

## FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ SUCHÉHO STABILIZOVANÉHO ČISTÍRENSKÉHO KALU Z ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD BRNO – MODŘICE

Michael Pohorelý<sup>a, b</sup>, Tomáš Durda<sup>a, b</sup>, Jaroslav Moško<sup>a, b</sup>, Boleslav Zach<sup>a, b</sup>, Karel Svoboda<sup>a</sup>, Michal Šyc<sup>a</sup>, Zdeněk Beňo<sup>c</sup>, Petra Kameníková<sup>a</sup>, Michal Jeremiáš<sup>a</sup>, Jiří Brynda<sup>a, c</sup>, Aneta Krausová<sup>a, b</sup>, Sjarhei Skoblija<sup>c</sup>, Miloslav Hartman<sup>a</sup>, Miroslav Punčochář<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., Rozvojová 135/1, 165 02 Praha 6, e-mail: pohorely@icpf.cas.cz

<sup>b</sup> Ústav energetiky, VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Praha 6, e-mail: michael.pohorely@vscht.cz

<sup>c</sup> Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, 166 28 Praha 6

V článku jsou shrnuty výsledky spalovacího testu suchého stabilizovaného čistírenského kalu z čistírny odpadních vod Brno – Modřice ve fluidním reaktoru se stacionární bublinovou vrstvou. Výsledky naznačují, že snížení obsahu sledovaných polutantů na hodnoty příkázané ve vyhlášce 415/2012 Sb. nepůjde dosáhnout výhradně primárními opatřeními v kotelní části zařízení na energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu.

*Klíčová slova: fluidní vrstva, spalování, čistírenský kal*

Došlo 21. 5. 2015, přijato 18. 6. 2015

### 1. Úvod

V České republice je v současné době (rok 2013) 2 382 čistíren odpadních vod (ČOV), z toho 48 mechanických a 2 334 mechanicko-biologických. V roce 2013 vyprodukovaly ČOV v České republice 156 287 tun sušiny kalů, což odpovídá cca 15 kg stabilizovaného čistírenského kalu (SČK) sušiny/rok a na jednoho obyvatele ČR [1]. Jak plyne z tab. 1, během předchozích 5 let bylo v průměru pouze 1,9 hm. % (vztaženo na sušinu) spalováno.

**Tab. 1** Množství zneškodněných kalů v ČR jednotlivými metodami za období let 2009 – 2013 (v tunách sušiny za rok) [1]

**Tab. 1** Methods of sewage sludge disposal and amounts of disposed sewage sludge in the Czech Republic in years 2009 – 2013 (tons on a dry basis per year) [1]

| Způsob zneškodnění kalu       | Rok         |             |             |             |             |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                               | 2009        | 2010        | 2011        | 2012        | 2013        |
| Přímá aplikace a rekultivace* | 42442       | 60639       | 61750       | 51912       | 54713       |
| Kompostování                  | 80727       | 45528       | 45985       | 53222       | 50384       |
| Skládkování                   | 5931        | 6177        | 9527        | 9340        | 7123        |
| <b>Spalování</b>              | <b>2179</b> | <b>3336</b> | <b>3538</b> | <b>3528</b> | <b>3232</b> |
| Jinak                         | 36885       | 55009       | 43018       | 50188       | 38822       |
| Celkem                        | 168164      | 170689      | 163818      | 168190      | 154274      |

\* přímá aplikace na zemědělskou a lesnickou půdu

### 2. Experimentální část

Experimentální fluidní reaktor s hustou bublinovou fluidní vrstvou se nachází ve čtvrté provozní hale Ústavu chemických procesů AV ČR, v.v.i. a je detailně popsán v citacích [2–9]. Odběr vzorků ze spalínovodu pro on-line a off-line analýzu je prováděn níže uvedenými postupy (tab. 2).

**Tab. 2** Odběr vzorků pro on-line a off-line analýzu

**Tab. 2** Flue gas sampling for on-line and off-line analysis

| Odběr    | Sledovaná látka  | Přístroj/Norma | Max. rozsah |
|----------|------------------|----------------|-------------|
| On-line  | O <sub>2</sub>   |                | 0–25 obj. % |
| On-line  | CO               | Horiba PG 350  | 0–5000 ppm  |
| On-line  | SO <sub>2</sub>  |                | 0–3000 ppm  |
| On-line  | NO <sub>x</sub>  |                | 0–2500 ppm  |
| On-line  | N <sub>2</sub> O | Uras 14        | 0–400 ppm   |
| Off-line | TZL              | ČSN EN 13284-1 |             |
| Off-line | Cl, F            | ČSN EN 1911    |             |

Vzhledem k lokálním dispozicím v místě odběru nelze realizovat isokinetický odběr. Obsah plynných chloridů a fluoridů vyjádřených jako HCl a HF (respektive Cl, F) ve spalínách byl stanoven iontovou chromatografií na přístroji Dionex ICS-5000 po jejich absorpci v roztoku NaOH o koncentraci 0,1 mol.l<sup>-1</sup>.

### 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti materiálu fluidní vrstvy a paliva

Jako primární materiál fluidní vrstvy pro spalovací test byl použit vzhledem k jeho vhodným mechanicko-transportním vlastnostem křemenný písek (tab. 3). Během experimentu byl písek postupně separován přepadem a fluidní vrstva byla nadále tvořena zejména popelem čistírenského kalu. Fyzikální vlastnosti popela stabilizovaného čistírenského kalu jsou v tab. 4. Fyzikální vlastnosti suchého SČK jsou uvedeny v tab. 5.

Práh fluidace písku experimentálně stanovený za provozních podmínek kotle (850 °C a tlak blízký atmosférickému) a vypočítaný činil 13 cm.s<sup>-1</sup> a popela SČK 24 cm.s<sup>-1</sup>. Prahová rychlost fluidace SČK byla vypočtena 31 cm.s<sup>-1</sup>. Výsledky naznačují, že částice SČK budou primárně hořet ve vrstvě nebo na ní.

**Tab. 3** Fyzikální vlastnosti materiálu fluidní vrstvy**Tab. 3** Physical properties of fluidized bed material

| Materiál  | Písek    |
|---|----------|
| Velikost částic (mm)                                    | 0,5–0,71 |
| Střední velikost částic (mm)                            | 0,605    |
| Sypná hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )                    | 1500     |
| Zdánlivá hustota (kg.m <sup>-3</sup> )                  | 2550     |
| Skutečná hustota (kg.m <sup>-3</sup> )                  | 2550     |
| Porozita částice (%)                                    | –        |
| Mezerovitost vrstvy (%)                                 | 41       |
| Prahová rychlost fluidace* (cm.s <sup>-1</sup> )        | 25       |
| Prahová rychlost fluidace** (cm.s <sup>-1</sup> )       | 13       |
| Prahová rychlost úplné fluidace* (cm.s <sup>-1</sup> )  | 32       |
| Prahová rychlost úplné fluidace** (cm.s <sup>-1</sup> ) | 18       |

\*při 25 °C a 101,325 kPa

\*\*při 850 °C a 101,325 kPa

**Tab. 4** Fyzikální vlastnosti popela SČK**Tab. 4** Physical properties of ash from stabilized sewage sludge

| Materiál  | Brno – A |
|---|----------|
| Velikost částic (mm)                                    | 0,71–2,0 |
| Střední velikost částic (mm)                            | 1,36     |
| Sypná hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )                    | 581      |
| Zdánlivá hustota (kg.m <sup>-3</sup> )                  | 976      |
| Skutečná hustota (kg.m <sup>-3</sup> )                  | 2761     |
| Porozita částice (%)                                    | 65       |
| Mezerovitost vrstvy (%)                                 | 40       |
| Prahová rychlost fluidace* (cm.s <sup>-1</sup> )        | 36       |
| Prahová rychlost fluidace** (cm.s <sup>-1</sup> )       | 24       |
| Prahová rychlost úplné fluidace* (cm.s <sup>-1</sup> )  | 55       |
| Prahová rychlost úplné fluidace** (cm.s <sup>-1</sup> ) | 46       |

\*při 25 °C a 101,325 kPa

\*\*při 850 °C a 101,325 kPa

Chemické složení písku a popela SČK bylo stanoveno pomocí rentgenové fluorescenční analýzy. Písek je složen z SiO<sub>2</sub> (99,7 hm. %) a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,2 hm. %). Izbylých 0,1 hm. % jsou příměsi, kdy obsah jednotlivých komponent není větší než 0,02 hm. %. Chemické složení popela SČK je uvedeno v tab. 6.

Chemické složení popela SČK a materiálu fluidní vrstvy po experimentu prokazuje, že materiál fluidní vrstvy je tvořen dominantně popelem SČK. Rozdíl je dán zejména v obsahu S a Cl, což lze vysvětlit rozdílnou teplotou pro normativní přípravu popela pro speciální analýzy (550 °C), teplotou spalovacího testu (cca 850 °C) a dále rozdílným časem zdržení za zvýšené teploty (2 h vs. cca 6 h).

**Tab. 5** Fyzikální vlastnosti suchého SČK**Tab. 5** Physical properties of dry stabilized sewage sludge

| Materiál  | Brno - SČK |
|---|------------|
| Velikost částic (mm)                                    | 0,5–2,0    |
| Střední velikost částic (mm)                            | 1,25       |
| Sypná hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )                    | 768        |
| Zdánlivá hustota (kg.m <sup>-3</sup> )                  | 1542       |
| Skutečná hustota (kg.m <sup>-3</sup> )                  | 1740       |
| Porozita částice (%)                                    | 11         |
| Mezerovitost vrstvy (%)                                 | 50         |
| Prahová rychlost fluidace* (cm.s <sup>-1</sup> )        | 45         |
| Prahová rychlost fluidace** (cm.s <sup>-1</sup> )       | 31         |
| Prahová rychlost úplné fluidace* (cm.s <sup>-1</sup> )  | 74         |
| Prahová rychlost úplné fluidace** (cm.s <sup>-1</sup> ) | 68         |

\*při 25 °C a 101,325 kPa

\*\*při 850 °C a 101,325 kPa

**Tab. 6** Chemické složení materiálu fluidní vrstvy po spalovacím testu a popela laboratorně připraveného ze SČK**Tab. 6** Chemical composition of fluidized bed material after the combustion test and chemical composition of laboratory prepared ash from stabilized sewage sludge

| Složka                         | Jednotka | Brno – FV | Brno – A |
|--------------------------------|----------|-----------|----------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | hm. %    | 17,5      | 16,0     |
| CaO                            | hm. %    | 14,5      | 14,0     |
| Cl                             | hm. %    | PMD       | 0,0660   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | hm. %    | 14,0      | 13,9     |
| K <sub>2</sub> O               | hm. %    | 1,63      | 1,64     |
| MgO                            | hm. %    | 2,71      | 2,64     |
| MnO                            | hm. %    | 0,0910    | 0,0830   |
| Na <sub>2</sub> O              | hm. %    | 0,793     | 0,756    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | hm. %    | 18,7      | 18,2     |
| SO <sub>3</sub>                | hm. %    | 1,41      | 2,68     |
| SiO <sub>2</sub>               | hm. %    | 27,2      | 28,5     |
| TiO <sub>2</sub>               | hm. %    | 0,785     | 0,780    |
| Suma                           | hm. %    | 99,2      | 99,3     |

PMD - pod mezí detekce

**Palivo-energetické vlastnosti SČK**

Palivo-energetické vlastnosti suchého SČK jsou v tab. 7. Výsledky palivo-energetického rozboru potvrdily, že se jedná o vzorky, které lze označit jako typické pro stabilizovaný čistírenský kal vzniklý působením mezofilních mikroorganismů.

**Tab. 7** Palivo-energetické vlastnosti SČK

**Tab. 7** Proximate and ultimate analysis and calorific values of stabilized sewage sludge

| Vlastnost, veličina | Jednotka            | Brno – SČK |       |      |
|---------------------|---------------------|------------|-------|------|
|                     |                     | raw        | dry   | daf  |
| Vlhkost             | hm. %               | 8,94       | –     | –    |
| Hořlavina           | hm. %               | 51,0       | 56,0  | 100  |
| Popel (550 °C)      | hm. %               | 40,0       | 44,0  | –    |
| Prchavá hořlavina   | hm. %               | 44,0       | 48,3  | 86,3 |
| Fixní uhlík         | hm. %               | 7,00       | 7,7   | 13,7 |
| Spalné teplo        | MJ.kg <sup>-1</sup> | 11,6       | 12,8  | 22,8 |
| Výhřevnost          | MJ.kg <sup>-1</sup> | 10,8       | 11,8  | 21,1 |
| C                   | hm. %               | 26,3       | 28,9  | 51,6 |
| H                   | hm. %               | 4,00       | 4,39  | 7,84 |
| N                   | hm. %               | 3,73       | 4,10  | 7,31 |
| O                   | hm. %               | 16,1       | 17,7  | 31,6 |
| S celková           | hm. %               | 0,820      | 0,900 | 1,61 |
| S spalitelná        | hm. %               | 0,726      | 0,797 | 1,42 |
| Cl                  | mg.kg <sup>-1</sup> | 394        | 433   | 773  |
| F                   | mg.kg <sup>-1</sup> | 232        | 255   | 455  |

#### 4. Cíl spalovacího testu

Hlavním cílem spalovacího testu je stanovení účinnosti spalovacího procesu a emisí hlavních nežádoucích polutantů (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, tuhé znečišťující látky – TZL, HCl, HF) za praktických provozních podmínek. Účinnost spalovacího procesu je porovnávána na základně chemického nedopalu (koncentrace CO ve spalinách) a mechanického nedopalu (obsah uhlíku v pevné fázi).

#### 5. Legislativa ochrany ovzduší

Současná legislativa ochrany ovzduší se řídí zákonem 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [10] a vyhláškou 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší [11]. Výsledky jsou srovnány se specifickými emisními limity pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad (vyhláška 415/2012 Sb., příloha 4).

#### 6. Spalovací test

Provozní podmínky experimentu jsou uvedeny v tab. 8, emise vybraných látek v tab. 9, obsah nedopalu (uhlíku) v popelovinách v tab. 10, konverze N, S, Cl a F z paliva do spalin suchých na molárním základě v tab. 11 a bilance popelovin v tab. 12.

Koncentrace CO ve spalinách byla na úrovni okolo 16 mg.m<sup>-3</sup>, což s ohledem na velikost zařízení a nízkou teplotu nadvrstvého prostoru indikuje dobrou kvalitu procesu spalování a dobré rozptýlení paliva ve vrstvě.

**Tab. 8** Provozní podmínky experimentu

**Tab. 8** Experimental conditions

| Čistírenský kal                                      |          |
|--|----------|
| Materiál fluidní vrstvy                              | písek    |
| Spalovací medium                                     | vzduch   |
| λ (-)  | 1,72     |
| Délka experimentu (hod:min)                          | 3:43     |
| Dávkování paliva (g.h <sup>-1</sup> )                | 488      |
| Dávkování suchého paliva (g.h <sup>-1</sup> )        | 445      |
| O <sub>2</sub> ve spalinách* (obj. %)                | 8,9      |
| Teplota ve fluidní vrstvě (°C)                       | 864 ± 10 |
| Teplota ve freeboardu (°C)                           | 857 ± 10 |
| Teplota v horkém cykolu (°C)                         | 387 ± 10 |
| Teplota v odběrovém místě pro vzorkování spalin (°C) | 233 ± 10 |

\* v suchých spalinách bez pneustransportu

**Tab. 9** Průměrné emise vybraných látek

**Tab. 9** Average emissions of selected compounds

| Sledovaná látka                        | Hodnota | Emisní limit (denní průměr) |
|--|---------|-----------------------------|
| NO <sub>x</sub> (mg.m <sup>-3</sup> )  | 1618    | 200                         |
| SO <sub>2</sub> (mg.m <sup>-3</sup> )  | 1817    | 50                          |
| CO (mg.m <sup>-3</sup> )               | 16      | 50                          |
| N <sub>2</sub> O (mg.m <sup>-3</sup> ) | 390     | –                           |
| TZL (mg.m <sup>-3</sup> )              | 62      | 10                          |
| HCl (mg.m <sup>-3</sup> )              | 11      | 10                          |
| HF (mg.m <sup>-3</sup> )               | 8       | 1                           |

**Tab. 10** Nedopal v popelovinách

**Tab. 10** Unburned carbon in ash

| Čistírenský kal               | (hm. %) |
|-------------------------------|---------|
| n/F                           | 0,026   |
| n/F <sup>d</sup>              | 0,029   |
| n/C <sub>F</sub> <sup>d</sup> | 0,100   |

n – nedopal F<sup>d</sup> - suché palivo

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

**Tab. 11** Konverze N, S, Cl a F z paliva do spalin suchých

**Tab. 11** Conversion of N, S, Cl and F from fuel to dry flue gas

| Reakce             | Konverze* (mol.mol <sup>-1</sup> ) |
|--------------------|------------------------------------|
| N→NO <sub>x</sub>  | 0,0701                             |
| N→N <sub>2</sub> O | 0,0174                             |
| S→SO <sub>2</sub>  | 0,589                              |
| Cl→HCl             | 0,157                              |
| F→HF               | 0,209                              |

\* konverze látky plyn/palivo

**Tab. 12** Bilance popelovin**Tab. 12** Ash balance

| Složka                    | Četnost<br>(hm. %) | Nedopal<br>(hm. %) |
|---------------------------|--------------------|--------------------|
| Ložový popel              | 96,7               | <0,1               |
| Cyklonový popílek         | 3,2                | 1,6                |
| Spaliny a ulétavý popílek | 0,1                | 6,2                |

Obsah CO ve spalinách byl na třetině legislativního limitu pro spalovací stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad. Též obsah nedopalu v popelovinách je velmi nízký, viz tab. 9. Uvedené naznačuje, že proces spalování byl veden za vhodných a ustálených podmínek.

Ve spalinách byl měřen i obsah legislativně sledovaných polutantů TZL, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, a dále koncentrace plyných chloridů vyjádřených jako HCl, koncentrace plyných fluoridů vyjádřených jako HF a koncentrace N<sub>2</sub>O, kde emisní limit stanoven není. Obsah SO<sub>2</sub> a HCl byl sledován i z důvodu, že S a Cl mají zásadní vliv na chování a tím i na distribuci stopových prvků, zejména pak těžkých kovů. Obsah TZL za horkým cyklónem byl několikanásobně vyšší než je legislativní limit dle vyhlášky – citace [11]. Obsah NO<sub>x</sub> ve spalinách překročil legislativní limit 8x a obsah SO<sub>2</sub> 36x dle vyhlášky – viz citace [11]. Obsah N<sub>2</sub>O byl přijatelný a průměrná hodnota koresponduje s nízkým obsahem CO ve spalinách. Obsah HCl ve spalinách byl též vyšší, než je legislativní limit a obsah HF překročil legislativní limit 8x dle vyhlášky – citace [11].

Konverze N, S, Cl a F byla velmi rozdílná pro jednotlivé prekurzory legislativně zpoplatněných a regulovaných emisních polutantů. Velmi nízká byla konverze N na N<sub>2</sub>O a též na NO<sub>x</sub>, což lze vysvětlit mechanismem jejich vzniku. Dominantní dusíkatou prchavou složkou jsou NH<sub>3</sub> a HCN, jejichž koncentrace závisí na teplotě a mechanismu odplynění. Za nižších teplot spalování ve fluidním ohništi je dominantní složkou NH<sub>3</sub>. NO proto vzniká dvěma způsoby: oxidací dusíkatých skupin v plynné fázi a heterogenně katalyzovanou oxidací dusíku vázaného v pevném zbytku, která je u SČK málo významná. V prvním případě se NH<sub>3</sub> může rozkládat na NH<sub>2</sub> a NH radikály, které mohou být buď oxidovány kyslíkem za tvorby NO, anebo mohou reagovat s dostupnými NO a OH radikály za tvorby molekuly dusíku. NH<sub>3</sub> je tedy dle převládajících okolností buď zdrojem, anebo redukujícím činidlem NO. HCN se může rozkládat na NCO pomocí kyslíkového radikálu a následně reagovat s NO za vzniku N<sub>2</sub>O, což je hlavní mechanismus tvorby N<sub>2</sub>O během spalování pevných paliv ve fluidním ohništi. Formulí (NO<sub>x</sub>) se označuje směs oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>), který je toxičtější a dráždivější než NO. Podle našich zkušeností je za „praktických“ spalovacích podmínek pouze 9 – 9,5 % z celkových emisí NO<sub>x</sub> tvořeno oxidem dusičitým. Výsledky korespondují s našimi dřívějšími pracemi, kdy bylo vyšetřeno, že konverze palivového dusíku

na NO<sub>x</sub> byla pouze necelých 10 hm. % a na N<sub>2</sub>O cca 5 hm. % [2, 4, 5, 13].

Konverze síry byla vysoká, což dokazuje nízkou samo-odsiřovací schopnost SČK z důvodu nízkého obsahu kovů alkalických zemin a alkalických kovů ve studovaném kalu. Druhou příčinou je vysoký obsah P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> v kalu, který reaguje s CaO za vzniku např. Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, a tím brání odsíření [13, 14]. Hlavními formami síry v kalech jsou merkaptany, sulfidy, thiofén, sulfoxidy, sulfony a sulfáty, ze kterých se síra snadno uvolňuje a reaguje na SO<sub>2</sub>, což je prokázáno nejenom diskutovanými experimenty, ale i analytickým stanovením obsahu celkové a spalitelné síry, viz tab. 6. Nízkou konverzi Cl, respektive F, do spalin lze vysvětlit relativně nízkou spalovací teplotou, vysokým přebytkem vzduchu, vysokým obsahem popela v SČK a jeho složením [15, 16, 17].

Po experimentu bylo stanoveno zrnitostní složení a bylo zjištěno, že vrstva neobsahuje nadsítnou frakci. Nedošlo tudíž k významné sintraci primárního materiálu fluidní vrstvy a popela. V případě zařízení se stacionární fluidní vrstvou nelze distribuci popelovin jednoznačně predikovat (diskutovat), neboť je určena technologickou linkou zařízení a konstrukcí jednotlivých technologických celků (např. zařízení s recirkulací či bez recirkulace popela). Distribuce částic popela je význačně posunuta směrem k ložovému popelu, což naznačuje, že oter popela z SČK je velmi nízký a nezatíží význačně čistící trať.

## 7. Závěr

Výsledky naznačují, že snížení obsahu sledovaných polutantů na hodnoty přikázané ve vyhlášce 415/2012 Sb. nepůjde dosáhnout výhradně primárními opatřeními v kotelní části zařízení na energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu (suchá aditivní metoda odsíření + dehalogenace, stupňovitý přívod vzduchu apod.) a optimalizací provozních podmínek (přebytek vzduchu, teplota apod.).

V reálném zařízení na energetické využití stabilizovaného čistírenského kalu bude nutné navrhnout jednoduchou komplexní čistící trať, která by, vzhledem k předpokládanému výkonovému měřítku, neměla obsahovat vodní hospodářství. Proto se nabízí např. inovativní metoda sekundárního čištění spalin, tzv. 4D-filtrace v kombinaci s vhodnými primárními opatřeními na snížení legislativně sledovaných polutantů.

4D-filtrace je katalytický filtrační proces umožňující v jediném zařízení současné odstraňování všech legislativně sledovaných polutantů ze spalin. Na katalytických svěčkových filtračních elementech dochází k odstranění pevných částic (s nimi i těžkých kovů). Kyselé plyny (zejména SO<sub>2</sub>, HCl, HF) jsou sorbovány na sorbent obsažený ve filtračním koláči. Na vlastní katalytické vrstvě filtračních elementů pak dochází k oxidaci organických látek a redukci oxidů dusíku.

## Poděkování

Tato práce vznikla díky finanční podpoře projektu Technologické agentury České republiky „Centrum kompetence pro energetické využití odpadů“ č. TE02000236 a podpoře projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy č. 20/2015 (specifický vysokoškolský výzkum).

Tato práce byla prezentována na semináři Středoevropského energetického institutu, Cenergi II, 11. – 13. 2. 2015 Dolní Morava, Česká republika.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

A – popel

ČOV – čistírna odpadních vod

FV – fluidní vrstva

PMD – pod mezí detekce

SČK – stabilizovaný čistírenský kal

TZL – tuhé znečišťující látky

## Literatura

1. Český statistický úřad: Katalog produktů: Vodovody, kanalizace a vodní toky 2013. Dostupné na: [http://www.czso.cz/csu/2014edicniplan.nsf/publ/280021-14-r\\_2014](http://www.czso.cz/csu/2014edicniplan.nsf/publ/280021-14-r_2014) (19.10.2014).
2. Pohořelý M.: Spalování stabilizovaných kalů z čistíren odpadních vod ve fluidní vrstvě. Diplomová práce, Ústav energetiky VŠCHT Praha & Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., Praha 2004.
3. Pohořelý M.: Vliv reakčních podmínek na fluidní zplyňování uhlí, dřeva a plastů. Doktorská disertační práce. Ústav energetiky VŠCHT Praha & Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., Praha (2010).
4. 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).
5. 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).
6. Pohořelý M., Vosecký M., Hejdová P., Punčochář M., Skoblia S., Staf M., Vošta J., Koutský B., Svoboda K.: Gasification of Coal and PET in Fluidized Bed Reactor. *Fuel* 85, 2458–2468 (2006).
7. 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).
8. 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.
9. 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. Pohořelý M., Svoboda K., Hart-

- man M.: Feeding Small Quantities of Particulate Solids. *Powder Technol.* 142, 1–6 (2004).
10. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší.
  11. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší (novela 155/2014).
  12. Hartman M., Trnka O., Pohořelý M.: Oxidace organického dusíku ve stechiometrických a bilančních výpočtech spalování stabilizovaného čistírenského kalu. *Chem. Listy* 101(4), 310–314 (2007).
  13. Hartman M., Pohořelý M., Trnka O.: Chemická a palivová charakteristika anaerobně stabilizovaného čistírenského kalu a jeho popela. *Chem. Listy* 100(9), 813–820 (2006).
  14. Pohořelý M., Durda T., Moško J., Šyc M., Kameníková P., Zach B., Svoboda K., Hartman M., Beňo Z., Parschová H., Houdková L., Punčochář M.: Palivo-energetické vlastnosti stabilizovaných čistírenských kalů. *Odpadové fórum. Hustopeče.* 18. – 20. 3. 2015
  15. Yong Chi, Jun-ming Wen, Dong-ping Zhang, Jian-hua Yan, Ming-Jiang Ni, Ke-fa Cen: HCl Emission Characteristics and BP Neural Networks Prediction in MSW/Coal Co-Fired Fluidized Beds. *Journal of Environmental Sciences* 17, 699–704 (2005).
  16. Haimeng Hou, Shiyuan Li, Qinggang Lu: Gaseous Emission of Monocombustion of Sewage Sludge in a Circulating Fluidized Bed. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 5556–5562 (2013).
  17. Werther J., Ogada T.: Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* 25, 55–116 (1999).

## Summary

**Michael Pohořelý<sup>a, b</sup>, Tomáš Durda<sup>a, b</sup>, Jaroslav Moško<sup>a, b</sup>, Boleslav Zach<sup>a, b</sup>, Karel Svoboda<sup>a</sup>, Michal Šyc<sup>a</sup>, Zdeněk Beňo<sup>c</sup>, Petra Kameníková<sup>a</sup>, Michal Jeremiáš<sup>a, b</sup>, Jiří Brynda<sup>a, c</sup>, Aneta Krausová<sup>a, b</sup>, Siarhei Skoblia<sup>c</sup>, Miloslav Hartman<sup>a</sup>, Miroslav Punčochář<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Institute of Chemical Process Fundamentals of the Czech Academy of Sciences, v.v.i., Rozvojová 135, 165 02 Prague 6, Czech Republic,  
E-mail: pohorely@icpf.cas.cz

<sup>b</sup> Department of Power Engineering, University of Chemistry and Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague 6, Czech Republic,  
E-mail: michael.pohorely@vscht.cz

<sup>c</sup> Department of Gas, Coke and Air Protection, University of Chemistry and Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague 6

**Fluidized bed incineration of dry stabilized sewage sludge from the wastewater treatment plant Brno – Modřice**

The article summarizes the results of the combustion test of dry, stabilized sewage sludge from the

wastewater treatment plant Brno – Modřice in the fluidized-bed reactor with a stationary bubbling bed.

The results of the combustions test bring information about the composition of the flue gas under practical combustion conditions and conversions/concentrations of S, Cl and F compounds in the flue gas.

The average CO concentration in the flue gas was  $16 \text{ mg.m}^{-3}$ , and amount of unburnt carbon in ash was 0.029 wt. % (based on dry fuel), which with regard to the size of equipment and the low freeboard temperature indicates good quality of the combustion process and appropriate fuel dispersion/mixing in the fluidized bed.

The average content of  $\text{NO}_x$  in the flue gas was  $1618 \text{ mg.m}^{-3}$ , exceeding the legal limits eight times. The average content of  $\text{SO}_2$  in the gas was  $1817 \text{ mg.m}^{-3}$ , exceeding the legal limit (Decree No. 415/2012 Coll.) 36 times.

The average content of the dust in the flue gas ( $62 \text{ mg.m}^{-3}$ ) behind the hot cyclone was several times higher than the legal limit.

The average content of HCl ( $11 \text{ mg.m}^{-3}$ ) in the flue gas was also much higher than the legal limit. Similarly the content of HF ( $8 \text{ mg.m}^{-3}$ ) exceeded the legal limit eight times.

$\text{N}_2\text{O}$  content was acceptable and the average value corresponds to the low content of CO in the flue gas.

The results indicate that the reduction of concentrations of the monitored pollutants to the values required by the Decree No. 415/2012 Coll. cannot be attained only by primary measures in units for incineration of dry stabilized sewage sludge with heat utilization.

Keywords: fluidized bed, incineration, sewage sludge