



národní  
úložiště  
šedé  
literatury

**Spalování kontaminované kukuřičné slámy vzduchem obohaceným o kyslík ve fluidním loži**

Durda, Tomáš  
2014

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-175319>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 11.05.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní [nusl.cz](http://nusl.cz) .

# SPALOVÁNÍ KONTAMINOVANÉ KUKUŘIČNÉ SLÁMY VZDUCHEM OBOHACENÝM O KYSLÍK VE FLUIDNÍM LOŽÍ

T. Durda<sup>1,2</sup>, **M. Pohořelý**<sup>1,2</sup>, M. Šyc<sup>1</sup>, P. Kameníková<sup>1</sup>, K. Svoboda<sup>1</sup>, M. Jeremiáš<sup>1,2</sup>, M. Punčochář<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., Rozvojová 135/1, 165 02 Praha 6, email: durda@icpf.cas.cz

<sup>2</sup>Ústav energetiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6, email: michael.pohorely@vscht.cz

## Úvod

Kukuřice, jako plodina s fotosyntetickým cyklem C<sub>4</sub>, je schopná velmi efektivně přeměňovat energii ze světla na tvorbu vegetativních orgánů, tedy rychle tvoří nadzemní biomasu. V případě pěstování kukuřice nazeleno a na siláž se výnosy pohybují v průměru okolo 35 t/ha sušiny (ČR). Kukuřice patří mezi rychle rostoucí byliny, tudíž lze využít pro fytostabilizaci mírně a středně kontaminovaných půd a jejich postupnou fytořemediaci. Většina absorbovaných polutantů se zdržuje v kořenové části. Co se týče akumulace v nadzemní biomase, zhruba 82 % absorbovaných kovů se vyskytuje ve stonku a listech, minimální obsah byl nalezen v zrna. Po přezkoumání dle evropských standardů pro obsah těžkých kovů v krmivech je teoreticky možné využití zrna ke krmným účelům i v případě, že je kukuřice pěstována na nízké a středně kontaminované půdě [1]. Zbylé části rostliny je vhodné využít k energetickým účelům, ale musí být věnována dostatečná pozornost chování těžkých kovů během zvoleného procesu.

## Cíl práce

Hlavním cílem předkládaného příspěvku bylo proměřit vliv materiálu fluidní vrstvy (písek vs. keramzit [2]) a záměny spalovacího vzduchu za vzduch obohacený kyslíkem (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> – 30/70 obj. %) na účinnost procesu spalování kukuřičné slámy ve fluidním reaktoru, na emise jednotlivých význačných polutantů CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, HCl TZL a na distribuci těžkých kovů mezi jednotlivé výstupní proudy: ložový popel, cyklonový popílek a ulétavý popílek.

## Experimentální část

### Vlastnosti použitých materiálů

Pro spalování v reaktoru s fluidní vrstvou byla jako palivo použita sláma celé rostliny kukuřice (*Zea mays*), vypěstované na kontaminované půdě na Příbramsku a dodané po sklizni kolegy z České zemědělské univerzity v Praze. Palivo a jeho úprava je blíže popsána v literatuře [2–4].

Jako materiál fluidní vrstvy byl použit keramzit, vzhledem k vhodným mechanicko-transportním vlastnostem, a také vzhledem ke svému katalytickému vlivu na proces spalování. Původní primární materiál fluidní vrstvy – písek reagoval s popelovinou za vzniku aglomerátů, které způsobovaly velké technické obtíže a při mnohých experimentech vyústily i v defluidaci vrstvy, viz [2, 3]. Náhrada písku keramzitem přinesla rozšíření teplotního intervalu, ve kterém lze bezproblémově provozovat fluidní kotel bez aglomerace vrstvy (sintrace materiálu fluidní vrstvy a popela) [4].

### Chemické vlastnosti paliva a materiálu fluidní vrstvy

Chemické vlastnosti použitých materiálů jsou uvedené v Tab. 1

Chemické složení (přesněji obsah popelotvorných prvků reprezentativního vzorku) je uvedeno v Tab. 2 pro keramzit a pro popel z kukuřice. Chemické složení keramzitu a popela z kukuřice bylo stanovené rentgenovou fluorescenční analýzou na spektrometru ARL 9400 XP vyrobeném firmou THERMO ARL. Hlavním důvodem sledování složení popela je predikce termofyzikálních vlastností popelovin s ohledem na sintraci, aglomeraci a předpověď potenciálních problémů s fluidací a zalepováním spalinových cest a je blíže diskutováno v našich starších pracích [2, 3].

Mezi nevýhody spalování slámy kukuřice patří zejména nízká teplota tání popelovin. Kukuřičná sláma obsahuje v extrémním případě (námi zkoumaný vzorek) cca 5 hm. % popela, ve kterém hlavními složkami jsou K (cca 26 hm. %), Si (cca 15 hm. %), Ca (cca 5 hm. %) a P (cca 4 hm. %). Poměr K/Si je cca 1,75, poměr K/(Ca+Mg) je 3,38 a index alkality je 1,85. Např. Miles a kol. predikuje, že pokud je index alkality vyšší než 0,34 je prakticky jisté, že dojde k sintraci popelovin [6].

Tab. 1 Chemické vlastnosti biopaliva

Palivo – Sláma kukuřice	původní stav	suchý stav
Vlhkost (hm. %)	8,4	-
Celková hořlavina* (hm. %)	88,1	96,1
Popel (hm. %)	3,6	3,9
Prchavá hořlavina (hm. %)	45,4	49,6
Neprchavá hořlavina (hm. %)	42,6	46,5
Spalné teplo (MJ/kg)	17,2	18,4
Výhřevnost (MJ/kg)	15,8	17,1
Uhlík (hm. %)	42,7	46,6
Vodík (hm. %)	5,5	6,0
Dusík (hm. %)	1,0	1,1
Kyslík (hm. %)	38,8	42,3
Síra - celková (hm. %)	< 0,1	< 0,1
Síra - spalitelná (hm. %)	0,07	0,08
Chlor (hm. %)	0,12	0,13
Fluor (hm. %)	0,01	0,01

Tab. 2 Složení popela biopaliva a materiálu fluidní vrstvy (keramzit) měřené XRF analýzou

Složka	keramzit (hm. %)	popel z kukuřičné slámy (hm. %)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,71	1,07
CaO	4,77	7,06
Cl	-	1,71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,18	1,34
K <sub>2</sub> O	2,41	31,78
MgO	2,11	4,54
MnO	0,12	0,30
Na <sub>2</sub> O	0,60	1,17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	10,83
SO <sub>3</sub>	0,28	2,77
SiO <sub>2</sub>	43,39	36,88
TiO <sub>2</sub>	3,61	0,06
Suma	99,42	99,51

Obsah těžkých kovů v biopalivu (Tab. 3) byl stanoven vysokotlakým mikrovlnným rozkladem v mikrovlnné peci Multiwave 3000 (Anton Paar) s osmimístným rotorem a nádobami XF100. Navážka vzorku pro digesci činila cca 0,1 g. V prvním kroku byla pro digesci použita směs koncentrovaných kyselin: 6 ml HCl, 2 ml HNO<sub>3</sub>, 2 ml HF a 1 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Teplota rozkladu činila cca 220 °C. Ve druhém kroku byla provedena komplexace HF pomocí kyseliny borité (22 ml 4 hm. % H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>). Vzniklý digestát byl pak převeden do odměrné baňky a těžké kovy byly stanoveny metodou atomové emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou dle ČSN EN ISO 11885. Obsah sledovaných těžkých kovů v písku byl pod mezí detekce (PMD).

Tab. 3 Obsah těžkých kovů v biopalivu použitým pro jednotlivé experimenty

Materiál fluidní vrstvy	písek	keramzit	keramzit
Spalovací médium	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	30 O <sub>2</sub> /70 N <sub>2</sub>
Prvek/Jednotka	mg/kg	mg/kg	mg/kg
As	PMD	1,08	3,21
Cd	0,55	PMD	PMD
Cr	1,14	0,25	1,34
Cu	2,80	4,40	2,86
Ni	PMD	0,84	PMD
Pb	13,80	PMD	PMD
Zn	NA	58,14	83,67

NA – neanalyzáno PMD – pod mezí detekce

### Popis experimentální jednotky a systému analýzy spalin

Spalovací experimenty byly provedeny v experimentálním fluidním reaktoru s hustou bublinovou fluidní vrstvou na Ústavu chemických procesů AV ČR, který je detailně popsán v literatuře [7-14].

Odběr vzorků pro on-line analýzu a off-line analýzu je zabezpečen níže uvedenými postupy (Tab. 4). Vzhledem k lokálním dispozicím v místě odběru nelze realizovat isokinický odběr.

Tab. 4 Odběr vzorků pro on-line a off-line analýzu

Analýza	Místo	Sledovaná látka	Přístroj/Norma	Max. rozsah
On-line	Na komíně	N <sub>2</sub> O	Uras 14	0–400 ppm
On-line	Spalinovod mezi cyklonem a chladičem	NO <sub>x</sub>	Horiba PG 350	0–2500
On-line		SO <sub>2</sub>		0–3000
On-line		CO		0–5000
On-line		CO <sub>2</sub>		0–30
On-line		O <sub>2</sub>		0–25
Off-line	Spalinovod mezi	TZL	ČSN EN 13284-1	
Off-line	cyklonem a chladičem	TK, PP*	ČSN EN 14385	

Hmotová a také uhlíková bilance a distribuce těžkých kovů (TK) byly založeny na analýze výstupních proudů, tj. ložového popela, cyklonového popílku a spalin složených z pevné fáze (ulétavý popílek) a plynné fáze.

### Experimentální podmínky

Experimentální podmínky jsou uvedeny v Tab. 5. Společné parametry uvedených experimentů byly počáteční objem vrstvy (650 ml), poměr výšky nehybné vrstvy a vnitřního průměru reaktoru (cca 1).  $U_{přeb} = 2xU_{mf}$  (bez započtení transportního plynu) – jednalo se tudíž o bublinovou fluidní vrstvu.

Tab. 5 Provozní podmínky jednotlivých experimentů

Materiál fluidní vrstvy	písek	keramzit	keramzit
Spalovací médium	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	30 O <sub>2</sub> /70 N <sub>2</sub>
$\lambda$ (-)	1.79	1.94	1.98
Délka experimentu (hh:mm)	6:50	6:37	2:52
Rychlost dávkování paliva (g/h)	319	259	369
Rychlost dávkování suchého paliva (g/h)	288	238	338
teplota ve fluidní vrstvě (°C)	762 ± 10	750 ± 10	747 ± 10
teplota ve freeboardu (°C)	756 ± 10	746 ± 10	671 ± 10
teplota v horkém cyklonu (°C)	349 ± 10	324 ± 10	298 ± 10
teplota vzorkování spalin (°C)	205 ± 10	188 ± 10	181 ± 10

Experimenty byly vedeny za srovnatelných provozních podmínek. Teplota ve vrstvě, která spolu se stechiometrickým koeficientem vzduchu má hlavní vliv na proces spalování, byla téměř identická. Rozdíl mezi stechiometrickými koeficienty ( $\lambda$ ) u jednotlivých experimentů je přijatelný.

### Výsledky a diskuze

#### Spalování slámy kukuřice a emise vybraných polutantů

Emise vybraných látek jsou shrnuty v Tab. 6, bilance popelovin je uvedena v Tab. 7 a obsah nedopalu vztažený na tok paliva (suchého, vlhkého) a obsah uhlíku v palivu v Tab. 8.

Náhrada materiálu fluidního lože písku za keramzit měla pozitivní vliv jak na účinnost spalovacího procesu, tak na rozšíření teplotního intervalu ve kterém lze fluidní reaktor provozovat. K zvýšení kvality spalovacího procesu (účinnosti) přispělo snížení koncentrace CO ve spalinách a pokles obsahu nedopalu v popelovinách (přibližně o 50%). V důsledku záměny fluidní vrstvy písku za keramzit byl také snížen přibližně 4,5krát obsah TZL (prachu) a mírně snížen obsah N<sub>2</sub>O ve spalinách. Nízký obsah SO<sub>2</sub> a HCl ve spalinách při spalování paliva vzduchem je spojen s nízkým obsahem S a Cl v palivu a nízkou konverzí S a Cl z paliva do plynu. Důvodem nízké konverze S a Cl do spalin za cyklonem je velké procento alkalických kovů a kovů alkalických zemin v popelovinách.

Tab. 6 Emise vybraných látek

Materiál fluidní vrstvy	písek	keramzit	keramzit
Spalovací médium	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	30 O <sub>2</sub> /70 N <sub>2</sub>
Sledovaná látka	Hodnota	Hodnota	Hodnota
O <sub>2</sub> (vol. %)*	5.8 ± 0.1	6.2 ± 0.1	9.3 ± 0.1
NO <sub>x</sub> (mg/m <sup>3</sup> )**	–	375 ± 1.2	761 ± 3.5
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )**	37.0 ± 15.2	58 ± 2.5	202 ± 2.4
CO (mg/m <sup>3</sup> )**	362 ± 7.2	206 ± 9.2	188 ± 9.0
N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>3</sup> )**	19.4 ± 0.2	14 ± 0.5	40 ± 2.0
TZL <sub>2h</sub> (mg/m <sup>3</sup> )**	158 ± 18.4	35 ± 12	43 ± 20.3
HCl (mg/m <sup>3</sup> )**	0.6 ± 0.4	0.7 ± 1.5	3.0 ± 8.3

\* v suchých spalinách bez pneumotransportu TZL — tuhé znečišťující látky

\*\* přepočítáno na 11 % O<sub>2</sub> v suchých spalinách bez pneumotransportu, normální teplotu a tlak

Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím mediu (ve vrstvě) vedlo k mírnému snížení koncentrace CO ve spalinách a mírnému zvýšení nedopalu v popelovinách, což lze vysvětlit ze znalosti mechanismu hoření částic pevného paliva. Zvýšení parciálního tlaku kyslíku vede ke zvýšení teploty hořící částice a tím i ke zvýšení četnosti prasknutých částic. Fragmenty částic jsou pak rychle unášeny nad vrstvu, kde již není tak intenzivní přestup tepla a je i obvykle význačně nižší teplota, proto nedojde k jejich dokonalému vyhoření. Vyšší parciální tlak kyslíku intenzifikuje proces spalování, což se projevuje vyšším stupněm vyhoření neprasklých částic ve vrstvě, a má za následek nižší teplotu nadvrstevové části (freeboardu) oproti spalování vzduchem. Zde je třeba poznamenat, že většina částic reaguje mechanismem prohřívacím. V důsledku zvýšení parciálního tlaku kyslíku

ve spalovacím médiu došlo ke zvýšení koncentrace kyselých složek plynu ve spalinách, což mělo mírně pozitivní vliv na kvalitu (účinnost) procesu spalování za námi provozovaných podmínek. Mírné zlepšení účinnosti spalování bylo dáno snížením objemu spalin při spalování obohaceným vzduchem o kyslík oproti spalování vzduchem. Pro porovnání konverze N, S a Cl do spalin při rozdílné rychlosti dávkování, rozdílném objemu spalin apod. je nutné porovnat emisní faktory (Tab. 10), tj. výtěžky jednotlivých polutantů. Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu vedlo k zvýšení koncentrace kyselých složek (SO<sub>2</sub>, Cl) a také koncentrace NO<sub>x</sub> (suma NO a NO<sub>2</sub>) ve spalinách a bylo to důsledkem zvýšené konverze Cl-, S- a N- z paliva do plynu.

Tab. 7 Bilance popelovin

Materiál fluidní vrstvy	Spalovací médium	Složka	Ložový popel	Cyklonový popílek	Spaliny a ulétavý popílek
písek	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	Četnost (hm. %)	61,3	35,8	2,9
		Nedopal (hm. %)	<0,1	7,7	7,3
keramzit	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	Četnost (hm. %)	66,6	30,9	2,5
		Nedopal (hm. %)	<0,1	6,2	5,8
keramzit	30 O <sub>2</sub> /70 N <sub>2</sub>	Četnost (hm. %)	65,7	32,9	1,4
		Nedopal (hm. %)	<0,1	5,2	6,2

Tab. 8 Nedopal v popelovinách

Materiál fluidní vrstvy	písek	keramzit	keramzit
Spalovací médium	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	30 O <sub>2</sub> /70 N <sub>2</sub>
n/F [ hm. %]	0,151	0,078	0,084
n/F <sup>d</sup> [ hm. %]	0,167	0,085	0,092
n/C <sub>F</sub> <sup>d</sup> [ hm. %]	0,365	0,182	0,200

n - nedopal

F<sup>d</sup> - suché palivo

F - palivo

C<sub>F</sub><sup>d</sup> - obsah uhlíku v suchém palívu

Tab. 9 Emisní faktory vybraných látek pro jednotlivé experimenty

Materiál fluidní vrstvy	písek	keramzit	keramzit
Spalovací médium	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	30 O <sub>2</sub> /70 N <sub>2</sub>
Sledovaná látka	EF [g/kg]	EF [g/kg]	EF [g/kg]
NO <sub>x</sub>	-	4.73 ± 0.02	6.73 ± 0.03
SO <sub>2</sub>	0.41 ± 0.2	0.73 ± 0.01	1.78 ± 0.02
CO	4.0 ± 0.1	2.60 ± 0.12	1.70 ± 0.08
N <sub>2</sub> O	0.22 ± 0.002	0.17 ± 0.002	0.36 ± 0.01
TZL	1.8 ± 0.2	0.44 ± 0.15	0.38 ± 0.18
HCl	0.007 ± 0.004	0.01 ± 0.02	0.03 ± 0.07

EF - emisní faktor

### Distribuce těžkých kovů

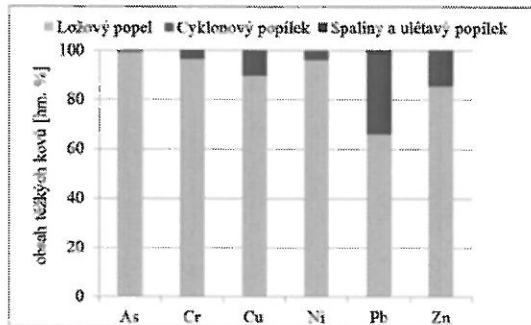
Sledované těžké kovy jsou distribuovány do jednotlivých výstupních technologických proudů, kterými jsou ložový popel, cyklonový popílek, spaliny složené z pevné fáze (ulétavý popílek) a plynné fáze. Distribuce těžkých kovů je zobrazena na Obr. 1 pro spalování vzduchem a na Obr. 2 pro spalování obohaceným vzduchem o kyslík.

Pro uvedenou distribuci se předpokládá, že kovy ve výstupních proudech tvoří 100 % množství (tj. bez korekce na vstupní obsah kovů). Distribuce těžkých kovů mezi plynnou a pevnou fází (ulétavý popílek) spalin má pouze orientační charakter a vychází ze způsobu odběru vzorků. Jako množství v pevné fázi je udáván podíl zachycený na filtru a jako plynná fáze je udáván podíl zjištěný v následných absorpčních roztocích. Orientační charakter je dán obtížně definovatelnou teplotou v místě filtrace částic, neboť teplota je měřena v místě odběru spalin ze spalinovodu.

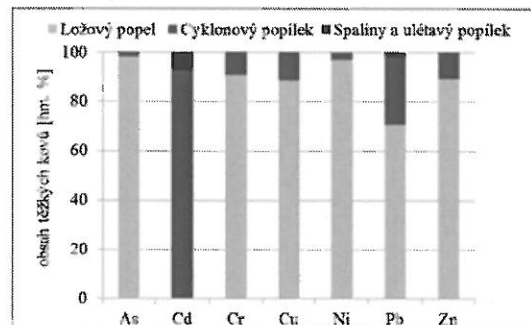
Z výsledků distribuce těžkých kovů pro spalování slámy kukuřice vzduchem (Obr. 1) vyplývá, že v ložovém popelu zůstalo 99,5 hm. % As, 96,4 hm. % Cr, 89,7 hm. % Cu, 96,3 hm. % Ni, 65,8 hm. % Pb a 85,3 hm. % Zn. V případě spalování obohaceným vzduchem (Obr. 2) o kyslík zůstalo v ložovém popelu 98,4 hm. % As, 90,9 hm. % Cr, 88,5 hm. % Cu, 96,9 hm. % Ni, 70,8 hm. % Pb a 89,2 hm. % Zn. V cyklonovém popítku byl zaznamenán nejvyšší obsah Cd (92,7 hm. %).

Hmotnostní koncentrace sledovaných těžkých kovů vztažená na suché spaliny, teplotu 0° C, tlak 101,325 kPa a referenční obsah 11 obj. % O<sub>2</sub> pro oba režimy spalování (vzduch, obohacený vzduch kyslíkem) je uvedena

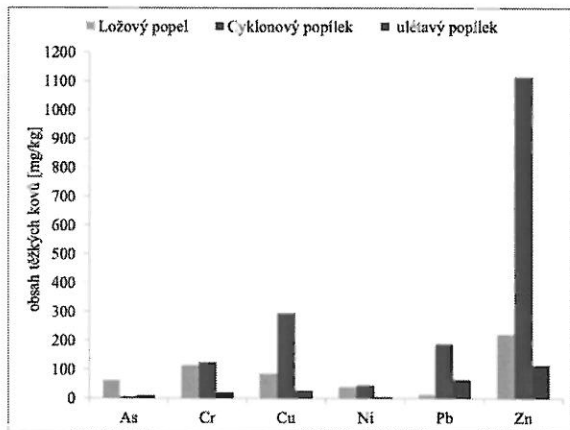
v Tab. 10. Z výsledků je patrné, že hmotnostní koncentrace všech sledovaných těžkých kovů stoupla v závislosti na zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím mediu.



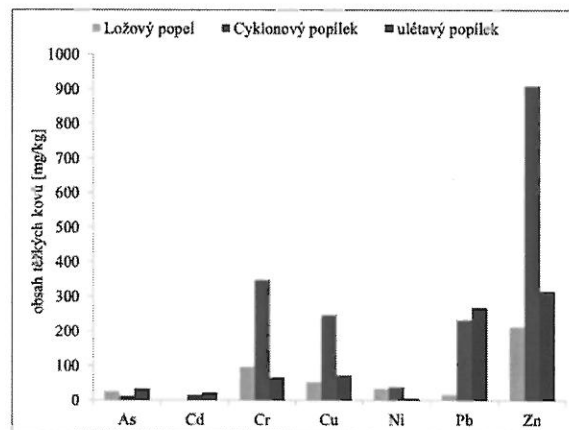
Obr. 1: Distribuce těžkých kovů mezi jednotlivé výstupní proudy při spalování slámy kukuřice vzduchem.



Obr. 2: Distribuce těžkých kovů mezi jednotlivé výstupní proudy při spalování slámy kukuřice obohacným vzduchem o kyslík.



Obr. 3: Obsah sledovaných těžkých kovů v mg/kg ve výstupních proudech při spalování kukuřičné slámy vzduchem.



Obr. 4: Obsah sledovaných těžkých kovů v mg/kg ve výstupních proudech při spalování kukuřičné slámy obohacným vzduchem o kyslík.

Tab. 10 Hmotnostní koncentrace sledovaných těžkých kovů ve spalínách

materiál fluidní vrstvy	keramzit	keramzit
spalovací médium	21 O <sub>2</sub> /79 N <sub>2</sub>	30 O <sub>2</sub> /70 N <sub>2</sub>
prvek	$\rho$ [mg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [mg/m <sup>3</sup> ]
As	1,06	1,14
Cd	PMD	0,02
Cr	2,02	4,84
Cu	1,63	2,71
Ni	0,69	1,52
Pb	0,32	1,05
Zn	4,41	10,85

$\rho$  – hm. koncentrace vztahena na suché spaliny, teplotu 0 °C a tlak 101,325 kPa a referenční obsah kyslíku (11 % O<sub>2</sub>)

Obsah sledovaných těžkých kovů (mg/kg) je uveden pro jednotlivé výstupní proudy při spalování kukuřičné slámy vzduchem na Obr. 3 a v případě spalování obohacným vzduchem o kyslík na Obr. 4.

Spalování vzduchem: Ložový popel obsahoval 61,7 mg/kg As, 114,1 mg/kg Cr, 85,7 mg/kg Cu, 39,0 mg/kg Ni, 12,4 mg/kg Pb a 220,7 mg/kg Zn. Cyklonový popílek obsahoval 6,5 mg/kg As, 125,3 mg/kg Cr, 295,0 mg/kg Cu, 44,7 mg/kg Ni, 187,7 mg/kg Pb a 1114,2 mg/kg Zn. Ulétavý popílek obsahoval 8,9 mg/kg As, 18,7 mg/kg Cr, 26,2 mg/kg Cu, 3,4 mg/kg Ni, 63,1 mg/kg Pb a 114,9 mg/kg Zn.

Spalování obohaceným vzduchem: Ložový popel obsahoval 24,6 mg/kg As, 96,8 mg/kg Cr, 52,7 mg/kg Cu, 32,5 mg/kg Ni, 16,4 mg/kg Pb a 212,9 mg/kg Zn. Cyklonový popílek obsahoval 11,1 mg/kg As, 14,9 mg/kg Cd, 346,7 mg/kg Cr, 245,2 mg/kg Cu, 37,1 mg/kg Ni, 231,3 mg/kg Pb a 909,3 mg/kg Zn. Ulétavý popílek obsahoval 32,6 mg/kg As, 21,2 mg/kg Cd, 65,2 mg/kg Cr, 70,9 mg/kg Cu, 5,4 mg/kg Ni, 268,0 mg/kg Pb a 314,6 mg/kg Zn.

### Závěr

Záměna primárního materiálu fluidní vrstvy písku za keramzit při spalování vzduchem rozšířila teplotní interval, ve kterém lze fluidní kotel provozovat, a zvýšila kvalitu (účinnost) procesu spalování, tj. vedla ke snížení emisí CO o více jak 50 obj. % a nedopalu v popelovinách též o cca 50 hm. % a též vedla k násobnému snížení obsahu TZL (prachu) ve spalinách a k mírnému snížení obsahu N<sub>2</sub>O ve spalinách, což je v dobré korelaci s emisemi CO. Náhrada písku katalyticky aktivním materiálem fluidní vrstvy keramzitem zvýšila též konverzi Cl a S do plynu a tím i koncentraci kyselých plynů (SO<sub>2</sub> a HCl) ve spalinách.

Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím mediu (ve vrstvě) vedlo ke zvýšení koncentrace kyselých složek plynu ve spalinách a mělo mírně pozitivní vliv na kvalitu (účinnost) procesu spalování za námi provozovaných podmínek.

Nejvyšší výskyt většiny sledovaných těžkých kovů byl zaznamenán v ložovém popelu jak pro spalování vzduchem, tak pro spalování obohaceným vzduchem o kyslík. Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím mediu zapříčinilo zvýšení obsahu těžkých kovů ve spalinách.

### Poděkování

Tato práce vznikla díky finanční podpoře projektů Grantové agentury české republiky č. 14-09692J, Technologické agentury České republiky BROZEN č. TA01020366 a WtE č. TE02000236 a podpoře projektů Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy č. 21/2013 (specifický vysokoškolský výzkum).

### Literatura

- [1] Meers E., Van Slycken S., Adriaensen K., Ruttens A., Vangronsfeld J., Du Liang G., Witters N., Thewys T., Tack F.M.G.: The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere* 78 (1), 35–41 (2010).
- [2] Pohořelý M., Šyc M., Durda T., Hartman M., Svoboda K., Punčochář M.: Spalování kontaminované kukuřičné slámy ve fluidní vrstvě písku. 1st International Conference on Chemical Technology (ICCT 2013), Poster Presentations, pp. 1-16, Mikulov, Czech Republic, 08-10 April 2013.
- [3] Pohořelý M., Šyc M., Krček M., Tošnarová M., Durda T., Bludská J., Svoboda K., Hartman M., Punčochář M.: Fluidní spalování kontaminované biomasy II. Fluidized-bed Incineration of Contaminated Biomass II. Res. Report No. 6, pp. 38, Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i, Praha (2012).
- [4] Pohořelý M., Durda T., Šyc M., Tošnarová M., Krček M., Punčochář M.: Fluidní spalování kontaminované biomasy III. (Czech) Fluidized-bed Incineration of Contaminated Biomass III. Res. Report No. 4, pp. 27, Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Praha (2013)
- [5] Hartman M., Trnka O., Pohořelý M.: Minimum and Terminal Velocities in Fluidization of Particulate Ceramsite at Ambient and Elevated Temperature. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46 (22), 7260-7266 (2007).
- [6] Miles T.R., Miles Jr T.R., Baxter L.L., Bryers R.W., Jenkins B.M., Oden L.L.: Boiler Deposits from Firing Biomass Fuels. *Biomass and Bioenergy* 10, 125–138 (1996).
- [7] Pohořelý M., Svoboda K., Šyc M., Durda T., Punčochář M., Hartman M.: Zařízení pro fluidní spalování pevných paliv či suspenzí. Pat. No. PV 2013-638. Applied: 13.08.20.
- [8] Pohořelý M., Svoboda K., Šyc M., Durda T., Punčochář M., Hartman M.: Zařízení pro fluidní spalování pevných paliv či suspenzí. Pat. No. PUV-28341. Applied: 13.08.20.
- [9] Pohořelý M.: Spalování stabilizovaných kalů z čistíren odpadních vod ve fluidní vrstvě. Diplomová práce, Ústav chemických procesů AV ČR, Praha 2004.
- [10] Pohořelý M.: Vliv reakčních podmínek na fluidní zplyňování uhlí, dřeva a plastů. Doktorská disertační práce. Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i. Praha 2010.
- [11] Hartman M., Svoboda K., Pohořelý M., Trnka O.: Combustion of Dried Sewage Sludge in a Fluidized-Bed Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 3432–3441 (2005).
- [12] Pohořelý M., Svoboda K., Trnka O., Baxter D., Hartman M.: Gaseous Emissions from the Fluidized-bed Incineration of Sewage Sludge. *Chem. Pap.* 59, 458–463 (2005).
- [13] Pohořelý M., Vosecký M., Hejdová P., Punčochář M., Skobliá S., Stař M., Vošta J., Koutský B., Svoboda K.: Gasification of Coal and PET in Fluidized Bed Reactor. *Fuel* 85, 2458–2468 (2006).
- [14] Šyc M., Pohořelý M., Kameníková P., Habart J., Svoboda K., Punčochář M.: Willow Trees from Heavy Metals Phytoextraction as Energy Crops. *Biomass Bioenerg.* 37, 106–113 (2012).