBz byl zaznamenán jen u spalování bukového dřeva v prohořivacím kotli, což bude pravděpodobně dáno celkově nízkou kvalitou spalování. Překvapivě byl zjištěn vyšší EF HxCBz také pro buk spalovaný ve zplyňovací kotli. Identifikovat příčinu tohoto jevu se zatím nepodařilo.

**Tab. 3 Emisní faktory PeCBz a HxCBz**

kotel		PeCBz (μg/GJ)	HxCBz (μg/GJ)
prohořivací	HU	-	-
	BUK	0,488	2,40
odhořivací	HU	0,796	0,852
	BUK	0,198	0,575

automatický	HU	0,447	0,676
zplyňovací	HU	0,0890	0,524
	BUK	0,694	10,6

### 3.3. PCB a PCDD/F

Stanovené hodnoty emisních faktorů toxického ekvivalentu (I-TEQ) polychlorovaných bifenyly (PCB) a TEQ PCDD/F jsou uvedeny v Tab. 4. Podobně jako u CO či PAU byly i u PCB a PCDD/F zjištěny vyšší emise z obou kotlů starých typů (tj. prohořivacího a odhořivacího). Z novějších kotlů (automatického a zplyňovacího) byly stanoveny emise přibližně o jeden řád nižší. Vliv spalovacího zařízení je tedy nesporný, neboť například emise PCDD/F ze spalování hnědého uhlí v prohořivacím kotli jsou cca 20 x vyšší než ze zplyňovacího kotle. Vliv spalovaného paliva už tak jednoznačný není. U prohořivacího kotle byly zjištěny cca 5 x vyšší emise ze spalování hnědého uhlí než z bukového dřeva. V případě odhořivacího kotle je zjištěný trend opačný a zhruba o 50 % vyšší emise PCDD/F byly zjištěny při spalování bukového dřeva. U odhořivacích kotlů pak byly zjištěné hodnoty EF PCDD/F prakticky totožné pro obě paliva. Relativně podobné hodnoty EF ze spalování obou paliv na jednotlivých kotlích jsou dány také podobným obsahem chloru. Při dříve provedených experimentech s černým polským uhlím s obsahem Cl 0,2 hm. % byly stanoveny podstatně vyšší emise I-TEQ PCDD/F, a to na úrovni 140–2 200 ng/GJ dle použitého typu kotle [8]. Z toho je patrné, že výrazné zvýšení emisí chlorovaných látek lze očekávat například při přidavku odpadu s obsahem chloru ke spalovnému palivu.

**Tab. 4 Emisní faktory I-TEQ PCB a PCDD/F**

kotel		I-TEQ PCB	I-TEQ PCDD/F
		(ng/GJ)	(ng/GJ)
prohořivací	HU	2,46	60,6
	BUK	1,30	11,6
odhořivací	HU	0,575	16,9
	BUK	1,37	24,7
automatický	HU	0,234	3,88
	HU	0,229	3,16
zplyňovací	HU	0,211	3,63

## 4. Závěr

Ze získaných výsledků vyplývá, že v případě polutantů sledovaných v tomto článku je důležitějším faktorem typ kotle, ve kterém je palivo spalováno, než samotný typ paliva. Výjimkou jsou emise TZL, které jsou na starých typech zařízení násobně vyšší ze spalování uhlí než z biomasy.

Emise chlorovaných POP látek byly z obou typů paliv přibližně stejné, což je dáno i velmi podobným obsahem Cl v palivu. Také u emisí těchto látek je důležitým faktorem typ kotle. Platí, že z moderních zařízení

jsou emise chlorovaných POP nižší než ze starých typů zařízení.

### Poděkování

Tato práce byla podporována Ministerstvem životního prostředí ČR – projekt č. SP/1a2/116/07 a Grantovou agenturou ČR – projekt č. 101/09/1464.

### Literatura

- Prevedouros K., Brorström-Lundén E., Halsall C.J., Jones K.C., Lee R.G.M., Sweetman A.J.: Seasonal and long-term trends in atmospheric PAH concentrations: evidence and implications, *Environ. Pollut.* 128, (2004), 17.
- Breivik K., Vestreng V., Rozovskaya O., Pacyna J. M.: Atmospheric emissions of some POPs in Europe: a discussion of existing inventories and data needs, *Environ. Sci. Policy.* 9, (2006), 663.
- Quaß U., Fermann M., Bröker G.: The European Dioxin Air Emission Inventory Project—Final Results. *Chemosphere* 54, (2004), 1319.
- Junninen H., Mønster J., Rey M., Cancelinha J., Douglas K., Duane M. etc.: Quantifying the Impact of Residential Heating on the Urban Air Quality in a Typical European Coal Combustion Region, *Environ. Sci. Technol.* 43, (2009), 7964.
- Lavric E. D., Konnov A. A., De Ruyck J.: Dioxin levels in wood combustion—A review, *Biomass and Bioenergy* 26, (2004), 115.
- Hedman B., Naslund M., Marklund S.: Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from Combustion of Firewood and Pellets in Residential Stoves and Boilers, *Environ. Sci. Technol.* 40, (2006), 4968.
- Šyc M., Horák J., Krpec K., Hopan F., Dej M., Ocelka T., Tomšej T.: Effect of Non-stationary Combustion Phases on Emission Factors of Selected Pollutants and PCDD/F from Domestic Combustion, *Organohalogen Compounds* 72, (2010), 356.
- Horák J., Hopan F., Šyc M., Machálek P., Krpec K., Ocelka T., Tomšej T.: Bilance emisí znečišťujících látek z malých zdrojů znečišťování se zaměřením na spalování tuhých paliv, *Chemické listy*, (2011) v tisku.
- Pekárek V., Punčochář M., Bureš M., Grabic R., Fišerová E.: Effects of sulfur dioxide, hydrogen peroxide and sulfuric acid on the de novo synthesis of PCDD/F and PCB under model laboratory conditions, *Chemosphere* 66, (2007), 1947.
- Horák J., Hopan F., Krpec K., Dej M., Machálek P., Pekárek V., Šyc M., Ocelka T., Tomšej T.: Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů znečišťování a jejich emisní faktory, *Ochrana ovzduší* 21(56), (2008), 38.
- Kinsey J. S., Kariher P. H., Dong Y.: Evaluation of methods for the physical characterization of the fine particle emissions from two residential wood combustion appliances, *Atmospheric Environment* 43, (2009), 4959.

### Summary

*Michal Šyc<sup>a</sup>, Jiří Horák<sup>b</sup>, František Hopan<sup>b</sup>, Kamil Krpec<sup>b</sup>*

*<sup>a</sup>Institute of Chemical Process Fundamentals of the AS CR, v.v.i., Rozvojová 2, 165 02 Prague 6, Czech Republic*

*<sup>b</sup>VSB – Technical University of Ostrava, Energy Research Center, Innovation for Efficiency and Environment, 17.listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava, Czech Republic*

*The comparison of selected pollutants emissions from domestic combustion of biomass and lignite*

Emissions from domestic heating appliances significantly participate in total environmental pollution. To estimate the influence of current trend of fossil fuel substitution by biomass fuels on pollutant emission is therefore desirable. Emissions of CO, PM, and selected POPs from beech and lignite combustion in Czech common types of hot-water boilers are observed in the paper. Moreover, design of boilers itself is discussed there. From the results can be concluded, that design of boilers play the key role in pollutant emissions levels. Significant influence of fuel was not observed; it was not found also due to similar chlorine content in both fuels.