

## OPĀTOVNÉ ZÍSKAVANIE FOSFORU ÚPRAVOU ČISTIARENSKÉHO KALU

STANISLAVA KECSKÉSOVÁ<sup>a</sup>, ZUZANA  
IMREOVÁ<sup>a</sup>, BIBIÁNA KOŽÁROVÁ<sup>a</sup>, MILOSLAV  
DRTEL<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Oddelenie environmentálneho inžinierstva, Ústav chemického a environmentálneho inžinierstva, Fakulta chemickej a potravinárskej technológie STU, Radlinského 9, 812 37 Bratislava  
stanislava.vlckova@stuba.sk

Došlo 10.10.19, prijaté 21.2.20.

Rukopis byl zařazen k tisku v rámci placené služby urychleného publikování.

Kľúčové slová: čistiarenský kal, popol po spálení stabilizovaného kalu, recyklácia fosforu, recyklačné technológie

### Obsah

1. Úvod
2. Získavanie fosforu z čistiarenských kalov
3. Získavanie fosforu z popola čistiarenských kalov
4. Záver

### 1. Úvod

Čistiarenský kal je heterogénna zmes, ktorá vzniká na čistiarni odpadových vôd (ČOV) ako vedľajší produkt čistenia. Na malých ČOV, orientačne do 10 000 obyvateľov, sa produkuje len jeden druh kalu priamo vo vodnej linke a nazýva sa aeróbne stabilizovaný kal. Na väčších ČOV, nad 10 000 obyvateľov, sa z vodnej linky oddelí primárny kal v usadzovacích nádržiach a sekundárny kal, tzv. prebytočný kal, v biologickom stupni. Obidva tieto kaly sú následne stabilizované v oddelenom kalovom hospodárstve. Najčastejšie sa využíva vyhrievaná mezofilná anaeróbna stabilizácia. Obidva stabilizované kaly predstavujú významný sekundárny zdroj fosforu (P)<sup>1,2</sup>. Ak vypočítame materiálovú bilanciu ČOV podľa STN, ČSN, potom<sup>2-4</sup>:

- na malých ČOV bez zvýšeného odstraňovania nutričov sa v aeróbne stabilizovanom kale orientačne odstráni 20–40 % P z prítoku do ČOV,
  - na väčších ČOV, kde je zvýšené odstraňovanie nutričov povinné, sa v anaeróbne stabilizovanom kale orientačne odstráni až 80–90 % P z prítoku do ČOV.
- Ak prepočítame obsah P na sušinu kalu, potom:
- v aeróbne stabilizovanom kale z ČOV bez odstraňo-

vania nutričov sa vyskytuje ca. 1–1,5 % P, pričom väčšina P je viazaná v kale biologicky,

- v anaeróbne stabilizovanom kale z ČOV s odstraňovaním nutričov sa vyskytuje ca. 5–6 % P. V tomto prípade je P v kale viazaný nielen biologicky, ale významnú časť tvorí aj P vyzrážaný (s cielene dávkovanými soľami Fe<sup>3+</sup> a Al<sup>3+</sup> do vodnej linky resp. spontánne vyzrážaný ako struvit v kalovej linke). Podiel biologicky a chemicky viazaného P závisí od technológie biologického stupňa vodnej linky ČOV.

Je zrejme, že najmä anaeróbne stabilizovaný kal z ČOV s odstraňovaním nutričov je zaujímavým zdrojom P. Výhodou tohoto kalu je, že okrem P obsahuje aj ďalšie živiny (N, Ca, Mg, K) a potenciálne je využiteľný ako hnojivo. Rizikom ale je, že P sa v ňom nachádza ako nerozpustený v rôznych zlúčeninách a že tento kal obsahuje aj ďalšie polutanty, ako sú ťažké kovy a mikropolutanty (napr. zvyšky liečiv, drog, hormónov, pesticídov, endokrinných disruptorov<sup>5-9</sup>). Práve prítomnosť týchto zlúčenín a čoraz častejšie diskutovaný princíp predbežnej opatrnosti spolu s vysokými nákladmi na odvoz nevysušených kalov na pozemky a s využiteľnou energiou akumulovanou v kaloch obmedzuje ich využívanie ako hnojiva v poľnohospodárstve. Táto téma je v súčasnosti často diskutovaná a bližšie detaily sú uvedené napr. v práci<sup>10</sup>.

Ak do tejto problematiky zahrnieme aj fakt, že fosforečné horniny patria v EÚ medzi kritické suroviny<sup>11</sup>, potom iné spracovanie čistiarenských kalov než je jeho uloženie na pôdu bude musieť zahŕňať aj metódy znovuzískavania P. Tento príspevok popisuje vybrané a zároveň aj overené procesy a technológie získavania P z kalov resp. z popola po ich spálení. Z prehľadu bude zrejme, že sa nejedná o jednoduché a lacné procesy, ale na druhej strane realizovateľné.

### 2. Získavanie fosforu z čistiarenských kalov

Znovuzískavanie P z čistiarenských kalov je založené najmä na postupoch kyslej extrakcie fosforečnanov (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) a následne ich separácie od ťažkých kovov. Z tab. I je zrejme, že väčšina metód recyklácie P z kalov je zatiaľ len v štádiu laboratórneho príp. v poloprevádzkového výskumu. Hlavnou nevýhodou týchto procesov je vysoký obsah vody a organického podielu v kale, čo má za následok použitie relatívne veľkých reaktorov. Procesy komplikuje taktiež potrebná separácia ťažkých kovov a toxických organických látok<sup>12</sup>.

Jedným z procesov využívaných na znovuzískavanie P z čistiarenských kalov je proces Stuttgart, ktorého hlavným cieľom je produkcia struvitu využívaného ako hnojivo. Spracováva sa odvodený, anaeróbne stabilizovaný kal

Tabuľka I

Prehľad technológií znovuzískavania fosforu z čistiarenskeho kalu a z jeho popola<sup>20,27</sup>

		Technológia	Produkt		
Čistiarenský kal	laboratórne alebo poloprevádzkové overenie	Aqua Recí <sup>®</sup>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub>		
		Budenheim	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub>		
		HeatPhos	struvit		
		KREPRO <sup>®</sup>	struvit		
		LysoGest <sup>®</sup>	struvit; Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub>		
		MEPHREC <sup>®</sup>	troska		
		PHOXNAN	struvit		
		Stuttgart process	struvit, Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
	využitie v praxi	Seaborne <sup>®</sup>	struvit, Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
Popol po termickom spracovaní čistiarenských kalov	laboratórne alebo poloprevádzkové overenie	Ash Dec <sup>®</sup>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
		BioCon <sup>®</sup>	AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
		Eberhard	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub>		
		EPHOS	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub>		
		LEACHPHOS <sup>®</sup>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
		MEPHREC <sup>®</sup>	troska		
		PASCH	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
		P-bac <sup>®</sup>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub>		
		RecoPhos InduCarb	P <sub>4</sub> / H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		
		SEPHOS	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
		SESAL-Phos	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>		
		TetraPhos	P <sub>4</sub> / H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		
			využitie v praxi	EcoPhos	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> /CaHPO <sub>4</sub>
				LOTUS Gifu City	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> / CaHPO <sub>4</sub> ; AlPO <sub>4</sub> ; FePO <sub>4</sub>
		RecoPhos <sup>®</sup>	P <sub>4</sub> / H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		
		Thermphos <sup>®</sup>	P <sub>4</sub> / H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		

na ČOV s prevažujúcim chemickým zrážaním P. Na týchto ČOV je vysoké percento P z prítoku viazané vo forme FePO<sub>4</sub> a AlPO<sub>4</sub>, ktoré nemajú významný hnojivý účinok. Po anaeróbnej stabilizácii takýchto kalov, na rozdiel od ČOV so zvýšeným biologickým odstraňovaním P, obsahuje digestát len nízke koncentrácie rozpusteného P. Preto je na získanie struvitu porovnateľného s minerálnymi hnojivami v prvom rade potrebné rozpustiť P obsiahnutý v zrazeninách FePO<sub>4</sub> a AlPO<sub>4</sub>, čo sa dosiahne vylúhovaním kalu v kyslých podmienkach (použitím H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Vzniknutá kyslá suspenzia sa filtráciou, ale aj odstredením, rozdelí na pevnú fázu ochudobnenú o P a kvapalnú fázu bohatú na rozpustené PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Vo filtráte sú ešte prítomné malé častice nerozpustených látok, ktoré sa dodatočne oddelia usadzovaním alebo ultrafiltráciou. Získaný kvapalný podiel obsahuje len ca. 10 % P, a preto je recyklovaný späť do reaktora s kyslým vylúhovaním. V druhom kroku procesu sa PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> vyzrážajú ako struvit. Na zabránenie prenosu ťažkých kovov do struvitu sa ešte pred zrážaním pridáva kyselina citrónová (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) ako selektívne chelatačné činidlo. Následne sa do zmesi privedie zdroj

Mg<sup>2+</sup> (MgO) a použitím NaOH sa zvýši pH na hodnotu 8 potrebnú pre vyzrážanie struvitu. Struvit sa od kvapalnej fázy oddelí filtráciou alebo usadzovaním. Pri procese Stuttgart je dôležité, aby bol reaktor určený na lúhovanie aj zrážanie dostatočne miešaný. Použitím procesu je možné opätovne získať viac ako 60 % P obsiahnutého v čistiarenskom kale. Poloprevádzkový model bol testovaný na ČOV Offenburg v Nemecku. Dodatočné náklady pri zavedení procesu Stuttgart do linky ČOV boli vyčíslené na 0,15 Eura na m<sup>3</sup> privádzanej odpadovej vody<sup>13,14</sup>.

V procese Budenheim ExtraPhos<sup>®</sup> sa na kyslú extrakciu PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> využíva prítomnosť CO<sub>2</sub>. Proces rozdeľujeme do troch krokov. V prvom nastáva extrakcia pomocou CO<sub>2</sub>, v druhom kroku je separovaná kvapalná fáza od pevnej a v treťom kroku nastáva vyzrážanie PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Pri samotnej extrakcii je kal prebublávaný s CO<sub>2</sub> pri tlaku približne 10 barov. Za týchto podmienok sa CO<sub>2</sub> v zmesi kalu mení na H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, čo vedie k zníženiu pH na hodnotu 4,5–5,5 a k následnému uvoľneniu P viazaného v matici kalu. Prevádzková hodnota pH poskytuje výhodu nízkeho rozpúšťania znečisťujúcich látok, ako sú ťažké kovy a ďalší

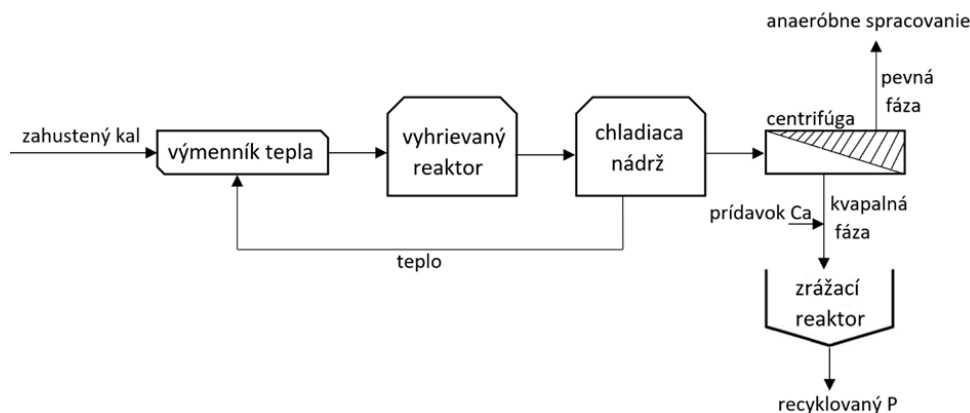
špecifický stupeň ich separácie nie je preto potrebný. Nasleduje druhý krok procesu a to oddelenie pevných látok od kvapalnej fázy použitím koagulantov.  $\text{CO}_2$  obsiahnutý v kalovej zmesi sa vďaka zmene tlaku uvoľní z kvapaliny a je opätovne vracaný do procesu. Získaný kalový výluh pokračuje do tretieho stupňa procesu, kde sa pomocou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $\text{NaOH}$  zvyšuje pH, čo vedie k zrážaniu rozpustených  $\text{PO}_4^{3-}$  prevažne ako  $\text{CaHPO}_4$ , pričom s prirodzene prítomným  $\text{Mg}^{2+}$  vzniká aj struvit. Po sušení a granulácii sa zrazeniny používajú ako hnojivo. Návratnosť P z čistiarenských kalov sa uvádza na úrovni ca. 50 %. Technológia Budenheim ExtraPhos® bola testovaná na ČOV Pfinztal v Nemecku. Ďalšia aplikácia a overovanie procesu bolo plánované pre ČOV Mainz-Mombach s kapacitou 360 000 obyvateľov<sup>15,16</sup>.

Sekundárny, prebytočný aktivovaný, kal produkovaný na ČOV v procese zvýšeného biologického odstraňovania P (ZBOF) obsahuje 3 až 5 % P v sušine kalu. Približne 60 až 80 % P je v kale uchovaných ako polyfosforečnany (polyP), ktoré sa pri vyšších teplotách destabilizujú. Práve túto vlastnosť využíva proces HeatPhos. Prebytočný kal je vystavený teplotám 70–90 °C na ca. 60 min, pri ktorých dochádza k štiepeniu a rozpadu bunkových štruktúr. Bolo zistené, že rýchlosť a rozsah uvoľnenia P výrazne klesá pri teplotách nižších ako 50 °C. Pri 70 °C sa degraduje približne 20 % polyP, pri 90 °C sa degraduje a uvoľní až 60 % polyP. Dôležité je, že napriek vyšším teplotám sa nerozkladajú kalové vločky a nezhoršujú sa sedimentačné vlastnosti kalu. Uvoľňovanie P z buniek vplyvom tepla je inhibované prítomnosťou  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Al}^{3+}$ . Po uvoľnení P z buniek nasleduje oddelenie kvapalnej fázy od pevných látok. Výhodou procesu HeatPhos je, že z kvapalnej fázy sa P môže získať prídavkom  $\text{CaCl}_2$  bez úpravy pH. Výsledný produkt je  $\text{CaHPO}_4$ , avšak jeho zrážanie významne ovplyvňuje koncentrácia a forma polyP vo výluhu. Pokiaľ sú polyP vo výluhu úplne degradované na  $\text{PO}_4^{3-}$ , zrážanie  $\text{CaHPO}_4$  je nízke a potrebné je zvýšenie pH až nad 10. Pokiaľ sa však vo výluhu polyP nachádzajú, zrážanie P s  $\text{CaCl}_2$  nastáva už pri pH 7,7. Ďalšou výhodou je to, že zvýšenie teploty potrebné pre uvoľnenie polyP môže zlepšiť aj produkciu bioplynu pri ďalšom spracovaní kalov. Teplu generované pri anaeróbnom spracovaní kalov sa

spätne využije pri ohreve kalu. HeatPhos bol aplikovaný na ČOV Higashi-nada Kobe v Japonsku. Kal z procesu ZBOF sa zahrieva na 70 °C po dobu 60 min. V kvapalnej fáze sa P zrážal s  $\text{CaCl}_2$ . Pri molárnom pomere  $\text{Ca} : \text{P} = 2:1$  bez úpravy pH sa vyzrážalo až 65 % uvoľneného P. Akonáhle sa pri zrážaní pH zvýšilo na 11, až 80 % P reagovalo s  $\text{Ca}^{2+}$  aj pri pomere  $\text{Ca} : \text{P} = 1:1$ . Zároveň sa potvrdilo, že pokiaľ sa nezabráni hydrolyze polyP na  $\text{PO}_4^{3-}$ , úprava pH nad 10 bude nevyhnutná. Využitie procesu HeatPhos v prevádzke bolo tiež skúmané na ČOV Ashida-gawa Fukuyama v Japonsku (obr. 1). Kal získaný z vodnej linky so ZBOF bol pred ohrevom zahustený vo flotačnej nádrži. Teplota v ohrevnom reaktore bola 70 °C a doba zotrvania kalu bola 1 hodina. Pred oddelením pevných látok od kvapalnej fázy bola kalová zmes ochladená, odvádzané teplo bolo využité spätne na ohrev zahusteného kalu, na teplotu prostredia. P sa vyzrážal pri pH 11 prídavkom  $\text{CaCl}_2$  za vzniku prevažne  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , ale aj hydroxylapatitov a struvitu<sup>17,18</sup>.

Proces Phoxnan kombinuje nízkotlakovú mokrú oxidáciu s dvoma stupňami membránovej filtrácie (ultrafiltrácia + nanofiltrácia). V prvom kroku procesu označovanom ako LOPROX je kal oxidovaný v kyslých podmienkach pri pH 1,5 prídavkom  $\text{H}_2\text{SO}_4$  čistým  $\text{O}_2$ . Odporúčaná dávka je 1 kg  $\text{O}_2$  na 1 kg CHSK. V reaktore je teplota 160–220 °C a tlak 18–28 barov. Za týchto podmienok sa obsah organických zložiek v kale výrazne znižuje až na menej ako 5 % a organické mikropolutanty (liečivá, drogy a iné) sú úplne odstránené. P sa z kalu uvoľní ako  $\text{PO}_4^{3-}$  do kvapalnej fázy, ktorá je privádzaná do ultrafiltrácie, kde sa oddelia pevné častice (najmä anorganického charakteru). Permeát z ultrafiltrácie je čerpaný do nanofiltrácie, kde sa oddelia  $\text{PO}_4^{3-}$  od  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  a ďalších ťažkých kovov. Nanofiltračný permeát tak obsahuje vysoké koncentrácie relatívne čistého P, zatiaľ čo retentát sa po vyzrážaní ťažkých kovov recykluje do vodnej linky ČOV. Roztok s  $\text{PO}_4^{3-}$  je následne spracovaný v závislosti od vyžadovaných vlastností výsledného produktu. Odporúča sa vyzrážanie v zásaditom pH s  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ . Návratnosť P z čistiarenských kalov je ca. 55 % (cit.<sup>19,20</sup>).

Proces Aqua Reci (pilotná prevádzka na ČOV Karlskoga vo Švédsku) je založený na superkritickéj oxidácii



Obr. 1. Schéma procesu HeatPhos inštalovaného na ČOV Ashida-gawa (upravené)<sup>17</sup>

Obr. 2. Proces Seaborn implementovaný na ČOV Gíhorn<sup>24</sup>

kalu s následnou chemickou úpravou zložiek v anorganickom zvyškovom podiele. Reakcia prebieha pri teplote 375 °C a tlaku 21 bar. V superkritickom stave nastáva zmena pôvodných vlastností kalovej zmesi, pričom najdôležitejšou zmenou je zmena rozpustnosti organických (vyššia rozpustnosť) a anorganických (nižšia rozpustnosť) zlúčenín. Za daných podmienok sa na úplnú oxidáciu vstupujúceho substrátu – čistiarenskeho kalu pridáva čistý O<sub>2</sub>. Reakčný čas je 60 sekúnd, pričom celkový retenčný čas sa odporúča okolo 5 minút. Vzhľadom na vyššiu reakčnú teplotu je nevyhnutné pri uvedení procesu do prevádzky dodať energiu. Následné udržiavanie teploty je dosiahnuté samotnou reakciou, keďže oxidácia kalu je exotermická. Počas procesu sa až 99 % organických látok zoxiduje na CO<sub>2</sub>, organický a amoniakálny dusík sa zoxidujú na N<sub>2</sub>, halogénové organické a anorganické látky sa transformujú na zodpovedajúce kyseliny, organická a anorganická síra sa oxiduje na H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a zlúčeniny obsahujúce P sa rozkladajú na PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Na separáciu P od ťažkých kovov je využívaná extrakcia v zásaditom prostredí, v ktorom sú ťažké kovy nerozpustné a dajú sa odseparovať od rozpustených PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. P sa z procesu získava v silno alkalickom prostredí vďaka prídavku vápna za vzniku prevažne Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (cit.<sup>21</sup>).

Proces Seaborn je zameraný na znovuzískavanie P a N z čistiarenských kalov, separáciu ťažkých kovov a regeneráciu energie spaľovaním pevných látok. V prvom kroku sa kal okyslí s H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, čo vedie k uvoľneniu PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> a ťažkých kovov. Pevný zvyšok sa oddelí od kvapalnej fázy pomocou odstredivky a po vysušení sa spáli. Z kvapalnej fázy bohatej na P a N sú v ďalšom kroku oddelené ťažké kovy použitím bioplynu z vyhnívacej nádrže. H<sub>2</sub>S obsiahnutý v bioplyne sa zráža s iónmi ťažkých kovov, čím sa okrem iného znižuje aj obsah S v bioplyne. Bioplyn má tak vyššiu kvalitu pre výrobu energie v kogeneračných zariadeniach. P sa vo fugáte prídavkom MgO a NaOH vyzráža ako struvit. Nadbytočný N sa získava z procesu ako (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Voda z procesu Seaborn sa recykluje na prítok ČOV. Výsledné produkty, struvit a (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sú využívané ako hnojivo. Namiesto bioplynu sa na odstraňovanie ťažkých kovov môže použiť alternatívne Na<sub>2</sub>S. Proces Seaborn bol uvedený do prevádzky na ČOV Gíhorn (50 000 ekvivalentných obyvateľov)

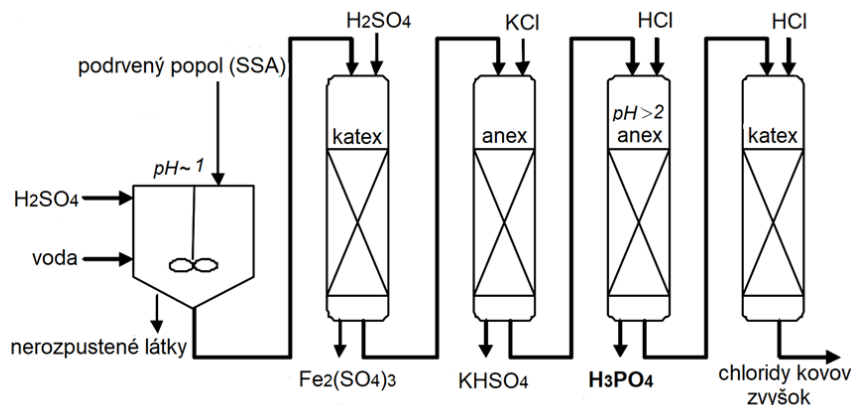
v Nemecku. Procesom je možné recyklovať až 90 % nutričov pri dennej produkcii 580 kg struvitu a 1300 kg 41% roztoku (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (cit.<sup>22,23</sup>).

### 3. Získavanie fosforu z popola čistiarenských kalov

Ďalšou možnosťou znovuzískavania P je využitie popola po spaľení stabilizovaného kalu (SSA, sewage sludge ash). Počas spaľovania kalov okolo teploty 1000 °C sa zoxidujú takmer všetky organické látky vrátane toxických zlúčenín<sup>25</sup>. Ďalšou výhodou tohto prístupu znovuzískavania P je aj najvyšší výtazok P (nad 90 %), minerálny charakter SSA, objemová (oproti surovému kalu až o 90 %) aj hmotnostná (až o 50 %) redukcia kalu. Na dosiahnutie čo najkvalitnejšieho popola sa odporúča monospaľovanie kalov, t.j. bez prídavku iného paliva, ako sú napr. odpady. Samotný SSA obsahuje okolo 11–25 % P vyjadreného ako P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, čo samo o sebe môže konkurovať bežným P-hnojivám obsahujúcim okolo 18 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, pri viaczložkových hnojivách sa obsah znižuje až na 10 % (cit.<sup>12,25–27</sup>). V SSA sa ale nachádzajú ťažké kovy brániace priamemu využitiu. Kľúčová je teda separácia P od ťažkých kovov.

Vo všeobecnosti poznáme 2 metódy sekundárnej úpravy SSA. Ako prvé sú to hydro-metalurgické procesy pracujúce na princípe vylúhovania P z SSA (SEPHOS, BioCon®, TetraPhos®, P-bac, EcoPhos, LOTUS). Druhou možnosťou je použitie termo-metalurgických (pyrometalurgických) procesov, ktoré separujú P od ťažkých kovov na základe ich rôznej prchavosti. Teplota používaná pri týchto procesoch presahuje obvykle 1000 °C (ASH DEC, MEPHREC®, ReCoPhos)<sup>28–30</sup>.

Proces SEPHOS (Sequential Precipitation of P) v prvom kroku sa vystavuje SSA účinku H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pričom pH zmesi dosahuje hodnotu pod 1,5. Nerozpustené zvyšky sú následne z výluhu odfiltrované a pH samotného výluhu sa pomocou NaOH zvyšuje na 3,5. Pri týchto podmienkach dochádza k zrážaniu s Al<sup>3+</sup> a Fe<sup>3+</sup>. Ťažké kovy pri pH 3,5 zostávajú rozpustené, aj keď čiastočná kontaminácia výsledného produktu sa nevyučuje. Vzniknutý AlPO<sub>4</sub>



Obr. 3. Schéma procesu BioCon®

a FePO<sub>4</sub> sa preto musia ďalej spracovať. Konečnou úpravou je vystavenie produktu silne zásaditým podmienkam, kedy sa najmä AlPO<sub>4</sub> opätovne rozpúšťa, ale ostatné ťažké kovy zostávajú prevažne nerozpustené. P sa následne vyzráža prídavkom Ca<sup>2+</sup> za vzniku Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (cit.<sup>31</sup>).

Výsledným produktom procesu BioCon® je H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. V prvom kroku procesu sa SSA vystaví účinkom H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH 1), čo má za následok uvoľnenie P a ťažkých kovov. Vzniknutý roztok je následne čistený pomocou štyroch iónomeničových kolón. Prvá kolóna je katex, v ktorej sa z roztoku odstraňujú Fe<sup>3+</sup> a býva regenerovaná použitím H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Nasleduje anex, ktorý z roztoku odstráni SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a regeneruje sa pomocou KCl. Tretia kolóna je opäť anex, ktorá z roztoku odstraňuje PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> a regeneruje sa s HCl, čím získame relatívne čisté H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. V tomto kroku je treba sledovať hodnotu pH, pretože pri pH < 2 nebude anex funkčný. Posledná kolóna je katex a z roztoku odstraňuje ióny kovov, ktoré pri regenerácii pomocou HCl reagujú za vzniku chloridov prítomných kovov. Nevýhodou procesu je spotreba veľkého množstva regeneračných činidiel a vzniknuté odpadové vody sa musia spracovávať na ČOV kvôli vysokému obsahu kovov. Proces BioCon® bol poloprevádzkovo testovaný na ČOV Brønderslev v Dánsku. O túto technológiu malo tiež záujem švédske mesto Falun<sup>32</sup>.

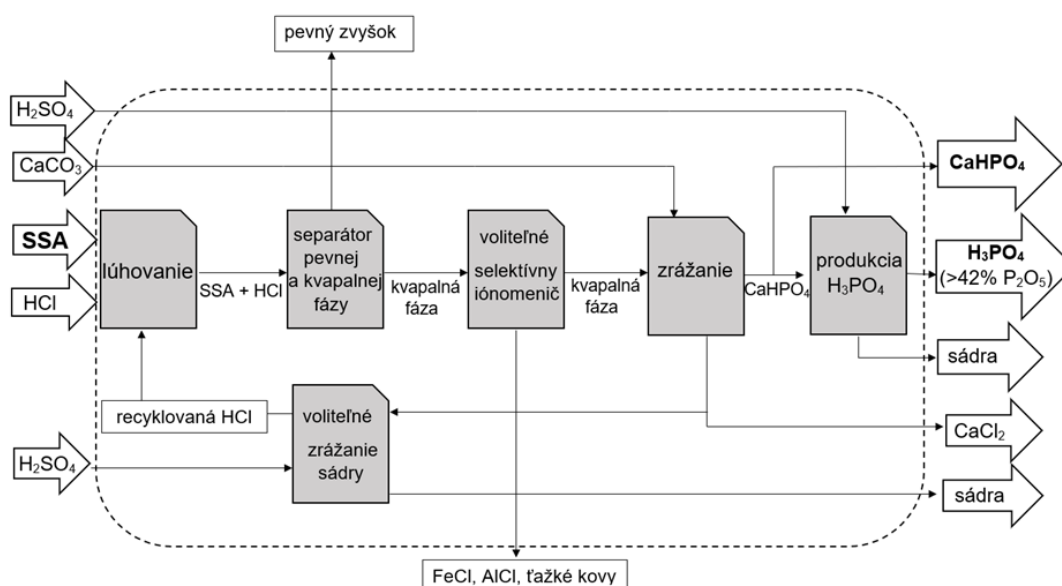
Proces TetraPhos® je metóda, pri ktorej je SSA lúhovaný so zriedenou H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Roztok sa tak obohacuje o ďalší P z SSA a následne sa spracuje v štyroch rôznych stupňoch. Vzniká tak viacero produktov obsahujúcich P: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (RePacid®) používaná na výrobu hnojív, sádra využívaná v stavebníctve a soli Fe<sup>3+</sup> a Al<sup>3+</sup>, ktoré sa môžu využiť na ČOV ako zrážacie činidlá. Proces je v poloprevádzke na ČOV Köhlbrandhöft v Hamburgu<sup>33</sup>.

Proces P-bac umožňuje selektívne získavanie P z SSA aj z kontaminovaných pôd. Prvý krok je založený na princípe „biovlúhovania“ pri nízkych teplotách a atmosférickom tlaku pomocou bakteriálneho druhu *Acidithiobacillus* (napr. *Acidithiobacillus ferrooxidans*), ktorý je schopný oxidovať sulfidy kovov za vzniku H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Pri-

tomnosť kyseliny zníži pH na ca. 4, kedy nastáva rozpustenie PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> z SSA a tiež ťažkých kovov. Nasleduje oddelenie nerozpustených látok od výluhu. V druhom kroku nastáva selektívna separácia nežiadúcich zložiek asimiláciou P do špecifických mikroorganizmov. Biomasa sa následne oddelí od kvapalnej fázy obsahujúcej ťažké kovy a nežiaduce látky. Procesom je možné znovuzískať až 90 % P, pričom získané PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> môžu byť použité na výrobu hnojív<sup>34</sup>.

Proces EcoPhos našiel svoje využitie aj v praxi. SSA je lúhovaný v zriedenej HCl za vzniku roztoku PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> obsahujúceho najmä H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub> a Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Vo výluhu sú prítomné aj ťažké kovy ako Cd a Hg. Nasleduje separácia kvapalnej fázy od pevného zvyšku, v ktorom sa nachádza väčšina nečistôt ako Fe, Al, organické látky, fluoridy a pod. Vzhľadom na to, že roztok PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> obsahuje aj ťažké kovy, je potrebné jeho prečistenie pomocou iónovými výmeny. Tento krok sa uvádza len ako voliteľný. K roztoku PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> sa v ďalšom reaktore privádzajú Ca<sup>2+</sup> (CaCO<sub>3</sub>), čím vzniká prevažne CaHPO<sub>4</sub>, ktorý sa oddelí od kvapalnej fázy obsahujúcej CaCl<sub>2</sub>. Roztok CaCl<sub>2</sub> síce neobsahuje P, ale vďaka jeho vysokej čistote sa ako vedľajší produkt môže predávať ako chladiaca zmes alebo po odparení ako sušiacie činidlo do exikátorov. Časť roztoku CaCl<sub>2</sub> sa oddelí a samostatne spracuje. Reakciou roztoku CaCl<sub>2</sub> s H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> vzniká sádra a HCl, ktorá je využívaná v prvom kroku procesu. Vzniknutý CaHPO<sub>4</sub> nájde po špecifickej úprave svoje uplatnenie v potravinárskom, poľnohospodárskom ale aj farmaceutickom priemysle. Ďalšia možnosť je zmiešanie CaHPO<sub>4</sub> s H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, čím vznikne H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> s relatívne vysokou čistotou (> 42 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a sádra<sup>35</sup>.

Proces LOTUS je na rozdiel od ostatných metód založený na alkalickom lúhovaní. P obsiahnutý v SSA sa vylúči pôsobením silnej zásady pri teplotách 50–90 °C. Ako lúhovacie činidlo môže byť použitý KOH alebo NaOH, pričom je potrebné približne 0,12 kg NaOH na 1 kg SSA. Tento postup sa opakuje dvakrát kvôli zvýšeniu množstva vylúhovaného P. Účinnosť takejto extrakcie býva až 60–70 %. Výhodou procesu je, že ťažké kovy sú pri vyso-

Obr. 4. Schéma procesu EcoPhos (upravené)<sup>35</sup>

kých pH málo rozpustné a tak kvapalná fáza obsahujúca P nie je nimi znečistená. V druhom kroku procesu je k výluhu v miešacom reaktore pridávaný  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v molárnom pomere Ca:P 1,5:1. Viac ako 95 % P prítomného vo výluhu zreaguje za vzniku  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Po oddelení  $\text{PO}_4^{3-}$  produktu môže byť alkalický supernatant recyklovateľný na začiatok lúhovania. Pevná frakcia sa po úprave pH môže použiť ako surovina pri výrobe stavebných materiálov. Proces tak neprodukuje odpady a v súčasnosti je využívaný na ČOV Gifu v Japonsku. Technológia v praxi bola vybudovaná v roku 2010 a náklady boli ca. 7 miliónov Eur (cit.<sup>20,36</sup>).

Proces ASH DEC termicky spracováva SSA v kombinácii s vhodným chloračným činidlom ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ), ktoré sa dávkuje na odstránenie ťažkých kovov. Zmes vo forme granúl alebo peliet je spracovávaná v rotačnej peci s teplotou 800–1000 °C. Nad 1100 °C už nie je vhodná, pretože dochádza ku spekaniu granúl. Pri týchto podmienkach reagujú ťažké kovy s chlórrom za vzniku prchavých zlúčenín, ktoré počas reakcie prechádzajú z pevnej fázy do plynnej. P tak ostáva v tuhej fáze zbavený od Cd, Cu, Hg, Pb, Mo, Sn a Zn. Metóda je neúčinná pre odstránenie Ni a Cr, ktoré sú stabilné a nepodliehajú zmene na prchavejšie chloridy. Biologická dostupnosť P v SSA sa počas procesu ASH DEC zvyšuje z 30–50 % na viac ako 90 %, k čomu prispieva aj chlórapatit. Technológia ASH DEC sa realizovala poloprevádzkovo na ČOV Leoben v Rakúsku), kde sa použila na spracovanie 7 až 10 t SSA denne a plánuje sa plná prevádzka s kapacitou približne 15 000 t SSA ročne. Proces ASH DEC bol neskôr modifikovaný podľa procesu Rhenia, ktorý sa používal na výrobu hnojív už od roku 1918. Ako reakčné činidlo sa používala sóda a vznikala tak zlúčenina  $\text{CaNaPO}_4$ , čo je biologicky dostupná forma P. Vzhľadom na vysokú cenu a uhlíkovú stopu sódy sa pre testovanie ASH DEC procesu

vybral cenovo prijateľnejší  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . V tejto modifikácii sa väčšina ťažkých kovov dostala do plynnej fázy a P sa transformoval na  $\text{CaNaPO}_4$ . Proces ASH DEC so  $\text{Na}_2\text{PO}_4$  bol prevádzkovo testovaný na ČOV Weimar v Nemecku<sup>24,37</sup>.

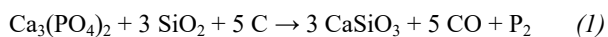
Technológia MEPHREC® používa na získavanie P nielen SSA, ale aj vysušené čistiarenské kaly so sušinou ca. 80 %. Suchý kal sa zhutní do formy brieket vo vysokotlakom lise. Pokiaľ je vstupná surovina SSA, pred briketovaním sa popol najprv zmieša s vodou (10 %). Počas briketovania stráca zmes asi 5 % vlhkosti. Výsledná vlhkosť v briketách z čistiarenskeho kalu je približne 15 %, z SSA iba okolo 5 %. Vysušené brikety sa uskladňujú v silách. Samotný proces MEPHREC je založený na tavení a splyňovaní vysušených brieket kalu alebo SSA pri teplote 1450 °C, pričom v najteplejších častiach, v okolí trysky, sa dosahuje až 2000 °C. V šachtovej peci sú dosiahnuté redukčné podmienky prídavkom koksu, vápenca alebo doloimitu. Materiál do pece vstupuje zhora. Vysoká teplota v peci spôsobuje to, že ľahšie prchavé kovy Cd, Pb a Zn sa od zmesi oddelia v plynnej fáze. Menej prchavé kovy ako Fe, Cu, Cr či Ni sú vďaka redukčným podmienkam v reaktore prítomné vo svojej elementárnej podobe vo forme taveniny. P najmä ako  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  ostáva v pevnej forme, tzv. troske. Oddelenie pevnej fázy od taveniny prebieha pri teplote 1450 °C na základe ich rôznych hustôt. Troska obsahuje približne 20 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  (5–10 % P) a v kyseline citrónovej dosahuje rozpustnosť až 90 %. Rozpustnosť v neutrálnom citráte amónnom  $\text{C}_6\text{H}_{17}\text{N}_3\text{O}_7$  je okolo 15–45 %, ak je však produkt navyše vystavený teplote 1500 °C a následne ochladený na izbovú teplotu, rozpustnosť sa zvyšuje až na 80 %. Pre použitie trosky bohatej na P ako hnojiva v poľnohospodárstve je potrebná jej ďalšia úprava. Tá však nie je v tomto článku detailne opísaná, pretože vybrané technológie sa líšia od požadovaných vlastností hnojiva. Vo všeobecnosti sa ale jedná



Obr. 5. Schéma reaktora MEPHREC a šachtovej pece z pilotnej skúšky v Freibergu<sup>37</sup>

o prídavok ďalších požadovaných nutrientov a následnej granulácie zmesi. Proces bol testovaný na ČOV Freiberg a ČOV Nuremberg, ktorá produkuje približne 40 000 ton sušiny kalu ročne<sup>37,38</sup>.

Proces RecoPhos InduCarb využíva na znovuzískavanie P rovnaký chemický princíp ako je využívaný pri výrobe P v elektrických oblúkových peciach, tzv. Woehlerovu reakciu (1). Elementárny P je v reakcii vyjadrený ako P<sub>2</sub>, pretože väčšina vzniknutého P<sub>4</sub> je v reakčných podmienkach disociovaná na formu P<sub>2</sub>.



PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> obsiahnuté v popole sú redukované na biely P, ktorý sa počas tepelného spracovania spolu s CO dostáva do plynnej fázy. Táto reakcia prebieha v peci s indukčným ohrevom (tzv. InduCarb reaktor), kde teploty presahujú aj 1300 °C. Z reakcie (1) vyplýva, že aby proces prebiehal, je nevyhnutná prítomnosť SiO<sub>2</sub> a C. Zlúčenina SiO<sub>2</sub> spolu s P sú hlavné zložky popola a C je dodávaný externe v podobe napr. práškoveho uhlia. Pri reakčných podmienkach sú menej prchavé kovy odvádzané vo forme taveniny, najmä Fe, zatiaľ čo kovy s vyššou prchavosťou, napr. Zn, Cd, sa dostávajú do plynnej fázy spolu s P a CO. Preto SSA obsahujúci kovy s relatívne nízkou teplotou varu nie je vhodný na spracovanie týmto procesom. Si a Ca sú z reaktora odvádzané v pevnej fáze, troske, ktorá môže byť využitá v cementárskom priemysle ako spojivo. Tavenina obsahujúca vysoké koncentrácie Fe môže byť ďalej ponúknutá na spracovanie železiarskemu priemyslu. Vzniknutý reak-

torový plyn tvorený najmä P a CO je následne spaľovaný za vzniku P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a CO<sub>2</sub>, pričom reakčné podmienky sú nastavené tak, že produkty spaľovania sú udržané v plynnom stave, pokiaľ sa nedostanú do vodnej práčky plynov. Tam P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> zreaguje s vodou za vzniku H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ktorá je hlavným produktom tohto procesu. Hlavným problémom procesu je vysoká afinita P k Fe, čo má za následok nižšiu účinnosť procesu, pretože časť P obsiahnutého v popole zreaguje s Fe a odchádza zo systému vo forme taveniny. Preto sa ešte skúmajú technológie umožňujúce lepšiu separovateľnosť P od Fe v SSA a tiež ako vplyvajú Al a Fe, bežne pridávané na ČOV, na účinnosť procesu<sup>28,39,40</sup>.

#### 4. Záver

Zvýšený dopyt po fosfore nás núti hľadať jeho sekundárne zdroje. Jednou z možností je jeho znovuzískavanie z čistiarenskeho kalu príp. z popola po jeho spálení. V súčasnosti poznáme už široké spektrum procesov a technológií. Z uvedeného prehľadu je zrejmé, že procesy sú síce komplikované, zatiaľ väčšinou overené na laboratórnej a poloprevádzkovej úrovni a len niektoré z nich našli svoje miesto v praxi, napr. Seaborn, ReCoPhos a LOTUS. Ďalším nezanedbateľným problémom pri aplikácii uvedených technológií je ich vysoká ekonomická náročnosť. Hlavný záver ale je, že technológie znovuzískavania fosforu z kalu príp. SSA sú realizovateľné a že recyklácia nedostatkového fosforu z čistiarenských kalov má perspektívu, avšak je naďalej potrebný výskum a zefektívnenie daných postupov recyklácie.

#### Zoznam skratiek

ČOV	čistiareň odpadových vôd
SSA	popol po spálení stabilizovaného kalu
ZBOF	zvýšené biologické odstraňovanie fosforu

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja č. APVV-17-0119.*

#### LITERATÚRA

- Werther J., Ogada T.: Prog. Energy Combust. Sci. 25, 55 (1999).
- Drtil M., Hutňan M.: *Technologický projekt*, FCHPT STU Bratislava, Bratislava 2013.
- STN 75 6401: *Čistiarene odpadových vôd pre viac ako 500 ekvivalentných obyvateľov* (máj 1999).
- ČSN 75 6401: *Čistírny odpadních vod pro ekvivalentní počet obyvatel (EO) větší než 500* (říjen 2014).
- Pathak A., Dastidar M. G., Sreekrishnan T. R.: J. Environ. Manage. 90, 234 (2009).
- Roig N., Sierra J., Nadal M., Martí E., Navalón-Madrigal P., Schuhmacher M., Domingo J. L.: Sci. Total Environ. 425, 99 (2012).
- Kupper T., Berset J. D., Etter-Holzer R., Furrer R., Tarradellas J.: Chemosphere 54, 1111 (2004).

8. Peysson W., Vulliet E.: *J. Chromatogr. A.* 1290, 46 (2013).
9. Ivanová L., Mackuľak T., Grabic R., Golovko O., Staňová A. V., Szabová P., Grenčíková A., Bodík I.: *Sci. Total. Environ.* 634, 606 (2018).
10. Drtil M., Kecskéssová S.: *10. konferencia s medzinárodnou účasťou Odpadové vody, Štrbské Pleso, 17. - 19. október 2018*, str. 265, AČE SR 2018.
11. Európska komisia: Oznámenie o preskúmaní zoznamu surovín kritických pre EÚ a o vykonávaní iniciatívy v oblasti surovín, COM (2014) 297, 2014.
12. Sartorius C., von Horn J., Tettenborn F.: *Water Environ. Res.* 84, 313 (2012).
13. Meyer C., Preyl V., Steinmetz H., Maier W., Mohn R. E., Schönberger H., v knihe: *Phosphorus Recovery and Recycling* (OhtakeH., TsunedaS., ed.), kap. 19, str. 283. Springer Nature Singapore, Singapore 2019.
14. Antakyali D., Meyer C., Preyl V., Maier W., Steinmetz H.: *Water Pract. Technol.* 8, 256.
15. [https://www.budenheim.com/fileadmin/user\\_upload/Downloads/article/ExtraPhos\\_EN\\_2016-07-07.pdf](https://www.budenheim.com/fileadmin/user_upload/Downloads/article/ExtraPhos_EN_2016-07-07.pdf), stiahnuté 4. 3. 2019.
16. Schnee R., Opitz E., v knihe: *Phosphorus: Polluter and Resource of the Future* (Schaum C., ed.), kap. 22, str. 392. IWA Publishing, London 2018.
17. Takiguchi N., Kuroda A., Ohtake H., Tsuneda S., v knihe: *Phosphorus Recovery and Recycling* (Ohtake H., Tsuneda S., ed.), kap. 35, str. 515. Springer Nature Singapore, Singapore 2019.
18. Kuroda A., Takiguchi N., Gotanda T., Nomura K., Kato J., Ikeda T., Ohtake H.: *Biotechnol. Bioeng.* 78, 333 (2002).
19. Blöcher C., Niewersch C., Melin T.: *Water Res.* 46, 2009 (2012).
20. Egle L., Rechberger H., Zessner M.: *Resour. Conserv. Recycl.* 105, 325 (2015).
21. Stendahl K., Järfverström S.: *Water Sci. Technol.* 49, 233 (2004).
22. Desmidt E., Ghyselbrecht K., Zhang Y., Pinoy L., Van der Bruggen B., Verstraete W., Rabaey K., Meesschaert B.: *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 45, 336 (2015).
23. Quist-Jensen C. A., Wybrandt L., Løkkegaard H., Antonsen S. B., Jensen H. C., Nielsen A. H., Christensen M. L.: *Water Res.* 146, 307 (2018).
24. Nieminen J.: *Diplomová práca*. Aalto University, Fínsko 2010.
25. Werther J., Ogada T.: *Prog. Energy Combust. Sci.* 25, 55 (1999).
26. Adam C., Peplinski B., Michaelis M., Kley G., Simon F. G.: *Waste Manage.* 29, 1122 (2009).
27. Donatello S., Tong D., Cheeseman C. R.: *Waste Manage.* 30, 1634 (2010).
28. Rapf M., Raupenstrauch H., Cimatoribus C., Kranert M.: *International Recycling and Recovery Conference*, Berlin 2012.
29. Petzet S., Peplinski B., Cornel P.: *Water Res.* 46, 3769 (2012).
30. Stark K., Plaza E., Hultman B.: *Chemosphere* 62, 827 (2006).
31. Schaum C., Cornel P., Jardin N.: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.1316&rep=rep1&type=pdf>, stiahnuté 4. 3. 2019.
32. Levlin E.: <http://www.levlin.se/kth/Ionexchn.pdf>, stiahnuté 4. 3. 2019.
33. <https://www.remondis-aktuell.com/en/032014/water/phoenix-from-the-ashes/>, stiahnuté 4. 3. 2019.
34. <http://fritzmeier-umwelttechnik.com/p-bac-process/?lang=en>, stiahnuté 4. 3. 2019.
35. Takhim M., Sonveaux M., de Ruiter R., v knihe: *Phosphorus Recovery and Recycling* (OhtakeH., TsunedaS., ed.), kap. 14, str. 209. Springer Nature Singapore, Singapore 2019.
36. Nakagawa H., Ohta J., v knihe: *Phosphorus Recovery and Recycling* (Ohtake H., Tsuneda S., ed.), kap. 9, str. 149. Springer Nature Singapore, Singapore 2019.
37. Adam C., Eicher N., Hermann L., Herzel H., Mallon J., Schaaf M., Stemann J.: <https://zenodo.org/record/242550/files/P-REX%20D4.1%20Technical%20comparison%20on%20the%20design%2C%20operation%20and%20performances%20of%20ash%20processes.pdf?download=1>, stiahnuté 4. 3. 2019.
38. Petzet S., Cornel P.: *Water Sci. Technol.* 64, 29 (2011).
39. Langevelg K., v knihe: *Phosphorus Recovery and Recycling* (Ohtake H., Tsuneda S., ed.), kap. 16, str. 235. Springer Nature Singapore, Singapore 2019.
40. <http://www.recophos.org/c/mid,1360,Project/>, stiahnuté 4.3.2019.

**S. Kecskéssová, Z. Imreová, B. Kožárová, and M. Drtil** (*Department of Environmental Engineering, Institute of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Chemical and Food Technology, Slovak University of Technology*): **Phosphorus Recovery from The Sewage Sludge and Sewage Sludge Ash**

Due to increasing phosphorus (P) consumption it is necessary to investigate its secondary sources. Sewage sludge and sewage sludge ash (SSA) from WWTPs contain a significant amount of P and therefore we can consider them as possible alternative sources. Up to now, many technologies have been developed to P recovery from sewage sludge or SSA. Considering to their complexity most of the technologies have been tested only under laboratory or pilot scale. This article informs about possibilities of P recovery and discusses further research.

**Keywords:** phosphorus recycling, sewage sludge, sewage sludge ash, technology

#### Acknowledgements

*This work was supported by the Slovak Research and Development Agency APVV-17-0119.*