

## Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy

certifikovaná metodika

Pavel Tlustoš a kol.



© Česká zemědělská univerzita v Praze  
Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ  
165 21 Praha-Suchdol  
<http://www.af.czu.cz>

Vydavatel: Česká zemědělská univerzita v Praze

ISBN 978-80-213-2327-8

Praha 2012

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu NAZV č. QI102A207.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

ÚSTAV STRUKTURY A MECHANIKY HORNIN AV ČR, v.v.i.

# **Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy**

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

**Pavel Tlustoš a kol.**

# Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy

## CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Dedikace: Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu NAZV č. QI102A207 „Využití popela ze spalování biomasy jako snadno aplikovatelného šetrného hnojiva, komplexní řešení přínosů a rizik“.

### Kolektiv autorů:

prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc.  
Ing. Pavla Ohecová  
doc. Ing. Jiřina Száková, CSc.  
Ing. Ivana Perná, PhD.  
Ing. Tomáš Hanzlíček  
Ing. Jan Habart, PhD.  
doc. RNDr. Pavel Straka, Dr.Sc.

### Technická spolupráce:

Ing. Jana Najmanová  
Ing. Olga Bičáková, Ph.D.

---

## Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy

Pavel Tlustoš a kol.

Vydání první, 2012

Vydavatelství Česká zemědělská univerzita v Praze

Tisk powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha Suchdol, [www.powerprint.cz](http://www.powerprint.cz)

© Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ

165 21 Praha 6 - Suchdol

tel.: +420 224 382 736

<http://www.af.czu.cz>

ISBN 978-80-213-2327-8

# OBSAH

I. Cíl metodiky .....	1
II. Vlastní popis metodiky .....	2
1. Úvod .....	2
2. Spalování biomasy .....	3
3. Popel ze spalování biomasy .....	6
4. Zdroje popela z různých druhů biomasy .....	7
5. Obsahy živin v popelích ze spalování biomasy .....	7
6. Obsahy rizikových prvků v popelích ze spalování biomasy .....	8
7. Hodnota pH v popelích ze spalování biomasy .....	12
8. Legislativa v ČR .....	12
9. Legislativa ve světě .....	13
10. Ztráta žháním v popelích ze spalování biomasy .....	15
11. Obsahy polycyklických aromatických uhlovodíků v popelích ze spalování biomasy .....	16
III. Srovnání „novosti postupů“ .....	17
IV. Popis uplatnění certifikované metodiky .....	18
V. Ekonomické aspekty .....	18
VI. Závěr .....	19
VII. Seznam použité související literatury .....	21
VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice .....	22
IX. Dedikace .....	22

## I. Cíl metodiky

---

Rozvoj využití obnovitelných zdrojů energie částečně omezuje závislost národního hospodářství na importech energetických zdrojů a má významný vliv na omezení tvorby skleníkových plynů a v neposlední řadě přispívá i k rozvoji zaměstnanosti jednotlivých regionů.

Jedním z nejčastěji využívaných zdrojů obnovitelné energie je biomasa, která má poměrně široké využití lišící se svoji účinností. Spalování biomasy patří mezi klasické techniky využívající nahromaděné energie k produkci tepla. Nové technologie umožnily vysokou účinnost využití produkované energie při relativně snadné finanční dostupnosti. Při spalování biomasy vzniká popel, jehož složení je odvislé od složení vstupní suroviny i od technologie použité pro spalování. Znečištěná biomasa či nevhodná technologie znamenají jednak nižší energetickou produkci a zpravidla i horší kvalitu popela.

Rostliny rostoucí na lesní či zemědělské půdě vytváří nejen organickou hmotu, ale ze stanoviště odebírají i živiny potřebné ke svému růstu, které se po spálení většinou kumulují ve formě nespalitelného zbytku (popela). Vhodné využití popelů, které vznikají jako odpadní produkt po spálení biomasy, by bylo přínosem pro provozovatele spaloven, neboť v současné době jsou tyto materiály v České republice skládkovány a poplatky za jejich uložení provoz těchto zařízení prodražují. Nedochozí tak jenom k rostoucím nákladům na výrobu energie, ale i k významnému znehodnocování živin, tolik potřebných při tvorbě biomasy a obnově půdní úrodnosti. Vezmeme-li v úvahu zvyšující se počet instalovaných zařízení na spalování biomasy, a tedy i nárůst produkce popelů (z 20 tis. t v roce 2008 na 70 tis. t v roce 2010) je nutné se tímto problémem začít seriózně zabývat.

Jednou z možností využití popelů ze spalování biomasy je tedy jejich aplikace na zemědělskou půdu, kdy dojde k návratu živin a k úpravě půdní reakce. Aplikace popelů je možná pouze za předpokladu, že nebude ohrožena kvalita půdy, pěstovaných plodin a zdraví obyvatel.

Cílem předkládané metodiky tedy je na základě zjištěných výsledků analýz popelů z více než 40 zdrojů v České republice tyto popele kategorizovat dle vstupní suroviny a vytipovat vhodné popele pro použití na zemědělské půdě, což by znamenalo významný posun ke snižování nákladů spaloven, vstup nových provozoven na trh a snadnější dodržování republikových závazků při naplňování podílu produkce energie z obnovitelných zdrojů. Další výhodou nalezení uplatnění pro tyto materiály, z environmentálního hlediska je omezení skládkování a podpora recyklace živin.

Metodika v ucelené podobě předkládá postup při výběru vhodných popelů pro zemědělské účely, aby byl čtenář schopen určit použitelnost daného materiálu.

## II. Vlastní popis metodiky

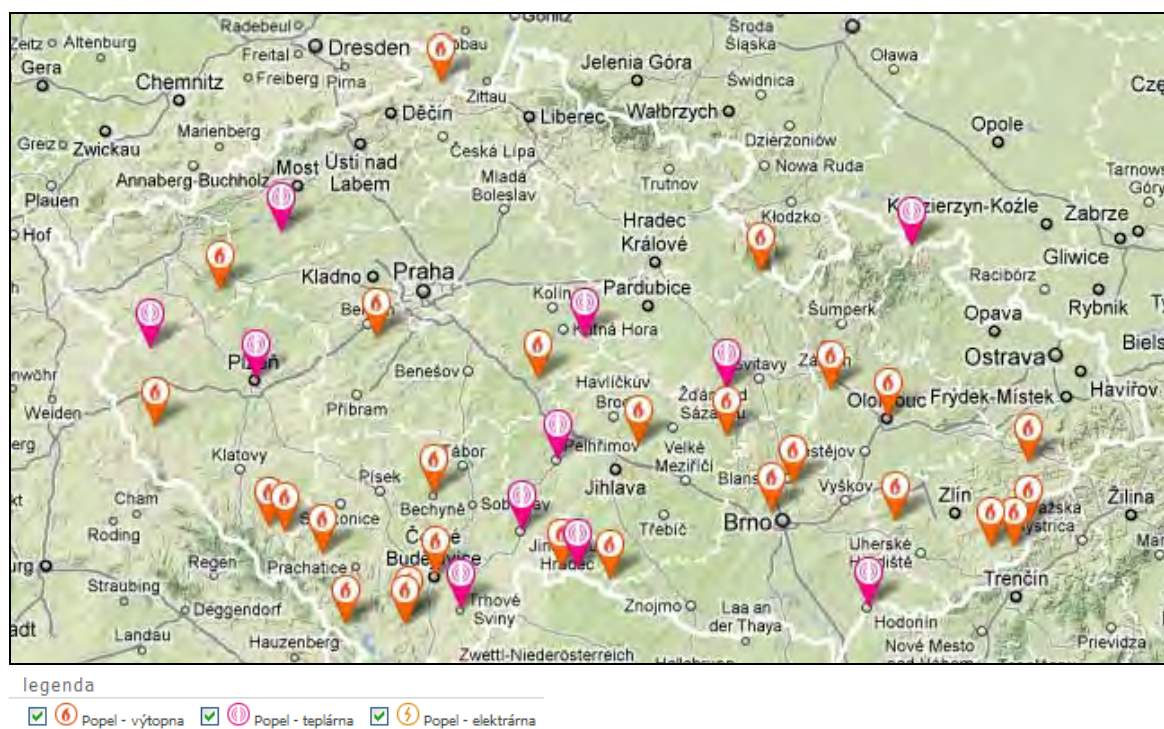
Metodika kategorizace popelů ze spalování biomasy zahrnuje sledování vlastností jednotlivých popelů, lišících se zejména použitou technologií, spalovaným vstupním materiálem a druhem popela (roštový, úletový).

### 1. Úvod

Obnovitelné zdroje energie, tedy i biomasa, hrají klíčovou roli v současné globální strategii pro snížení emisí skleníkových plynů. Globální oteplování úzce spojené s rostoucí produkcí skleníkových plynů se ukázalo jako kritický problém udržitelného rozvoje, a proto se nařízením Evropské komise stanovují závazné cíle pro členské státy Evropské unie ke snížení emisí skleníkových plynů. Nyní je pro Českou republiku aktuální závazek snížení emisí skleníkových plynů o 20 % a nárůst podílu obnovitelných zdrojů energie na celkové spotřebě energie na 13 % do roku 2020 (European Parliament and Council, 2009).

V ČR je spalování biomasy využíváno hlavně pro výrobu tepla a teplé vody, ale v poslední době se rozšiřuje i výroba elektrické energie. Mezi zdroje biopaliv se v České republice zařazuje směsná dřevní štěpka, piliny, kůra, obilná a řepková sláma a některé speciální zdroje, jako jsou například rychle rostoucí dřeviny, šťovík, atp. V některých provozovnách, typu pila nebo výroba nábytku, dochází ke spalování vlastního odpadu z výroby, tedy kůry, pilin, odřezků nebo vadných výrobků (MPO, 2010).

Obr. 1: Mapa producentů popela z biomasy



Zdroj: Mapa producentů popela z biomasy, CZ Biom, 2011, [www.biom.cz](http://www.biom.cz).

## 2. Spalování biomasy

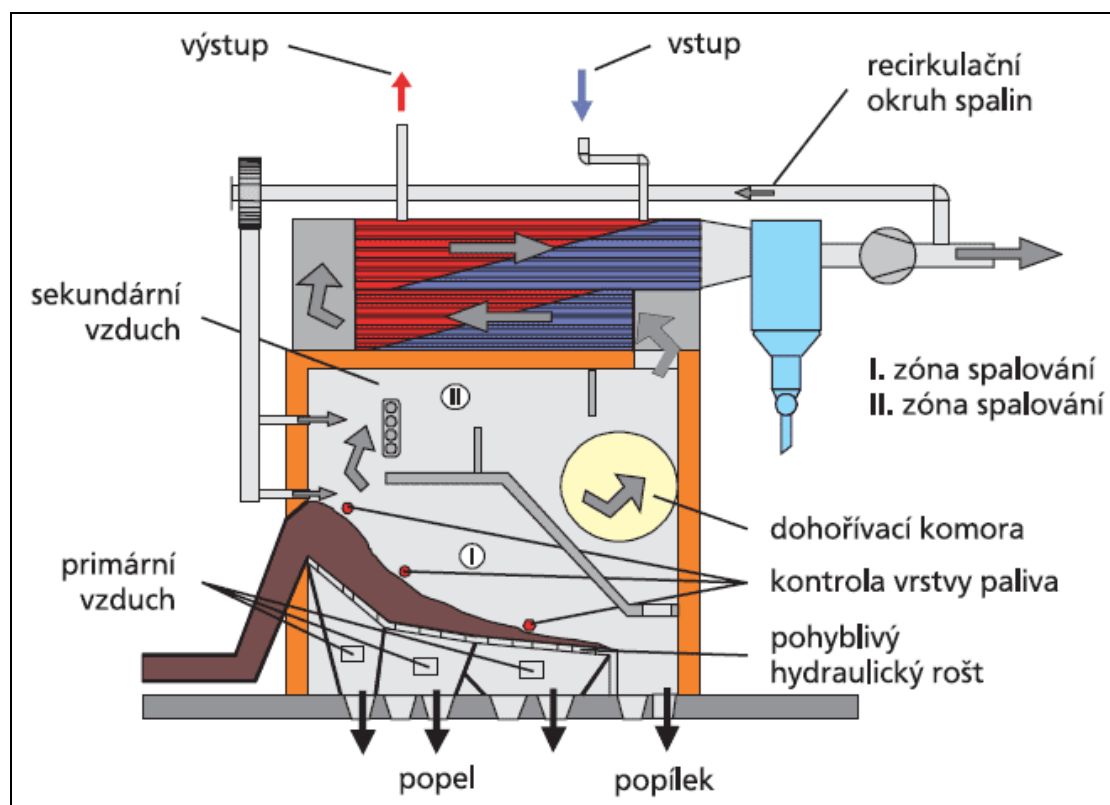
Spalovací technologie představují přibližně 90 % celkového zisku energie z biomasy. Výběr a design zařízení na spalování biomasy je primárně ovlivněn charakteristikou paliva, environmentálními limity, pořizovacími náklady a velikostí zařízení. Mezi důležité vlastnosti biomasy, které nás zajímají při jejím zpracování pro energetické účely, řadíme především vlhkost, výhřevnost, podíl uhlíku a těkavých látek, obsah popela/residuí, obsah alkalických kovů a podíl prchavé hořlaviny (McKendry, 2002; Malaťák a kol., 2010). Voda a popel tvoří nehořlavou část paliva a obě tyto složky snižují výhřevnost paliva. Svou přítomností v palivu přímo ovlivňují konstrukci spalovacích zařízení a při provozu bývají mnohdy zdrojem četných obtíží, z nichž lze uvést např. korozi či znečištění zařízení (Malaťák a kol., 2010; Werkelin et al., 2010). Požadavky jsou kladeny také na nejvyšší možnou redukci emisí a účinnost zařízení. Existuje několik průmyslových spalovacích systémů, které lze v podstatě rozdělit mezi spalování na pevném loži, spalování na fluidním loži a prachové spalování (Rosillo-Calle et al., 2006).

### 2.1. Spalování na roštu

Tento způsob spalování zajišťuje, pokud je správně navržen a řízen, homogenní distribuci paliva a lože ze žhavých uhlíků po celém povrchu roštu, což je důležité z hlediska rovnoměrného zásobování vzduchem. Nerovnoměrný přísun vzduchu může způsobovat tvorbu strusky, vyšší podíl úletového popela a zvýšenou potřebu vzduchu nutného pro kompletní spálení, což vyúsťuje ve ztráty tepla. Spalovací teploty se pohybují mezi 500 – 900 °C.

Tato technologie je vhodná pro biomasu s vysokým obsahem vlhkosti, různou velikostí částic a vysokým obsahem popela. Ke spalování lze použít rozličné dřevní směsi, ale není vhodné mísit paliva ze dřeva a slámy, obilovin či trávy z důvodu jejich odlišného chování při spalování, nízké vlhkosti a nízkého bodu tání popela (Loo and Koppejan, 2007).

Obr. 2: Schéma technologie spalování biomasy na roštu v Poličce



Zdroj: <http://www.schiestl.cz/content.php?pid=3>.

Spalování na roštu je v současné době v ČR nejrozšířenějším způsobem spalování biomasy.

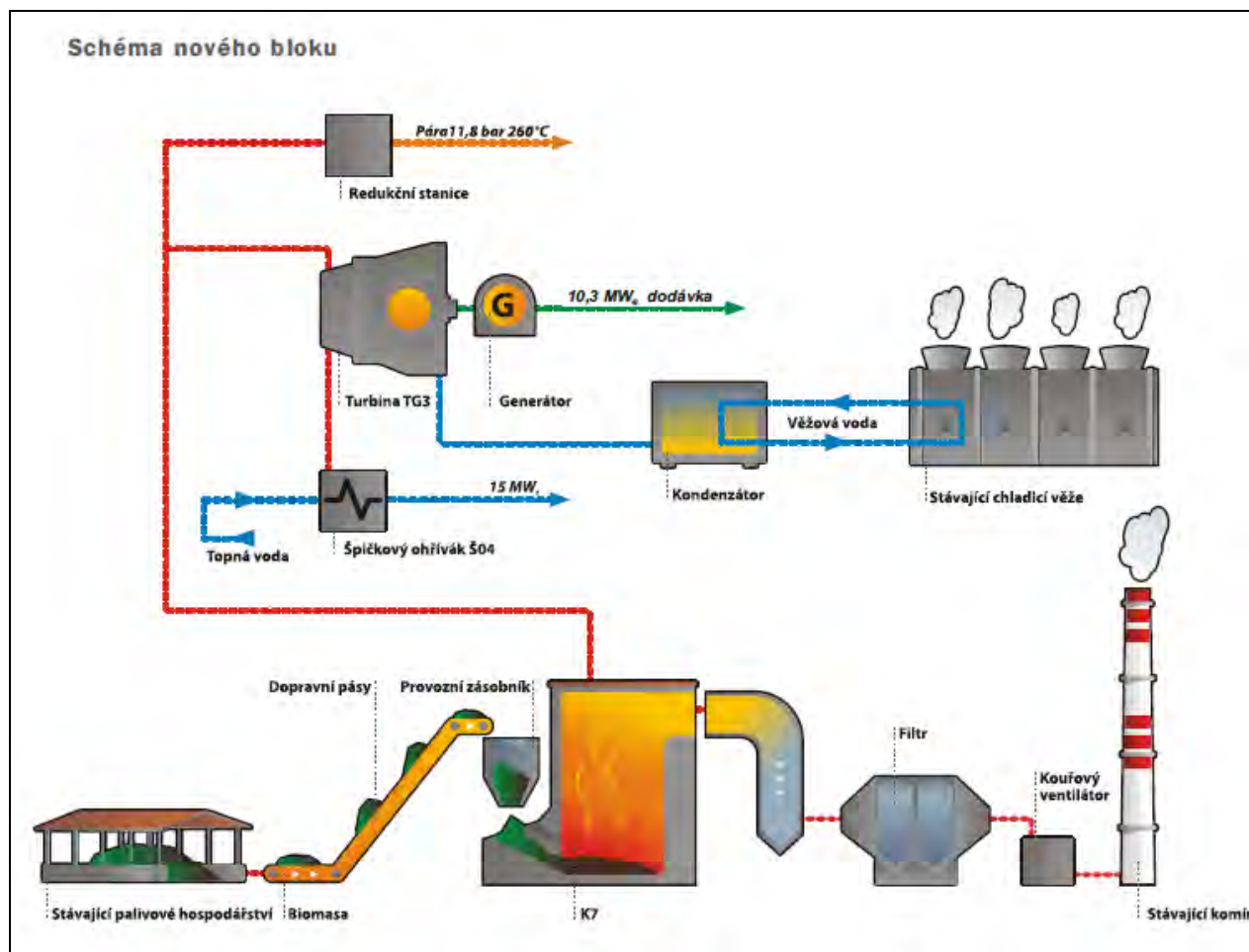
## 2.2. Spalování ve fluidním loži

Fluidním ložem se rozumí suspenze horkého, inertního a granulovaného materiálu, který zaujímá 90 – 98 % ze směsi paliva a materiálu lože, a je tvořeno zejména křemičitým pískem a dolomitem. Spalovací vzduch vstupuje do spalovacího zařízení zespodu a uvádí do pohybu horký materiál s biomasou. Intenzivní přenos tepla a promísení poskytuje dobré podmínky pro kompletní spálení při nízkém přebytku vzduchu. Spalovací teplota se udržuje mezi 650 – 900 °C, aby nedocházelo ke spékání popela.

Díky dostatečnému promísení materiálu je možné spalovat různé směsi biomasy, limitující pro tuto technologii je velikost spalovaných částic (do 80 mm) a obsah nečistot v palivu. Nevhodná je také biomasa s alkalickým pH (sláma, byliny) z důvodu možné aglomerace popela (Loo and Koppejan, 2007). Pokud je však spalovací zařízení vhodně technicky uzpůsobeno, lze spalovat také slámu, nebo seno. Technická úprava spočívá především ve snížení teploty na roštu. Snížením teploty je minimalizováno riziko tavení a spékání popelovin. Teoreticky lze spékání popela omezit také přidávkou aditiv, což se však v praxi zatím nepoužívá (Voláková, 2011, osobní sdělení).



Obr. 3: Schéma technologie fluidního spalování biomasy v Plzni



Zdroj: <http://www.enviros.cz/novinky/2008/seminare/2008-08-06-Sbornik-workshop-BioE-COFITECK.pdf>.

Fluidní technologie spalování biomasy využívají v České republice provozovny v Plzni a Hodoníně.

### 2.3. Prachové spalování

V tomto druhu spalovacího systému jsou paliva jako piliny nebo jemné hobliny pneumatically vstříkovány, společně se vzduchem, do pece a vzniká vírové proudění. Maximální velikost spalovaných částic musí být udržována mezi 10 – 20 mm a vlhkost by neměla překročit 20 %, tudíž tato technologie nalézá uplatnění zejména při zpracování jemného dřevního odpadu ze zpracování např. dřevotřískových desek (Loo and Koppejan, 2007). V praxi se však uplatňuje výhradně při spalování uhlí, které lze na rozdíl od biomasy velmi dobře drtit na požadovanou velikost.

### 3. Popel ze spalování biomasy

Hlavními faktory, které ovlivňují kvalitu popela, jsou složení biomasy a podmínky spalování (Oberberger et al., 1997).

Množství popela v palivech z biomasy se pohybuje v rozmezí 1 – 6 % (Johansson et al., 2003). Dřevo obvykle obsahuje relativně nižší množství popela (0,3 %), zatímco výrazně vyšší hodnoty nalézáme v zrně (2 %), kůře (4 - 5 %), slámě (5 %) a trávách (7 %) (Biedermann and Oberberger, 2005).

V zařízeních na spalování biomasy můžeme obvykle rozlišit 2 hlavní druhy popelů: roštový a úletový. Roštový popel se vyskytuje na spalovacím roštu a v primární spalovací komoře. Tato frakce se často mísí s minerálními nečistotami obsaženými v biomase, jako je např. písek, kameny nebo zemina, což může způsobit, zejména při spalování kůry na pevném loži, tvorbu strusky (v důsledku snížení bodu tání) a jejich spečení do roštového popela. Úletový popel obsahuje jemné, zejména anorganické částice obsažené ve spalinách a je zpravidla zachytáván na elektrostatických nebo textilních filtrech (Biedermann and Oberberger, 2005).

Hlavními živinami, které nalézáme v popelích jsou draslík (5 – 14,5 %), hořčík (4 – 6,5 %) a vápník (7 - 45 %). Dřevo a kůra jsou bohaté na vápník, kdežto popele ze slámy a obilovin obsahují vysoké množství draslíku (Oberberger et al., 1997; Biedermann and Oberberger, 2005). Fosfor a mikroprvky jsou přítomny v menších a variabilních množstvích (okolo 1 %). Dusík popele postrádají (Kuba et al., 2008), avšak v úletovém popelu velkých zařízení, která používají technologie katalytické redukce NO<sub>x</sub>, se mohou vyskytovat menší množství močoviny nebo amoniaku, které se do procesu přidávají jako redukční činidlo.

Těžké kovy, významné z hlediska životního prostředí (Cd a Zn), jsou obsaženy zejména v úletovém popelu, zatímco živiny (Ca, K, Mg a P) se nacházejí převážně v popelu roštovém. Důvodem vyššího obsahu těžkých kovů v úletovém popelu je odpaření a následná kondenzace a navázání těkavějších těžkých kovů (Cd a



*Obr. 4: Roštový popel ze spalování dřevní biomasy*

*Zdroj: <http://www.drevnypopel.sk>*

Zn) na povrchu částic úletového popela (Biedermann and Oberberger, 2005).

Dalším omezením pro využití popelů je vysoká hodnota pH, způsobená vysokým obsahem alkalických kovů v popelích (Kuba et al., 2008).

#### 4. Zdroje popela z různých druhů biomasy

V rámci projektu bylo zmonitorováno 33 provozoven spalujících biomasu, přičemž bylo odebráno 53 vzorků popelů (22 vzorků roštového popela, 20 vzorků úletového popela a 11 vzorků směsného popela). Převažovaly vzorky ze spalování dřevních materiálů – štěpka (40), kůra (1), piliny (4); popele ze spalování slámy byly zastoupeny pouze 8 vzorky. Veškerá spalovaná biomasa pocházela výhradně z území České republiky.

#### 5. Obsahy živin v popelích ze spalování biomasy

Tab. 1: Průměrné celkové obsahy a mediány nejvýznamnějších živin u hodnoceného souboru popelů (%)

popel	surovina	P %		K %		Ca %		Mg %	
		P $\bar{x}$	P $\tilde{x}$	K $\bar{x}$	K $\tilde{x}$	Ca $\bar{x}$	Ca $\tilde{x}$	Mg $\bar{x}$	Mg $\tilde{x}$
roštový	dř.štěpka	1,64	1,53	7,14	5,76	21,19	19,34	1,98	2,24
úletový	dř.štěpka	1,35	1,32	8,50	6,52	19,33	18,59	1,59	1,75
směsný	dř.štěpka	1,04	1,02	4,47	4,42	26,90	26,83	2,50	2,42
	sláma	1,79	1,71	25,75	25,68	10,35	10,29	1,62	1,55

$\bar{x}$  - aritmetický průměr;  $\tilde{x}$  - medián

Celkové obsahy hlavních živin se v popelích pohybovaly následovně:

- **fosfor** byl v popelích zastoupen mezi 1 - 2 %, tuto hranici mírně převyšuje pouze směsný popel ze spalování slámy. Saarsalmi et al. (2001) a Hytönen (2003) zaznamenali ve svých výzkumech obsah fosforu v popelích ze dřeva mezi 0,9 – 1,7 %. Obsahy okolo 1 % v popelích ze dřeva uvádí například i Patterson et al. (2004), přičemž obecně lze říci, že popele z tvrdého dřeva obsahují více fosforu než popele z měkkého dřeva (Pitman, 2006). Obsah fosforu výrazněji převyšující 1 % zaznamenali Sander and Andrén (1997), podobně jako my, v popelích ze spalování slámy (1,3 – 2,1 %),
- nejvyšší průměrné celkové obsahy **draslíku** jsme našli u směsných popelů ze spalování slámy (25,75 %), zbylé typy popelů obsahovaly přibližně třetinová množství této živiny (4,47 – 8,50 %). Vyšší obsah draslíku v popelích ze slámy je způsoben vyšším obsahem této živiny přímo ve vstupní surovině - slámě oproti dřevu. Zvýšený podíl draslíku v úletovém popelu (8,50 %) ze spalování dřevní štěpky mohl být způsoben sublimací, následným zchlazením a kondenzací KCl

na jemných prachových částicích, které jsou zachycovány filtrem (Sander and Andrén, 1995),

- výraznější podíl **vápníku** byl zaznamenán u popelů ze spalování dřevní štěpky (19,33 – 26,90 %) oproti spalování slámy (10,35 %), neboť ve dřevní hmotě je vápník déle akumulován. Vyšší obsahy vápníku v popelích ze spalování dřevní štěpky vedou také ke zvýšeným hodnotám pH u těchto popelů (viz tab. 7) a mohly by být využity jako vhodný materiál pro úpravu půdní reakce zejména na silně kyselých půdách (Oberberger and Supancic, 2009),
- průměrný obsah **hořčíku** se u popelů ze spalování biomasy pohyboval v rozmezí 1,59 – 1,98 %, přičemž nepatrně vyšších hodnot dosahovaly popele ze spalování dřevní štěpky. Literatura uvádí také obsahy hořčíku v popelích ze spalování biomasy okolo 1 %, vyšší hodnoty byly zjištěny u popelů z řepkové slámy (2,1 %) (Hytönen, 2003) a obilí (10,4 %) (Eichler et al., 2008).

Kdybychom chtěli zhodnotit celkový obsah živin v popelích ze spalování biomasy, lze říci, že nejvíce přínosným materiálem pro půdu z hlediska obsahu draslíku by byl směsný popel ze spalování slámy a z hlediska obsahu vápníku popele ze spalování dřevní štěpky, které obsahovaly průměrně nejvyšší podíly této živiny. Fosfor a hořčík jsou cenné živiny, kterých je v našich půdách nedostatek, a ačkoli nejsou v popelích ze spalování biomasy zastoupeny tak výrazně jako vápník nebo draslík, měli bychom se zasloužit o jejich navrácení do ekosystému. Vzhledem ke zjištěnému zastoupení živin v popelích je proto skládkování těchto materiálů jednoznačně v rozporu s myšlenkou trvale udržitelného rozvoje.

## 6. Obsahy rizikových prvků v popelích ze spalování biomasy

Tab. 2: Průměrné celkové obsahy a mediány vybraných rizikových prvků u hodnoceného souboru popelů (mg/kg)

popel	surovina	Cd (mg/kg)		Pb (mg/kg)		As (mg/kg)		Cr (mg/kg)	
		Cd $\bar{x}$	Cd $\tilde{x}$	Pb $\bar{x}$	Pb $\tilde{x}$	As $\bar{x}$	As $\tilde{x}$	Cr $\bar{x}$	Cr $\tilde{x}$
roštový	dř.štěpka	0,66	0,43	33,55	21,07	18,10	18,43	104,23	86,79
úletový	dř.štěpka	9,26	6,77	80,26	34,62	25,53	21,29	65,68	60,00
směsný	dř.štěpka	5,15	3,22	26,65	20,49	15,16	15,49	55,88	44,46
	sláma	0,50	0,45	8,38	7,13	7,77	4,84	26,19	25,88

Pokud porovnáme výsledky našich analýz (tab. 2) s limity danými Vyhláškou č. 271/2009 Sb. pro pomocnou půdní látku (tab. 8), zjistíme, že hodnoty **kadmia** u roštového popela a směsného popela ze slámy se průměrně pohybují výrazně pod limitem 1 mg Cd/kg (platí i pro použití sedimentů na zemědělské půdě – tab. 10) a tento prvek tedy ve zmíněných popelích nepředstavuje žádné ohrožení při aplikaci na půdu. Nízký obsah Cd v roštovém popelu ze spalování dřevní hmoty (0,4 mg/kg) potvrzují například také Haraldsen et al. (2011). Naopak úletový a směsný popel z dřevní štěpky přesahují hranici stanovenou zákonem 9 krát, resp. 5 krát, což jejich použití značně omezuje. Hodnotu Cd 9 mg/kg v úletovém popelu ze spalování dřevní biomasy uvádí též Berra et al. (2011). Hranice 5 mg Cd/kg stanovená u upravených kalů v případě jejich aplikace na zemědělskou půdu (tab. 9) není již tak přísná, nicméně vyhovovaly by jí pouze také již zmíněné 2 skupiny popelů.

Novelizací vyhlášky č. 474/2000 Sb. na nyní platnou vyhlášku č. 271/2009 Sb. došlo mimo jiné ke zpřísnění limitu pro obsah **olova** v pomocné půdní látce ze 30 mg/kg na 10 mg/kg (tab. 8), a tudíž by dle našich výsledků vyhovovaly pouze směsné popele ze spalování slámy ( $\text{Pb } \bar{x} = 8,38 \text{ mg/kg}$ ). Ostatní skupiny (popele ze spalování dřevní štěpky) převyšují v obsahu olova platnou normu 2 krát až 3,5 krát. Nejvyšší riziko představuje opět úletový popel ze spalování dřevní štěpky. Obsah Pb v dřevním popelu převyšující 30 mg/kg zaznamenal také Perucci et al. (2008) – 44 mg Pb/kg. Limitní obsah olova v sedimentech, resp. upravených kalech byl stanoven na 100, respektive 200 mg Pb/kg (tab. 9 a 10), což je oproti pomocné půdní látce řádově mírnější ustanovení, které by splňovaly veškeré sledované skupiny popelů (průměrné hodnoty).

U **arsenu** byl našimi zákonodárci pro pomocnou půdní látku stanoven limit 10 mg/kg (tab. 8), který splňují opět pouze směsné popele ze spalování slámy ( $\text{As } \bar{x} = 7,77 \text{ mg/kg}$ ). Nejvýraznější překročení stanovené hodnoty nalzáme znovu u úletového popele ( $\text{As } \bar{x} = 25,53 \text{ mg/kg}$ ), kde byl limit překročen 2,5 krát. V porovnání s výsledky Biedermann and Obernberger (2005), kteří zaznamenali obsahy As v popelích ze spalování dřevní hmoty i slámy mezi 0,1 – 0,2 mg/kg, jsou obsahy As v námi hodnocených vzorcích popelů nesrovnatelně vyšší. Upravené kaly i sedimenty byly shodně omezeny hodnotou 30 mg As/kg (tab. 9 a 10), které by vyhovovaly všechny průměrné obsahy arsenu v našich vzorcích popelů.

**Chrom**, jehož maximální obsah v pomocné půdní látce byl omezen 50 mg/kg (tab. 8) v našem případě vyhovuje směsným popelům ze spalování slámy ( $\text{Cr } \bar{x} = 26,19 \text{ mg/kg}$ ). Sander and Andrén (1995) ve své práci uvádí obsah chromu ve směsném popelu ze spalování slámy na úrovni 33,6 mg/kg, což by bylo taktéž pod uvedeným limitem. Poprvé lze z tabulky vyznat největší potenciální riziko v podobě roštových popelů, které limit Cr překračují průměrně 2 krát. Legislativa upravuje maximální povolený obsah chromu v upravených kalech a sedimentech totožně hodno-

tou 200 mg Cr/kg (tab. 9 a 10), a tudíž by i této podmínce v našem případě vyhověly veškeré sledované skupiny popelů (průměrné hodnoty).

Jestliže bychom chtěli celou monitorovanou skupinu zhodnotit, můžeme konstatovat, že k použití na zemědělskou půdu jsou ve vztahu k platné legislativě ČR pro pomocné půdní látky zcela vyhovující směsné popele ze spalování slámy, u popelů ze spalování dřevní biomasy by jejich použití nebylo vhodné, neboť obsahy sledovaných rizikových prvků jsou více proměnlivé a v mnoha případech normu překračují (viz také tab. 3). Porovnáním s normami pro použití upravených kalů a sedimentů na zemědělskou půdu, jsme dospěli k závěru, že z výše hodnocených čtyř rizikových prvků by mohl být jediným problémem obsah kadmia v úletovém a směsném popelu ze spalování dřevní štěpky. Zbývající zjištěné průměrné obsahy rizikových prvků v jednotlivých skupinách popelů normám zcela vyhovují.

*Tab. 3: Poměry vyhovujících a nevyhovujících vzorků popelů platné legislativě ČR pro pomocné půdní látky (Vyhláška č. 271/2009 o stanovení požadavků na hnojiva)*

popel	surovina	Cd		Pb		As		Cr	
		✓	X	✓	X	✓	X	✓	X
roštový	dř.štěpka	15	3	2	16	5	13	2	16
úletový	dř.štěpka	0	16	0	16	5	11	5	11
směsný	dř.štěpka	1	3	0	4	2	2	2	2
	sláma	4	1	4	1	4	1	5	0

✓ - vyhovuje      X - nevyhovuje

Pro vybrané rizikové prvky byl hodnocený soubor popelů rozdělen na vzorky popelů z dané skupiny, které limity pro použití pomocných půdních látek, upravených kalů či sedimentů splňují (označeno symbolem ✓) a mohly by být tedy případně na půdu aplikovány a na vzorky, které zmíněnou normu překračují a jejich použití v zemědělství je v tuto chvíli vyloučeno (označeno symbolem X) (tab. 3, 4 a 6).

*Tab. 4: Poměry vyhovujících a nevyhovujících vzorků popelů platné legislativě ČR pro použití upravených kalů a sedimentů na zemědělské půdě*

popel	surovina	Cd				Pb				As				Cr			
		K		S		K		S		K		S		K		S	
		✓	X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	X
roštový	dř.štěpka	18	0	15	3	18	0	18	0	15	3	15	3	16	2	16	2
úletový	dř.štěpka	7	9	0	16	14	2	14	2	11	5	11	5	16	0	16	0
směsný	dř.štěpka	2	2	1	3	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
	sláma	5	0	4	1	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0

K - kal; S - sediment

Tab. 5: Průměrné celkové obsahy a mediány vybraných rizikových prvků u hodnoceného souboru popelů (mg/kg)

popel	surovina	Cu $\bar{x}$	Cu $\tilde{x}$	Ni $\bar{x}$	Ni $\tilde{x}$	Zn $\bar{x}$	Zn $\tilde{x}$
roštový	dř.štěpka	186,73	108,92	64,90	53,51	224,61	125,76
úletový	dř.štěpka	107,41	95,79	34,97	34,88	1040,65	386,79
směsný	dř.štěpka	975,01	84,84	26,60	23,37	826,71	236,13
	sláma	32,82	33,87	13,91	17,07	72,64	57,66

Kromě výše uvedených rizikových prvků byly hodnoceny též Cu, Ni a Zn (tab. 5), jejichž limitní hodnoty jsou upraveny ve vyhláškách pro použití upravených kalů a sedimentů na zemědělské půdě (tab. 9 a 10). Ostatní rizikové prvky upravené zmíněnými vyhláškami nebyly v našem výzkumu sledovány.

Průměrný obsah **mědi** v našich vzorcích by zcela vyhovoval normě pro upravené kaly (500 mg Cu/kg sušiny). Přestože je překročena u směsných popelů ze spalování dřevní štěpky, musíme vzít v úvahu hodnotu mediánu, který je výrazně pod stanovenou hranicí, a je tudíž jasné, že vysokou průměrnou hodnotu (975 mg Cu/kg) způsobil extrémní vzorek. Limit u sedimentů byl pro měď stanoven na 100 mg Cu/kg sušiny, který by splňovaly pouze popele ze spalování slámy.

Limitní obsah **niklu** v upravených kalech, respektive sedimentech byl upravenou hodnotou 100, respektive 80 mg Cu/kg sušiny, což splňují všechny průměrné obsahy niklu v námi hodnoceném souboru popelů ze spalování biomasy.

Maximální obsah **zinku** v upravených kalech je omezen velmi mírně (2500 mg Zn/kg sušiny), a proto by veškeré průměrné hodnoty našich vzorků této vyhlášce vyhověly. Ovšem obsah zinku v sedimentech je sledován přísněji (max. 300 mg Zn/kg sušiny), a tudíž by z tohoto hlediska bylo možné použít na zemědělskou půdu pouze roštové popele ze spalování dřevní štěpky a směsné popele ze spalování slámy.

Tab. 6: Poměry vyhovujících a nevhovujících vzorků popelů platné legislativě ČR pro použití upravených kalů a sedimentů na zemědělské půdě

popel	surovina	Cu				Ni				Zn			
		K		S		K		S		K		S	
		✓	X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	X
roštový	dř.štěpka	16	2	6	12	15	3	15	3	18	0	15	3
úletový	dř.štěpka	16	0	9	7	16	0	16	0	14	2	4	12
směsný	dř.štěpka	3	1	3	1	4	0	4	0	4	0	3	1
	sláma	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0

## 7. Hodnota pH v popelích ze spalování biomasy

Tab. 7: Průměrné hodnoty a mediány pH v popelích ze spalování biomasy

popel	surovina	pH	
		$\bar{x}$	$\tilde{x}$
roštový	dř.štěpka	12,16	12,27
úletový	dř.štěpka	12,12	12,37
směsný	dř.štěpka	11,84	11,93
	sláma	11,52	11,40

Popel ze spalování biomasy je silně zásaditý materiál, což potvrzují i naše výsledky, u nichž se hodnoty pH nacházely průměrně v rozmezí 11,52 – 12,16. Díky uvedeným vysokým hodnotám pH by mohl být tento materiál mimo jiné použit pro úpravu půdní reakce namísto vápnění. Nejnižší alkalitu vykazoval směsný popel ze spalování slámy ( $\bar{x} = 11,52$ ).

## 8. Legislativa v ČR

Energetickým využitím biomasy vznikají popele, které podle legislativních předpisů ČR spadají do skupiny „Ostatní odpad“ (10 01 01 kotelní prach, 10 01 03 popílek ze spalování rašeliny a neošetřeného dřeva). Ovšem vzhledem ke strategickým dokumentům EU (např. Rámcová směrnice o odpadech (98/2008/ES) preferuje materiálové využití před tzv. odstraněním odpadů) by bylo bezesporu vhodnějším a žádoucím řešením upřednostnit zhodnocení a využití zmíněných materiálů před skládkováním.

Popele explicitně nejsou v naší legislativě zmíněny, a proto k jejich aplikaci je nutné najít nebo vytvořit legislativní oporu. V případě, že bude stanovena nová norma, měla by mimo jiné vycházet z bilance dávky živin a vnosu rizikových prvků na půdu, popř. by měl být přijat obecnější předpis, který bude omezovat celkový vnos rizikových prvků do půdy za určité sledované období.

K účelům uvádění do oběhu, skladování a používání hnojiv, pomocných půdních látek, pomocných rostlinných přípravků a substrátů slouží v současné době v České republice zákon č. 9/2009 Sb., přičemž limitní hodnoty rizikových prvků upravuje Příloha č. 1 k vyhlášce č. 271/2009 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva. Jednou z možností, a asi nejvíce vhodnou, je porovnání složení popelů s limitními hodnotami dle požadavků skupiny b) minerální hnojiva s fosforečnou složkou, u nichž je hmotnostní zlomek celkového fosforu jako  $P_2O_5$  menší než 5 %, ostatní minerální hnojiva neobsahující fosfor, pomocné půdní látky, pomocné rostlinné přípravky (tab. 8). Dalšími možnými variantami je porovnat obsahy rizikových prvků v popelích ze spalování biomasy s normami pro použití upravených kalů či sedimentů na zemědělské půdě (tab. 9 a 10).



Tab. 8 : Limitní hodnoty rizikových prvků dle Přílohy č. 1 k vyhlášce č. 271/2009 Sb.

mg/kg hnojiva, pomocné půdní látky, pomocného rostlinného přípravku				
Cd	Pb	Hg	As	Cr
1	10	1,0	10	50

Tab. 9: Limitní hodnoty rizikových prvků v kalech (mg/kg sušiny) dle Přílohy č. 1 k vyhlášce č. 504/2004 Sb.

As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
30	5	200	500	4	100	200	2500

Tab. 10: Limitní hodnoty rizikových prvků v sedimentu (mg/kg sušiny) dle Přílohy č. 1 k vyhlášce č. 257/2009 Sb.

As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
30	5	1	30	200	100	0,8	80	100	180	300

Limitní obsahy polycyklických aromatických uhlovodíků upravuje zákon o hnojivech pouze ve Vyhlášce č. 257/2009 Sb., o používání sedimentů na zemědělské půdě pro sedimenty ( $\Sigma$  13 PAU 6 mg/kg sušiny) a půdu, na kterou mají být sedimenty aplikovány ( $\Sigma$  13 PAU 1 mg/kg sušiny).

## 9. Legislativa ve světě

Porovnáním legislativy platné v ČR s předpisy vybraných států Evropy a USA pro použití popela (popř. půdní pomocné látky – ČR, Slovensko) na zemědělské nebo lesní půdě zjistíme, že tato vybraná česká norma pro minerální hnojiva je jednoznačně nejpřísnější s nejnižšími limity pro obsah rizikových prvků.

Tab. 11: Limitní obsahy rizikových prvků pro použití hnojiva (popelé) na zemědělskou a lesní půdu ve vybraných státech Evropy a v USA (mg/kg)

	ČR <sup>1)</sup> zem.	Sloven- sko <sup>1)</sup> zem.	Ra- kousko zem.	Dánsko zem./lesy	Finsko		Švédsko lesy	USA <sup>2)</sup>
					zem.	lesy		
As	10	10	20		25	30	30	41
B							800	
Cd	1	2	8	5/15	1,5	17,5	30	39
Cr	50	100	250	100	300	300	100	3000
Cu		200	250		600	700	400	1500
Hg	1	1		0,8	1	1	3	17
Ni		50	100	30/60	100	150	70	420
Pb	10	100	100	120	100	150	300	300
Se		5						100
V			100				70	
Zn		400	1500		1500	4500	7000	2800

<sup>1)</sup> půdní pomocná látka <sup>2)</sup> bioodpady

### Další specifikace použití popela:

Vybrané státy Evropy mají ve svých legislativách, vytvořených speciálně pro využití popela ze spalování biomasy jako hnojivého materiálu, kromě maximálních přípustných obsahů rizikových prvků zanesena některá další omezení pro použití popela z biomasy na půdě, z nichž nejčastěji je určena maximální aplikační dávka popela, minimální obsahy živin a analýzy polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU), jestliže ztráta žiháním překročí hodnotu 5 %.

#### **Rakousko**

- pouze popel z neošetřeného dřeva
- LOI (ztráta žiháním) > 5 % → analýzy PAU
- max. 2 % příměs do kompostu
- max. 3g Cd/ha/rok
- max. dávka 2t/ha/rok na zem. půdy; 1,5t/ha/rok na trvalé travní porosty

#### **Dánsko**

- popel ze dřeva pouze pro lesy, popel ze slámy pouze v zemědělství, směs může být použita na obě 2 kultury půd
- LOI > 5 % → analýzy PAU (max.  $\sum$  PAU 3 mg/kg)
- max. dávka 5 t/ha/5 let na zem. půdu (max.0,8g Cd/ha/rok)
- max. dávka 7,5 t/ha/100 let na lesní půdu
- max. 30 kg P/ha/rok

#### **Finsko**

- max. 2 % Cl pro použití v lese
- max. 1,5g Cd/ha/rok
- min. obsahy živin v popelu (tab.):

%		Ca	K + P
Finsko	zem.	8	2
	lesy	6	1

#### **Švédsko**

- Cs 137 – max. 10 kBq/kg (lesy); 0,5 kBq/kg (zem.)
- doporučená dávka 2 - 3 t/ha/obmýtlí (při dávce 3t/ha/70 let max. 1,3g Cd/ha/rok)
- popel by měl být před použitím stabilizován
- min. obsahy živin v popelu (tab.):

%	Ca	K	Mg	P	Zn
Švédsko	12,5	3	1,5	0,7	0,05

## 10. Ztráta žíháním v popelích ze spalování biomasy

Ztráta žíháním popelů (Loss On Ignition - LOI) je dána především obsahem spalitelných látek, nebo-li nedopalem původního materiálu. Velikost tohoto podílu organických látek je ovlivněna především technologií spalování, typem kotlů, nepřipraveností nebo nedokonalou pozorností obsluhy apod. Výskyt vyšší ztráty žíháním (nad 7 hm. %) může být způsoben i neregulovaným nebo příliš vysokým tahem spalin kominem, kdy do odlučovače popílku odchází i podstatná část spalovaných pilin nebo slámy. Takový způsob spalování je mimo to i velmi neekonomický a má negativní vliv na provoz zařízení (zanášení kotle, vyšší spotřeba paliva, atp.).

Je-li zkoumán již popel nebo popelovina po vyhoření všech spalitelných látek, pak LOI zahrnuje jak rozpad krystalické struktury jílu (odchod krystalické vody), tak rozpad karbonátů (vápence, dolomitického vápence, dolomitu) a případných dalších látek.

Částečně zuhelnatělé nebo nedokonale spálené materiály mohou obsahovat karcinogenní polyaromatické uhlovodíky, které představují závažná rizika pro živé organismy (karcinogenita, poruchy reprodukce, mutace,..)

Tab. 12: Průměrné hodnoty a mediány ztrát žíháním v popelích ze spalování biomasy (%)

popel	surovina	LOI (%)	
		$\bar{x}$	$\tilde{x}$
roštový	dř.štěpka	3,24	2,44
úletový	dř.štěpka	12,04	9,95
směsný	dř.štěpka	12,74	12,68
	sláma	4,68	4,00

Podíváme – li se na naše výsledky ztrát žíháním (tab. 12) ve vztahu k limitní hodnotě uváděné v legislativních opatřeních vybraných států Evropy pro použití popelů ze spalování biomasy na zemědělské či lesní půdě (5 %), zjistíme, že tomuto nařízení by v našem případě vyhovovala většina roštových popelů z dřevní štěpky (s výjimkou 4 provozoven) a směsných popelů ze slámy (s výjimkou 2 provozoven). U úletových a směsných popelů ze spalování štěpky je situace zcela opačná, neboť v prvním případě by požadavek na maximální ztrátu žíháním splnilo pouze 6 vzorků, v druhém případě žádný. Při překročení zmíněné hranice 5 % jsou vyžadována stanovení obsahů polyaromatických uhlovodíků.

## 11. Obsahy polycyklických aromatických uhlovodíků v popelích ze spalování biomasy

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU) se především tvoří a těkají při nedokonalém spalovacím procesu. Do prostředí se tedy dostávají zejména při výrobě energie, spalování odpadů, ze silniční dopravy, při krakování ropy, při výrobě hliníku, z metalurgických procesů, při výrobě koksu, asfaltu, při výrobě cementu, z rafinérií, krematorií, z požárů a v neposlední řadě při kouření.

K nejrizikovějším vlastnostem PAU patří jejich karcinogenita. Nejznámější z karcinogenních PAU je benzo(a)pyren, u kterého byl objasněn i mechanismus, kterým přímo poškozují genetickou informaci buněk. Benzo(a)pyren je spolu s ostatními PAU přítomen v kouři ze spalování uhlí, dřeva, ve výfukových plynech a v cigaretovém kouři. PAU jsou zde přítomny ve formě velmi jemných částic, které pronikají při vdechnutí až do plicních sklípků, kde se zachycují. Přítomnost PAU je hlavní příčinou vzniku rakoviny plic. PAU přijaté s potravou působí rakovinu zažívacího traktu a v případě kožního kontaktu rakovinu kůže.

Tab. 13: Průměrné hodnoty a mediány obsahu PAU ( $\Sigma 16$  PAU) v popelích ze spalování biomasy (mg/kg)

popel	surovina	$\Sigma 16$ PAU (mg/kg)	
		$\bar{x}$	$\tilde{x}$
roštový	dř.štěpka	0,039	0,006
úletový	dř.štěpka	3,839	0,112
směsný	dř.štěpka	0,125	0,021
	sláma	0,169	0,115

Průměrné hodnoty PAU nalezené ve vzorcích popelů jsou v porovnání s dánskými předpisy (max.  $\Sigma$  PAU 3 mg/kg) ve většině případů výrazně pod stanovenými limity a vyhovují ve většině případů i našim limitům pro sedimenty. Výjimku představuje pouze úletový popel několika málo provozoven, které by limitům nevyhověly a zvyšují průměrnou hodnotu PAU u celého hodnoceného souboru (konkrétně se jedná o 2 – 3 spalovny ze 16).

Nejvíce zastoupeným polyaromatickým uhlovodíkem v popelích ze spalování biomasy je jednoznačně naftalen. Nejvyšší obsahy naftalenu můžeme nalézt v úletovém popelu ze spalování dřevní štěpky (300,5  $\mu$ g/kg), který je oproti ostatním skupinám bohatší i na ostatní PAU – acetnaftalen, fenantren, antracen.

Tab. 14: Průměrné obsahy jednotlivých PAU ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )  
v popelích ze spalování biomasy

PAU ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	roštový		úletový	
	dř.štěpka	dř.štěpka	dř.štěpka	sláma
naftalen	25,4	300,5	121,9	62,2
acetafnylen	2,2	87,4	7,1	23,4
acetafnten	0,6	4,4	0,4	1,3
fluoren	0,8	5,1	0,2	2,4
fenantren	2,1	36,3	4,8	28,5
antracen	0,5	18,3	0,2	3,0
fluoranten	1,2	19,0	2,7	19,5
pyren	1,0	15,2	3,9	20,4
chrysen	0,3	2,2	0,4	1,3
benz-a-antracen	0,4	3,7	0,3	1,3
benzo-b-fluoranten	0,2	2,0	0,2	1,1
benzo-k-fluoranten	0,2	1,9	0,2	1,3
benzo-a-pyren	0,2	2,0	0,2	3,3
indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,3	2,5	0,3	0,9
dibenz(a,h)antracen	0,2	0,2	0,2	0,2
benzo(g,h,i)perylene	0,3	2,4	0,5	1,5

### III. Srovnání „novosti postupů“

V předkládané metodice jsou uvedeny nové, vlastními výsledky podložené, poznatky o možném využití popelů ze spalování biomasy na zemědělských půdách České republiky ve snaze o navrácení odebraných živin zpět do půdy. Výsledky byly získány systematickým odběrem a analýzami vzorků popelů od rozhodujících producentů popelů z celé ČR.

Metodika hodnotí odděleně popele roštové, které podle způsobu spalování dominují produkci a popele úletové, jejichž produkce je významně nižší. Dále jsou odděleně hodnoceny popele produkované z dřevní štěpky a popele vznikající po spalování slámy. Počet vzorků závisel na surovinách a technologiích používaných v jednotlivých spalovnách. Hodnocení popelů dle definovaných skupin umožnilo zcela nový pohled na jejich rozdílnou kvalitu a složení a také budoucí využití.

Z důvodu chybějící národní legislativy definující parametry popelů vhodných k aplikaci na zemědělskou či lesní půdu byly obsahy sledovaných rizikových látek v popelích porovnány jednak s kritérii pro pomocné půdní látky a následně s kritérii pro aplikaci kalů z čistíren odpadních vod či aplikaci sedimentů.

Studium odborné, především zahraniční, literatury nám pomohlo výsledky porovnat a vyhodnotit a současně jasně prokázat, že popel produkovaný spalovny na biomasu potřebuje specifický přístup z hlediska jeho možného budoucího využití.

Z pohledu zpracování problematiky v rámci území České republiky je obsah metodiky nový a původní.

#### **IV. Popis uplatnění certifikované metodiky**

---

Metodika bude sloužit jako vhodný zdroj informací, především pro státní správu, o různorodosti materiálu, který vzniká spálením biomasy. Instituce tak získají komplexní poklady pro možné zahájení řízení specifikující parametry popelů, popřípadě i surovin, vhodných k přímé aplikaci na zemědělskou půdu.

Metodika bude vhodným materiálem pro producenty těchto popelů, kterým umožní orientovat se v kvalitě a složení popelů ve vztahu k použité surovině i způsobu nakládání s jednotlivými druhy popelů.

Zemědělcům dává přehled o hnojivém potenciálu zmiňovaných popelů a současně o rizicích, které jsou spojeny s možnou aplikací materiálů vzniklých spalováním biomasy.

#### **V. Ekonomické aspekty**

---

Jak již bylo řečeno výše, v současné době jsou popele ze spalování biomasy v České republice ukládány na skládky jako Ostatní odpad, což při produkci cca 70 tis. t popelů za rok a poplatku 800 – 1000 Kč za uložení 1 tuny Ostatního odpadu (připravovaná novela Zákona o odpadech počítá s navýšením daně za skládkování Ostatního odpadu, což se projeví v celkových nákladech na uložení 1 tuny odpadu nárůstem o 300 – 400 Kč) představuje celkové náklady na skládkování popelů z biomasy cca 56 - 70 mil. Kč/rok. Tyto dodatečné náklady značně zatěžují producenty tepla nebo elektřiny, a snižují jejich konkurenceschopnost na trhu s energiemi.

Popele jsou významným zdrojem živin, proto je vhodné sledovat při aplikaci na zemědělskou půdu nejen snížení nákladů na skládkování, ale je nutné vyčíslit také množství živin, obsažených v popelích, které zůstanou kvůli uložení na skládkách nevyužity, a které by při určení hnojivé hodnoty popelů mohly znamenat příjem pro jejich producenty (tab. 15, 16 a 17).

Tab. 15: Průměrné množství živin (kg) obsažené v 1 tuně popelů

popel	surovina	P (kg/t)		K (kg/t)		Ca (kg/t)		Mg (kg/t)	
		P $\bar{x}$	P $\bar{y}$	K $\bar{x}$	K $\bar{y}$	Ca $\bar{x}$	Ca $\bar{y}$	Mg $\bar{x}$	Mg $\bar{y}$
roštový	dř.štěpka	16,4	15,3	71,4	57,6	211,9	193,4	19,8	22,4
úletový	dř.štěpka	13,5	13,2	85,0	65,2	193,3	185,9	15,9	17,5
směsný	dř.štěpka	10,4	10,2	44,7	44,2	269,0	268,3	25,0	24,2
	sláma	17,9	17,1	257,5	256,8	103,5	102,9	16,2	15,5

Tab. 17: Průměrné ceny živin (Kč) obsažené v 1 tuně popele

popel	surovina	P		K		Ca		Mg		celkem	
		P $\bar{x}$	P $\bar{y}$	K $\bar{x}$	K $\bar{y}$	Ca $\bar{x}$	Ca $\bar{y}$	Mg $\bar{x}$	Mg $\bar{y}$	celkem	celkem
roštový	dř.štěpka	3649	3404	1964	1584	615	561	1449	1640	7676	7189
úletový	dř.štěpka	3004	2937	2338	1793	561	539	1164	1281	7066	6550
směsný	dř.štěpka	2314	2270	1229	1216	780	778	1830	1771	6153	6035
	sláma	3983	3805	7081	7062	300	298	1186	1135	12550	12300

Z výše uvedené tabulky (tab. 17) vyplývá, že v případě možného využití popelů ze spalování biomasy na zemědělskou půdu je možné významně snížit náklady na použití minerálních hnojiv. Pokud přepočítáme veškeré živiny obsažené v popelích podle současné ceny živin v minerálních hnojivech, mohlo by se teoreticky jednat až o částku 490 mil. Kč, pokud budeme uvažovat, že v tuně popela je obsaženo celkové množství hlavních živin přibližně za 7 tis. Kč, a že produkce popela z biomasy je na úrovni 70 tis. t/rok, a že veškeré množství živin bude využitelné pro rostliny.

Tab. 16: Průměrná cena za 1 kg živiny (k 11.7.2011)

živina	Kč/kg živiny
P	222,5
K	27,5
Ca	2,9
Mg	73,2

## VI. Závěr

V poslední době se, zejména kvůli závazkům České republiky k Evropské unii ohledně navyšování podílu obnovitelných zdrojů energie, zvyšuje zájem o energetické využití biomasy, přičemž nejčastěji je biomasa spalována. Kromě produkované energie vzniká popel jako odpadní produkt spalovacího procesu. Vzhledem k faktu, že produkce energie z těchto zdrojů roste, úměrně roste i podíl vznikajících popelů, které jsou nyní skládkovány, což zvyšuje náklady na produkci energie a současně se takto znehodnocuje značné množství živin. Fyzikální a chemické složení popela závisí především na charakteru spalované suroviny, spalovací technologii a původu bio-

masy. Naše analýzy popelů ze spalování biomasy potvrdily významný obsah makroživin ve všech druzích popelů (roštový, úletový, směsný). Obecně se jedná o zásaditý materiál s vysokým podílem vápníku a draslíku, obsahujících celou řadu dalších živin, kromě dusíku. Kromě živin obsahují popele i celé spektrum rizikových prvků a s ohledem na dokonalost použité technologie i persistentních organických polutantů, zejména polyaromatických uhlovodíků (PAU). Obsah rizikových prvků a sloučenin i vysoká hodnota pH jsou limitujícími faktory jejich použití.

S využitím výsledků analýz popelů z více než 40 zdrojů v České republice byly popele kategorizovány na základě vstupní suroviny a s ohledem na obsahy živin, rizikových prvků, PAU a hodnoty pH a ztráty žíháním vytipovány potenciálně vhodné popele pro použití na zemědělské půdě. Bylo prokázáno, že popele z dřevní štěpky v průměru obsahují cca 20 % Ca, 7 % K, a 1,5 % P a Mg, popele ze slámy jsou chudší na Ca cca 10 % a bohatší na K cca 25 %, obsahy ostatních živin jsou podobné. Obsahy rizikových prvků se významně liší podle suroviny i podle druhu popela. Mnohem vyšší obsahy rizikových látek byly stanoveny v úletovém popelu než v popelu roštovém. Jednoznačně nižší obsahy rizikových prvků byly zjištěny v popelích ze spalované slámy, které zpravidla vyhovují i velmi přísné národní legislativě na pomocné půdní látky. Popele po spalování dřevní štěpky obsahují i z důvodu nižšího množství popelovin více rizikových prvků, zejména obsahy Pb a Cr, ale i As byly při porovnání s limity pro pomocné půdní látky překročeny u většiny vzorků. Tyto limity nejsou ale primárně určeny pro recyklaci materiálů na zemědělskou půdu. Při porovnání obsahu rizikových prvků v popelích s limity pro přímou aplikaci čistírenských kalů i pro aplikaci sedimentů by naopak většina roštových popelů mohla být přímo aplikována na zemědělskou půdu, problém by nastal až s úletovým popelem, jehož produkce je ale významně nižší. Podobně je tomu i při hodnocení obsahu PAU, jejichž obsah významně vzrostl opět jen u několika vzorků úletových popelů, u ostatních byl velmi nízký a splňoval jak limity pro aplikaci sedimentů, tak i zahraniční limity pro aplikace popelů. S ohledem na získané výsledky by měla být upravena legislativa tak, aby mohly být za určitých podmínek tyto materiály přímo aplikovány na zemědělskou půdu. Možným řešením by bylo přijetí speciálního legislativního předpisu se specifickými podmínkami pro jeho využití, podobně jako v evropských zákonech. V případě, že by se podařil náš záměr uplatnit popele ze spalování biomasy jako hnojivo, spalovny by ušetřily významnou část svých provozních nákladů, které jsou nyní vynakládány na skládkování tohoto materiálu. Dalším, neméně důležitým, přínosem by byl návrat živin zpět do půdy, čímž by se uzavřel koloběh živin a omezilo by se používání minerálních hnojiv.



## VII. Seznam použité související literatury

1. Berra, M., De Casa, G., Dell'Orso, M., Galeotti, L., Mangialardi, T., Paolini, A.E., Piga, L. 2011. Chapter 10: Reuse of woody biomass fly ash in cement – based materials: leaching tests. In *Recycling of biomass ashes*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 133 – 146. ISBN 978-3-642-19353-8.
2. Biedermann, F., Obernberger, I. 2005. Ash-related problems during biomass combustion and possibilities for a sustainable ash utilisation [online]. 11. října 2005 [cit. 22-11-2011]. Dostupné z <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Biedermann-AshRelated-2005-10-11.pdf>.
3. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC [cit. 29-11-2011]. Dostupné z <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>.
4. Eichler-Löbermann, B., Schiemenz, K., Makadi, M., Vago, I., Köppen, D. 2008. Nutrient cycling by using residues of bioenergy production-II. Effects of biomass ashes on plant and soil parameters. *Cereal Res Commun*, 36 (1), 1259-1262.
5. European Parliament and Council. 2009. Decision No. 406/2009/EC on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. *Official Journal of the European Union L 140*, 5 June 2009, pp. 136–148.
6. Haraldsen, T.K., Pedersen, P.A., Gronlund, A. 2011. Chapter 3: Mixtures of bottom wood ash and meat and bone meal as NPK fertilizer. In *Recycling of biomass ashes*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 33 – 44. ISBN 978-3-642-19353-8.
7. Hytönen, J. 2003. Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots Pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. *Silva Fennica*, 37 (2), 219 - 234.
8. Johansson, L.S., Tullin, C., Beckner, B., Sjøvall, P. 2003. Particle emissions from biomass combustion in small combustors. *Biomass and Bioenergy*, 25 (4), 435-446.
9. Kuba, T., Tschöll, A., Partl, C., Meyer, K., Insam, H. 2008. Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127 (1-2), 43-49.
10. Loo, S., Koppejan, J. 2007. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan, London, 442 p. ISBN 978-1-84407-249-1.
11. Malaťák, J., Jevič, P., Vaculík, P. 2010. Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. Praha, 240 s. ISBN 978-8-87415-02-3.
12. McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83 (1), 37-46.
13. Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2010. *Obnovitelné zdroje energie v roce 2009* [online]. Dostupné z < <http://www.mpo.cz/cz/energetika-a-suroviny/statistiky-energetika/> >.
14. Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W., Riedl, R. 1997. Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. *Biomass and Bioenergy*, 12 (3), 211-224.
15. Obernberger, I., Supancic, K. 2009. Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants. *Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition, Hamburg, ETA-Renewable Energies (Ed.)*, Italy.
16. Patterson, S.J., Acharya, S.N., Thomas, J.E., Bertschi, A.B., Rothwell, R.L. 2004. Integrated soil and crop management: barley biomass and grain yield and canola seed yield response to land application of wood ash. *Agron J*, 96 (4), 971 – 997.

17. Perucci, P., Monaci, E., Onofri, A., Vischetti, C., Casucci, C. 2008. Changes in physico-chemical and biochemical parameters of soil following addition of wood ash: a field experiment. *Eur J Agron*, 28, 155 – 161.
18. Pitman, R.M. 2006. Wood ash use in forestry – a review of the environmental impacts. *Forestry*, 79 (5), 563 – 588.
19. Rosillo-Calle, F., Hemstock, S., de Groot, P., Woods, J. 2006. The biomass assessment handbook: Bioenergy for sustainable environment. Earthscan, London, 296 p. ISBN 9781844075263.
20. Saarsalmi, A., Mälkönen, E., Piirainen, S. 2001. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. *Silva Fennica*, 35 (3), 355 – 368.
21. Sander, M.L., Andrén, O. 1997. Ash from cereal and rape straw used for heat production: limit effect and contents of plant nutrients and heavy metals. *Water, Air and Soil Pollution*, 93 (1-4), 93 – 108.
22. Voláková, P. 2011. Osobní sdělení.
23. Werkelin, J., Skrifvars, B.J., Zevenhoven, M., Holmbom, B., Hupa, M. 2010. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*, 89 (2), 481-493.

## **VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice**

1. Hanzlíček, T., Perná, I. 2011. Popel ze spalování biomasy: odpad nebo hnojivo? *Odpadové fórum*, 2 (2011), 26-26. (Pozn.: Dotisk v čísle 4(2011), str. 3)
2. Hanzlíček, T., Perná, I. 2011. Využití popelovin ze spalování biomasy. Sborník přednášek XIX. Mezinárodního kongresu a výstavy Odpady – Luhačovice, 5.-8. září 2011, Luhačovice, 177-181, ISBN 978-80-904356-4-3.
3. Hanzlíček, T., Perná, I. 2011. Popel z biomasy – přehled českých spaloven a výsledků sledování chemických složení popela. *Konference dřevny popol*, Intech Slovakia, s.r.o., 30.11.-1.12.2011, Bratislava.  
<http://www.drevnypopol.sk/admin/uploads/ZaverecnaKonferencia/Hanzlicek2.pdf>
4. Očecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Habart, J. 2011. The content of risk elements and nutrients in ashes after biomass combustion and their potential use. *Proceedings of International Conference Soil, Plant and Food Interactions*, Brno, 324 – 329. ISBN 978-80-7375-534-8.
5. Očecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Habart, J. 2011. Celkové obsahy živin v popelích ze spalování biomasy. *Racionální použití hnojiv*, Česká zemědělská univerzita v Praze, 107 – 111. ISBN 978-80-213-2224-0.

## **IX. Dedikace**

Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu NAZV č. QI102A207 „Využití popela ze spalování biomasy jako snadno aplikovatelného šetrného hnojiva, komplexní řešení přínosů a rizik“.