

IMOBILIZACE TĚŽKÝCH KOVŮ Z POPELOVIN ZE SPALOVNY KOMUNÁLNÍCH ODPADŮ

Michael Pohořelý^{a,b}, Michal Šyc^a, Markéta Tošnarová^a,

Markéta Zychová^{a,b}, Martin Keppert^c, Miroslav Punčochář^a

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

b) Ústav energetiky, VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Praha 6 (pohorely@icpf.cas.cz, pohorelm@vscht.cz)

c) Katedra materiálového inženýrství a chemie, ČVUT Praha, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Článek se zabývá problematikou využití popelovin vznikajících spalováním tuhého komunálního odpadu s důrazem na imobilizaci těžkých kovů. V článku jsou shrnuty a diskutovány význačné fyzikálně-chemické charakteristiky sledovaných frakcí popelovin s ohledem na použití ve stavebnictví, stanoveny a porovnány vyluhovatelnosti vybraných těžkých kovů ze surových popelovin a ze solidifikátů s 3 % a 10 % přídavkem popeloviny s limity uvedenými v evropské legislativě.

Došlo 12. 10. 10, přijato 18. 11. 10

1. Úvod

Směrnice Evropského parlamentu a rady ES č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 [1] o odpadech stanovuje priority odpadového hospodářství a nakládání s odpady ve Společenství. Uvedená směrnice stanovuje jasnou hierarchii pro nakládání s odpady, přičemž hlavním cílem je vzniku odpadů předcházet. Pořadí priorit v odpadovém hospodářství stanovuje Článek 4, bod 1 Směrnice v následujícím pořadí:

- předcházet vzniku,
- připravit k opětovnému použití,
- recyklovat,
- jinak využít, například energeticky,
- odstranit.

Současná snaha maximalizovat využití nefosilních paliv spolu s ústupem od skládkování vede k nárůstu energetického využití nerecyklovatelných odpadů. Přestože dochází při spalování odpadů k značné objemové i hmotnostní redukci (na cca 30 % původní hmotnosti a 10 % původního objemu odpadu), množství produkovaných popelovin ze spalování je obrovské. Bezpečné materiálové využití těchto pevných zbytků je velmi žádoucí jak z hlediska trvale udržitelného rozvoje tak z environmentálního hlediska, jedná se tedy o jeden z důležitých úkolů současnosti.

V České republice bylo energeticky využito v roce 2008 pouze 13 hm. % tuhých komunálních odpadů (TKO) [2]. Přehled nakládání s komunálními odpady (KO) ve vybraných státech EU v roce 2008 je v níže uvedené tabulce (**Tab. 1**) [3–5].

Tab. 1 Přehled nakládání s KO v roce 2008 v EU

	Recyklace (hm. %)	Spalování (hm. %)	Kompostování (hm. %)	Skládkování (hm. %)
EU27	23	20	17	40
ČR	2	13	2	83
Německo	48	35	17	1
Francie	18	32	15	36
Itálie	11	11	34	44

Vzhledem k charakteru popelovin ze spaloven odpadů a celosvětově značné produkci stavebních materiálů se jedním z potenciálně perspektivních směrů využití, podobně jako pro popeloviny z uhelných elektráren, jeví jejich přídavek do betonových směsí, jako náhrada nejjemnější frakce plnidla [6, 7]. Popeloviny ze spalování odpadů jsou ovšem nesrovnatelně heterogennější a z hlediska některých vlastností i méně vhodné. Hlavním negativem jsou pravděpodobně nebezpečné vlastnosti některých popelovin způsobené převážně persistentními organickými polutanty (POPs) a těžkými kovy (TK) deponovanými na popelovinách. Celkový charakter popelovin je především zásadně ovlivněn složením spalovaného odpadu a technologií spalovny, obojí se ovšem značně liší zařízení od zařízení. Obecně je možné popeloviny ze spaloven odpadů rozdělit do dvou skupin dle místa výstupu ze spalovací komory – na strusku a popílky [8]. Značné rozdíly ve vlastnostech, složení i kontaminaci byly zjištěny mezi struskou a popílky, ale i mezi jednotlivými popílky dle místa odloučení ze spalin [9]. Popeloviny kontaminované POPs nejsou pro další použití vhodné a nakládá se s nimi jako s nebezpečným odpadem. V případě těžkých kovů to ovšem neplatí, neboť inkorporací popelovin do betonové směsi a převedením těžkých kovů do méně rozpustné či nerozpustné formy dochází ke snížení mobility těžkých kovů a je tedy možné tento přístup zařadit mezi metody solidifikace/stabilizace, tj. S/S techniky nakládání s odpady [10].

2. Cíle práce

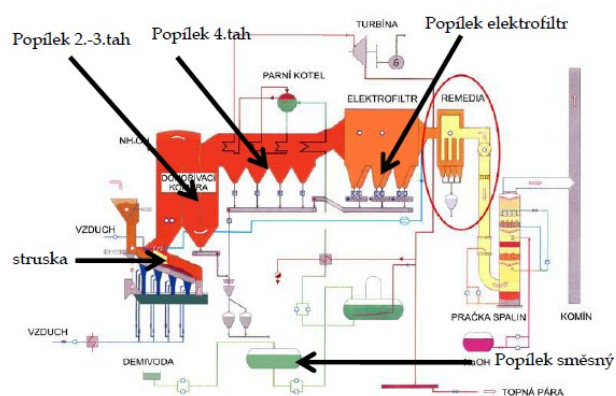
Cílem práce bylo posoudit možnost imobilizace těžkých kovů z popelovin ze spalovny komunálních odpadů jejich použitím jako plniva pro výrobu betonu. Byly sledovány čtyři dílčí cíle:

- Stanovit význačné fyzikálně-chemické charakteristiky popelovin s ohledem na jejich použití ve stavebnictví.
- Stanovit vyluhovatelnost TK ze surových popelovin.

- Porovnat vyluhovatelnost vybraných těžkých kovů ze surových popelovin a ze solidifikátů s 3% a 10% obsahem popelovin.
- Porovnat vyluhovatelnost TK s legislativními limity.

3. Experimentální část

Jako experimentální materiály byly použity popílky a struska ze spalovny komunálních odpadů Termizo a.s., Liberec. Místa odloučení popeloviny ze spalin jsou označena na Obr. 1 a jejich výčet je v Tab. 2. Detailní popis technologie spalovny je např. v citaci [9, 11–13].



Obr. 1 Označení míst původu vzorků z traktu spalin

Tab. 2 Přehled zkoumaných vzorků

Popelovina	Symbol	Teplota odloučení (°C)
Struska	PS	≈ 850
Popílek z 2. a 3. tahu kotle	PA	≈ 700
Popílek ze 4. tahu kotle	PB	700–500
Popílek z elektrostatických odlučovačů	PC	500–250

Vzorky byly na spalovně odebírány po dobu 48 h ve 2 h intervalech a dodány v plných 50 l barelech. Struska byla namleta na kulovém mlýnu a proseta přes síto s velikostí ok 4 mm. Ostatní popeloviny nebyly upraveny mletím, pokud není uvedeno jinak. Vzorky byly homogenizovány pomocí míchačky (30 min. míchání) a kvartací z nich byla vybrána reprezentativní část pro stanovení sledovaných vlastností a pro vyhotovení solidifikátů (betonů).

Příprava solidifikátů byla provedena dle níže uvedeného postupu a složení čerstvé směsi je uvedeno v Tab. 3. Byly připraveny dvě série solidifikátů (betonů), které obsahovaly přibližně 3 a 10 % jednotlivých popelovin. Pro posouzení vlivu popelovin na vlastnosti solidifikátů byl dále připraven referenční materiál bez obsahu popelovin. Použitý cement byl portlandský CEM I 42,5 R, jako kamenivo byl použit těžký písek a dvě frakce drceného kameniva. Popeloviny byly ve směsích dávkovány jako náhrada jemného kameniva do 4 mm.

Význačné fyzikálně-chemické vlastnosti diskutovaných solidifikátů jsou v citaci [14]. Pro vyluhovací testy byly solidifikáty nadrceny na frakci < 4 mm.

Tab. 3 Složení čerstvé směsi pro přípravu solidifikátů.

Obsah popeloviny (hm. %)	Cement (kg/m ³)	Popelovina (kg/m ³)	Kamenivo (kg/m ³)		
			0–4 (mm)	4–8 (mm)	8–16 (mm)
0	400	0	610	260	870
3	400	70	540	260	870
10	400	230	380	260	870

Orientační obsah popelotvorných prvků v popelovinách byl stanoven pomocí rentgenové fluorescenční spektroskopie (XRF). Obsah síry byl stanoven metodou dle Eschky (ČSN ISO 351). Obsah chloru byl zjištěn pomocí instrumentální neutronové aktivační analýzy (INAA). Pro stanovení obsahu vybraných těžkých kovů ve vzorcích byla použita metoda mikrovlnného rozkladu pomocí směsi kyselin (HNO₃/HCl/HF) s následným stanovením těžkých kovů v digestátu metodou ICP-OES (Varian Vista Pro). Stanovení pucolánové aktivity bylo provedeno dle ČSN EN 725-8. Ztráta žiháním (m_z) byla stanovena na základě normy ČSN EN 12879. Testy vyluhovatelnosti byly provedeny na základě ČSN EN 12457-2 (poměr kapalná fáze/pevná fáze 10:1, 24 hodin, destilovaná voda). Obsah těžkých kovů ve vyluzích byl stanoven metodou ICP-OES.

4. Výsledky a diskuse

4.1. Fyzikálně-chemické vlastnosti popelovin

Nejvyšší sypanou hmotnost měla struska. Sypaná hmotnost popelovin dále klesala s jejich rostoucí dobou zdržení v traktu spalin (Tab. 4). To je dáno charakterem materiálu, neboť struska je odebírána z roštu, kde zůstávají nejtěžší části popelovin jako skleněné a kovové zbytky apod. Zjištěné hodnoty sypaných hmotností korespondují s výsledky uváděnými v literatuře. Například pro strusku je uváděna sypaná hmotnost v rozmezí 1100–1500 kg/m³ [15]. V některých případech je uváděno až 2300 kg/m³, to je dáno hlavně odlišným způsobem odvodu strusky ze spalovací komory [16].

Nejvyšší ztráta žiháním byla stanovena pro PB, dále PA, PC a nejnižší obsah látek, které jsou odstraněny z popelovin do teploty 550 °C, měl vzorek PS (viz Tab. 4). Na ztrátu žiháním mají v případě popelovin vliv především dva parametry – obsah uhlíkatého nedopalů a těkavých látek. V případě strusky, kdy nelze předpokládat kondenzaci těkavých látek ze spalin, je ztráta žiháním dána především hmotnostním podílem uhlíku (nedopalů). U popílků s jejich rostoucí dobou zdržení ve spalinách klesá i teplota v místě odloučení a dochází tedy k postupné kondenzaci těkavých látek z plynné fáze spalin na pevnou fázi popílku, roste tedy i ztráta žiháním [17]. Obsah uhlíku ve vzorcích popílků byl 0,6–0,8 hm. %, zbytek ztráty žiháním byl tedy dán hlavně těkavými anorganickými sloučeninami, i když

část připadá i na chemicky vázanou vodu. Všechny popeloviny splnily legislativní požadavek na vyhoření materiálu (max. ztráta žiháním 5 hm. %) [18].

Rozpustnost jednotlivých frakcí popelovin v destilované vodě rostla $PS < PA < PB < PC$, což úzce souvisí s jejich chemickým složením, viz **Tab. 6**.

pH vzorků se během zkoušky příliš neměnilo a rozpouštěcí rovnováha ve vzorcích se ustavila rychle. Téměř neutrální pH vykazoval roztok z popílku z elektrofiltru, mírně zásaditý výluh měla struska, pro zbylé dva sledované vzorky bylo naměřeno zásadité pH okolo 12.

Tab. 4 Vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky studovaných popelovin (R – rozpustnost v destilované vodě, m_z – ztráta žiháním, LBD – sypná hmotnost)

Vzorek	pH	R (hm. %)	m_z (hm. %)
PS	10,0	10	1,2
PA	12,3	14	2,6
PB	12,0	16	3,9
PC	6,7	51	2,2
	LBD (hm. %)	Pucolánová aktivita	
PS	1 200	ANO	
PA	820	ANO	
PB	670	ANO	
PC	310	NE	

4.2. Prvkové složení popelovin

Popeloviny byly porovnávány v závislosti na obsahu:

- síry a chloru,
- popelotvorných prvků (PP),
- těžkých kovů (TK).

Stanovené obsahy síry a chloru jsou uvedeny v Tab. 5. Síra i chlor mají vliv na těkavost většiny těžkých kovů a popelotvorných prvků, tudíž i na jejich distribuci mezi jednotlivé frakce popelovin a na vlastnosti uvedené v **Tab. 4**. V popelovinách se síra vyskytuje ve formě síranů, sulfidů, jako volná síra a síra organicky vázaná. V případě síry závisí těkavost většiny TK a PP především na formě jejího výskytu:

- ve formě síranů zvyšuje teplotu těkání,
- ve formě sulfidů a organicky vázaná teplotu těkání snižuje.

Obsah síry v popelovinách klesal v následujícím pořadí $PA > PC > PB > PS$. Nejvyšší obsah síry v PA je dán počátkem průběhu tzv. sulfonace (sekundární reakce látek deponovaných na popílku s plynným SO_2 a SO_3 za vzniku síranů), která probíhá v příslušném teplotním intervalu. Mírné zvýšení obsahu S v PC oproti PB je pak pravděpodobně způsobeno kondenzací sulfidů na pevnou fázi popílku. Obsah síry ve strusce je dán hlavně stabilní frakcí netěkavých síranů vzniklých přímo v ohništi [8]. Dominantní formou síry v popelovinách tedy budou jednoznačně sírany.

Chlor obecně teplotu těkání TK a PP snižuje, neboť s kovy vytváří těkavé chloridy. Obsahy chloru dobře korelují s údaji o rozpustnosti jednotlivých vzorků. Obsah síranů nemá na rozpustnost jednoznačný vliv [19].

Obsah obou prvků (Cl i S) v popelovinách je nežádoucí pro následné využití ve stavebnictví – chloridy působí v železobetonových směsích korozivně na železné výztuže a způsobují také drobení betonů. Síra rovněž působí korozivně na betony a snižuje jejich pevnost [20].

Tab. 5 Obsah chloru a síry ve zkoumaných popelovinách (hm. %)

Prvek	PS	PA	PB	PC
S (hm. %)	2,0	8,8	4,3	4,9
Cl (hm. %)	0,51	0,59	4,1	16

Obsah popelotvorných prvků vyjádřených ve formě oxidů je v **Tab. 6**. Z výsledků vyplývá klesající obsah sumy popelotvorných prvků, zejména hliníku, železa a křemíku v popelovinách s rostoucí dobou zdržení v zařízení, respektive s klesající teplotou v místě odloučení. Hmotnostní podíly sodíku a draslíku v diskutovaných popelovinách vykazovaly opačný trend. Z hlediska potenciálního použití v betonových směsích se jako nejvhodnější materiál jeví struska, neboť obsahuje nejvyšší podíl SiO_2 a Al_2O_3 . Jednotlivé frakce strusky lze potenciálně využít jako příměsí typu I–II [21], popeloviny odloučené z 2.–4. tahu kotle, tj. PA a PB lze pravděpodobně využít výhradně jako náhradu nejméněšního plniva, tedy jako příměsí typu I [20]. Popílek PC vykazuje zcela nevhodné vlastnosti pro použití v betonových směsích a to z důvodu vysokého obsahu nežádoucích prvků, velmi vysoké rozpustnosti a absence pucolánových vlastností.

Tab. 6 Obsah popelotvorných prvků ve zkoumaných popelovinách

	PS	PA	PB	PC
Al_2O_3 (hm. %)	16	8,0	9,7	4,2
CaO (hm. %)	19	26	26	13
Fe_2O_3 (hm. %)	8,4	2,9	3,4	1,9
K_2O (hm. %)	1,9	4,4	4,4	8,4
MgO (hm. %)	2,0	2,1	2,4	1,2
Na_2O (hm. %)	3,6	5,4	5,9	18
P_2O_5 (hm. %)	1,5	1,0	1,2	1,0
SiO_2 (hm. %)	34	16	20	9,9
TiO_2 (hm. %)	1,5	1,6	1,6	0,8
Suma (hm. %)	88	67	74	58

Dále byl ve vzorcích popelovin sledován obsah vybraných těžkých kovů, konkrétně As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb a Zn (viz **Tab. 7**). Chování kovů ve spalínách je dáno hlavně jejich chemickou formou a tedy mírou těkavosti. Těkavost sledovaných těžkých kovů klesá

v následujícím pořadí: As, Cd, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr. Obecně lze uvést, že kovy ve formě chloridů či sulfidů jsou těkavější, stabilní jsou naopak ve formě oxidů či síranů [22].

Tab. 7 Obsah vybraných těžkých kovů ve zkoumaných popelovinách

	PS	PA	PB	PC
As (mg/kg)	100	87	87	230
Cd (mg/kg)	17	23	96	610
Cr (mg/kg)	350	250	360	200
Cu (mg/kg)	1 700	640	580	2 100
Ni (mg/kg)	250	120	80	74
Pb (mg/kg)	2 300	290	2 100	8 900
Zn (g/kg)	3,7	11	10	24

4.3. Testy vyluhovatelnosti popelovin a solidifikátů

Vyluhovatelnost těžkých kovů z popelovin dle normy ČSN 12 457-2 je v **Tab. 8**. Jedním z hlavních parametrů ovlivňujících vyluhovatelnost kovů do prostředí je jejich chemická forma. Kovy jsou v popelovinách přítomny v zásadě ve třech formách [23–25]:

- kovové (v oxidačním stavu Me^0),
- jako kationty (Me^{n+}),
 - jako organokovové sloučeniny,
 - ve formě oxidů,
 - ve sloučeninách s jinými anionty (Cl^- , SO_4^{2-} , apod.),
 - ve formě hydroxidů,
 - ve formě komplexů,
- jako anionty kyselin (MeO^n^-).

Tab. 8 Vyluhovatelnost TK z popelovin

	PS	PA	PB	PC
pH	9,2	12,6	12,1	6,7
As (mg/kg)	0,078	0,22	0,33	0,50
Cd (mg/kg)	0,10	0,051	0,10	810
Cr (mg/kg)	0,075	12	2,8	0,36
Cu (mg/kg)	2,4	0,31	0,29	0,73
Ni (mg/kg)	0,24	0,034	0,048	2,0
Pb (mg/kg)	0,20	6,1	500	260
Zn (mg/kg)	0,20	14	9,3	10 000

Vyluhovatelnost TK vyjma Cr roste s rostoucí dobou zdržení popílku ve spalínách. Je to pravděpodobně způsobeno jejich přítomností ve formě chloridů, jež jsou jak těkavé (viz **Tab. 7**), tak rozpustné (viz **Tab. 4**). Největší vyluhovatelnost TK kromě Cr byla z nejménějšího popílku z elektrofiltru. Důvody pro vysokou vyluhovatelnost TK z tohoto popílku jsou nejvyšší obsah dobře rozpustných chloridů a pH popílků, které jako jediné ze všech vzorků není zásadité. Vyšší vyluhovatelnost Cr z ostatních popílků je také dána jejich pH, neboť Cr je jedním z TK, u nichž je

známá vyšší vyluhovatelnost v zásaditém prostředí než v kyselém.

Vyluhovatelnost těžkých kovů dle ČSN 12 457-2 ze solidifikátů s 3 a 10 % obsahem popelovin je uvedena v **Tab. 9** a **Tab. 10**. Hodnoty pH u všech uvedených vyluhů byly cca 12,5 bez ohledu na druh i množství přidávané popeloviny. Z toho lze usoudit, že pH roztoku bylo dáno především rozpustností $Ca(OH)_2$, který tvoří nezanedbatelnou část cementového kamene.

Vyluhovatelnost As, Cd, Cr, Cu a Pb (vyjma vzorku PS) byla vyšší ze solidifikátů s 10 % příměsí popelovin. Pouze u Zn nebyla nalezena jednoznačná závislost na množství přidávaných popelovin.

Tab. 9 Vyluhovatelnost vybraných TK ze solidifikátů s 3 % obsahem popelovin

	PS-3	PA-3	PB-3	PC-3
pH	12,5	12,4	12,4	12,5
As (mg/kg)	0,16	0,18	0,16	0,088
Cd (mg/kg)	0,0063	0,015	0,0065	0,0043
Cr (mg/kg)	0,087	0,059	0,11	0,052
Cu (mg/kg)	0,042	0,061	0,052	0,038
Ni (mg/kg)	0,035	PMD	PMD	PMD
Pb (mg/kg)	0,038	0,14	0,24	0,15
Zn (mg/kg)	0,37	0,43	2,7	0,55

PMD – pod mezí detekce

Tab. 10 Vyluhovatelnost vybraných TK ze solidifikátů s 10% obsahem popelovin

	PS-10	PA-10	PB-10	PC-10
pH	12,2	12,3	12,2	10,9
As (mg/kg)	0,44	0,46	0,37	0,42
Cd (mg/kg)	0,066	0,059	0,045	0,064
Cr (mg/kg)	0,35	3,6	1,4	4,4
Cu (mg/kg)	0,43	0,25	0,15	0,29
Ni (mg/kg)	PMD	PMD	PMD	PMD
Pb (mg/kg)	PMD	0,57	0,52	0,92
Zn (mg/kg)	0,13	2,1	0,47	3,9

PMD – pod mezí detekce

Tab. 11 Mezní hodnoty vybraných TK pro odpad přijatelný na skládky inertního odpadu (I), na skládky odpadů neklasifikovaných jako nebezpečné (NN) a na skládky nebezpečného odpadu (N)

	I	NN	N
As (mg/kg)	0,5	2	25
Cd (mg/kg)	0,04	1	5
Cr (mg/kg)	0,5	10	70
Cu (mg/kg)	2	50	100
Ni (mg/kg)	0,4	10	40
Pb (mg/kg)	0,5	10	50
Zn (mg/kg)	4	50	200

Ze srovnání s limity uvedenými v **Tab. 11** vyplývá, že u většiny kovů splňují produkované solidifikáty limity pro skládkování inertních materiálů.

Surová struska splňuje u 5 sledovaných TK limit pro skládky inertního odpadu, u zbylých dvou TK limit pro skládky odpadu neklasifikovaného jako nebezpečný. Surový popílek PA v jednom případě (Cr) splňuje jen limit pro skládky nebezpečného odpadu. Popílky PB a PC nesplňují limity pro odpad ukládaný na skládkách nebezpečného odpadu a musí být proto přepracovávány z důvodu vysokých koncentrací Cd, Pb nebo Zn. Solidifikáty s 3 % obsahem popelovin splňují limity pro inertní odpad ve všech případech. V případě solidifikátů s 10 % obsahem popeloviny bylo zjištěno v několika případech překročení limitů pro inertní odpad, a to u Cd (ve všech případech), Cr a Pb (limit splňuje jen PS-10). V těchto případech solidifikáty s 10% obsahem popelovin splňují limity pro odpad neklasifikovaný jako nebezpečný.

5. Závěr

Byla zkoumána možnost použití popelovin jako přísady do betonových směsí až do úrovně 10 hm. % a také imobilizační účinek jejich inkorporace na těžké kovy. Vyluhovatelnost těžkých kovů ze solidifikátů s 3 % obsahem popelovin splňovala limity stanovené pro inertní odpady. Solidifikáty s 10 % obsahem popelovin splňovaly limity vyluhovatelnosti TK pro inertní odpady ve většině případů, limity pro odpady neklasifikované jako nebezpečné pak splňovaly ve všech případech. Imobilizačního účinku bylo tedy dosaženo ve všech sledovaných solidifikátech. Přídavek popelovin ovšem způsobil zhoršení mechanických vlastností produkovaných solidifikátů. Použití surové popeloviny je nutné pro tento způsob materiálového využití dále upravovat s cílem odstranit zejména jejich vysokou rozpustnost a solnost. Nutné je zdůraznit i individuální charakter popelovin lišící se zařízením od zařízení, takže pro jejich aplikaci je potřeba vždy detailní charakterizace a optimalizace složení solidifikátů.

Poděkování

Tato práce vznikla díky finanční podpoře EEA a Norway grants zprostředkované Národním vzdělávacím fondem (projekt A/CZ0046/1/0027) a díky podpoře Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy (projekt číslo 2B08048 a 6046137304).

Literatura

1. Směrnice Evropského parlamentu a rady (ES) č. 98/2008.
2. Český statistický úřad, dostupné z: www.czso.cz. (24. 8. 2010).
3. Eurostat, dostupné z: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/> (25. 8. 2010).
4. Bufka A. a kol.: Statistika energetického využívání odpadů, Energetika 60, P46–P63 (5), 2010.

5. Bufka A., Rosecký D., Bednář P.: Statistika energetického využívání odpadů 1905–2009, MPO, březen, 2009, dostupné z: www.mpo.cz.
6. Juric B., Hanzic L., Ilic R., Samec N.: Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete Waste Manag. 26, 1436–1442, 2006.
7. Poletti A., Pomi R., Sirini P., Testa F.: Properties of Portland cement-stabilised MSWI fly ashes, J. Hazard. Mater. B88, 123–138, 2001.
8. IWAG Group - Chandler A. J., Eighmy T. T., Hartlén J., Hjelm O., Kosson D. S., Sawell S. E., van der Sloot H. A., Vehlow J. Studies in Environmental Science 67, Elsevier, Amsterdam, Nederland, 1997.
9. Šyc M., Pekárek V., Novák P., Šolcová O., Pohořelý M., Punčochář M., Ocelka T.: Fly ash properties, disposal, and treatment in modernized waste incineration plant with catalytic filter, In. Fly Ash: Reuse, Environmental Problems and Related Issues (Telone, P.H., Ed.), 33–60, Nova Science Publishers, New York, USA, 2010.
10. Glasser F.P.: Fundamentals aspects of cement solidifications and stabilizations, J. Hazard. Mater. 52, 151–170, 1997.
11. Pekárek V., Punčochář M., Šyc M., Pařízek T., Stehlík P., Bébar L., Oral J.: Aplikace katalytického filtru ve spalovně komunálního odpadu Termizo a.s. v Liberci pro snížení emisí perzistentních organických látek, Ochrana ovzduší 19(4), 16–22, 2006.
12. Novák P., Bernát P.: Celkové emise zejména perzistentních organických látek z velké spalovny, Sborník z konference CHISA 2007, Srní, Česká republika, září, 2007.
13. Zychová M.: Vyluhovatelnost těžkých kovů z popelovin ze spalovny komunálních odpadů, diplomová práce, VŠCHT Praha, červen, 2010.
14. Šyc M., Keppert M., Novák P., Tošnarová M., Zychová M., Pohořelý M., Punčochář M.: Charakterizace popelovin ze spalovny komunálního odpadu a jejich použití ve stavebnictví, Odpadové fórum, Kouty na Desnou, duben, 2010.
15. Filipponi P., Poletti A., Pomi R., Sirini P.: Physical and chemical properties of cement-based products containing incineration bottom ash, Waste Management 23, 145–156, 2003.
16. Klein R., Baumann T., Kahapka E., Niessner R.: Temperature development in a modern municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash landfill with regard to sustainable waste management, Journal of Hazardous Materials B 83, 265–280, 2001.
17. The International Ash Working Group: Municipal Solid Waste Incinerator Residues, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1997.
18. Nařízení vlády: 354/2002 Sb. emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu (novela 206/2006 Sb.).
19. Vassilev S. V., Vassileva Ch. G., Karayigit A. I., Bulut Y., Alastuey A., Querol X.: Phase-mineral and

chemical composition of composite samples from feed coals, bottom ashes, fly ashes at the Soma powerstation, Turkey, *International Journal of Coal Technology* 61, 35–63, 2005.

20. Myška M.: Popílek do betonu vyhovující ČSN EN 206-1, *Beton TKS* 2, 29–33, 2002.
21. Úřad pro technickou normalizaci, Česká státní norma: ČSN EN 450, Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody.
22. Sørum L., Frandsen F.I., Hustad J.E.: On the fate of heavy metals in municipal solid waste combustion Part I: devolatilisation of heavy metals on the grate, *Fuel* 82, 2273–2283, 2003.
23. Lo H.M., Lin K.C., Liu M.H., Pai T.Z., Lin C.Y., Liu W.F., Fang G.C., Lu C., Chiang C.F., Wang S.C., Chen P.H., Chen J.K., Chiu H.Y., Wu K.C.: Solubility of heavy metals added to MSW, *Journal of Hazardous Materials* 161, 294–299, 2009.
24. Wobst M., Wichmann H., Bahadir M.: Distribution behavior of heavy metals investigated in a laboratory-scale incinerator, *Chemosphere* 44, 981–987, 2001.
25. Hrdý M., Materiály k předmětu Dekontaminační technologie, VŠCHT Praha, dostupné z : <http://www.vscht.cz/uchop/CDmartin/3-kontaminanty/4-1.html> (1.4.2010).

Summary

*Michael Pohořelý^{a,b}, Michal Šyc^a, Markéta Tošnarová^a,
Markéta Zychová^{a,b}, Martin Keppert^c,
Miroslav Punčochář^a*

*^aEnvironmental Process Engineering Laboratory,
Institute of Chemical Process Fundamentals of the AS
CR, v.v.i.,
Rozvojová 135/2, 165 02 Prague 6, Czech Republic.*

*^bDepartment of Power Engineering, Institute of Chemical
Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague 6,
Czech Republic.*

*^cDepartment of Materials Engineering and Chemistry,
Czech Technical University in Prague, Thákurova 7,
166 29 Prague 6, Czech Republic.*

Immobilization of Heavy Metals from Municipal Solid Waste Incineration Plant Solid Residuals

The article deals with utilization of solid residuals from municipal solid waste incineration with the emphasis on heavy metals immobilization.

Important physico-chemical characteristics of monitored ash fractions are summarized and discussed with respect to application in construction industry. Leachability of heavy metals from the solid residuals and from the solidificates with the addition of solid residuals was analyzed and the results were compared with limits from European legislation.