

## Príspevok k problematike využitia tuhého odpadu zo spaľovania uhlia zelektárne EVO VOJANY

*Benková Marta<sup>1</sup>*

### *A contribution to the problems of utilizing coal combustion wastes from the EVO Vojany power station*

*In the contribution the procedures mineral processing technologies are presented. By their application, individual valuable components are of gained from the solid waste of black coal-fired in a power station. The flotation product of unburned coal rests is characterized by 85 – 86 % loss ignition. The magnetic product (usually is it a new mineral formation of magnetite) includes 47 – 49 % Fe. The fly ash which is free of the unburned coal rests and magnetite iron includes only 1.02 – 1.34 % loss ignition and 5.38 – 4.71 % Fe. The products from the can be usable in several industrial areas (building industry, metallurgy, etc).*

**Key words:** fly ash, valuable components, sorting, flotation, magnetic separation.

*Motto:*

*Zemeguľa nie je dedičstvo po našich predkoch, ale je to pôžička, ktorú budeme musieť vrátiť našim deťom. Starajme sa o ňu tak, aby sme sa nemuseli hanbiť, keď im ju budeme vracat'.*

### Cieľ výskumu

Popolček, ako lacná surovina, ktorej podiel podľa Správ o stave životného prostredia Slovenskej republiky v rokoch 1999-2003 predstavuje takmer 70 % tuhého odpadu produkovaného na Slovensku, má dobré úžitkové vlastnosti a môže byť použitý aj v prípade vyššieho obsahu zvyškov nespáleného uhlia v hutníctve železa, ako súčasť zásypaných hmôt (Jacko et al., 2005).

Separáčne technológie vo všeobecnosti je možné používať, avšak pre každý druh popolčeka je potrebné vyskúšať vhodné postupy, ktoré umožňujú získať jednotlivé úžitkové zložky za optimálnych podmienok (Michalíková et al., 2003)

Laboratórny výskum bol uskutočnený na vzorkách popolčeka, ktoré boli odobraté z jednotlivých výsypiek výtavného kotla č.1 v Elektriárňach EVO Vojany, o.z. Jeho cieľom bolo zistiť najvhodnejšie možnosti získavania jednotlivých úžitkových zložiek, a to zvyškov nespáleného uhlia a minerálneho novotvaru magnetitu s obsahom Fe okolo 50 %.

### Zrnitostná analýza

Jedným z fyzikálnych postupov na separáciu zvyškov nespáleného uhlia je triedenie (Michalíková, 2004). V popolčekoch, zachytávaných v jednotlivých výsypkách elektrofiltrov, dochádza k zachytávaniu častíc, teda aj spáliteľných látok – zvyškov nespáleného uhlia – podľa pravidla súpadnosti. V jednotlivých výsypkách sa zachytia častice, ktoré sú súpadné, t.j. tie, ktoré majú rovnakú konečnú rýchlosť padania/sedimentovania. V prvej výsypke sedimentuje najviac častíc s najvyššou hustotou, v poslednej sú to častice nespálených zvyškov uhlia – nedopalu, pretože majú najnižšiu mernú hmotnosť. Prevádzkovými meraniami bolo zistené, že:

- v I. rade výsypiek (4 výsypky: č. 7, 8, 9, 10) sa zachytáva 90 – 94 % z celkového množstva produkovaného popolčeka,
- v II. rade výsypiek (4 výsypky: č. 11, 12, 13 a 14) sa zachytáva 6 – 10 % hmotnostných.

Výsledky zrnitostných analýz popolčeka z výsypiek kotla K1 EVO Vojany o.z. sú uvedené v tab. 1 a 2.

Z tab. 1 je možné zistiť, že vo výsypke č. 7 je nasledovná distribúcia nedopalu/zvyškov nespáleného uhlia/spáliteľných látok vyjadrená stratou žiháním (s.ž.): v najjemnejšej zrnitostnej triede 3,16 % s.ž. pri hmotnostnom výnose 79,23 %, v hrubších zrnitostných triedach dochádza k výraznému zvýšeniu obsahu s.ž.

<sup>1</sup> Ing. Marta Benková, CSc., Katedra informatizácie a riadenia procesov, F BERG, TU v Košiciach, [marta.benkova@tuke.sk](mailto:marta.benkova@tuke.sk)  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 24. 3. 2006)

V časticách popolčeka zrnitosti 0,040 – 0,250 mm je 69,97 % s.ž., pričom hmotnostný výnos je iba 20,77 %. Ak by bolo možné odtriediť frakciu 0 – 0,040 mm, potom by bolo možné túto časť popolčeka použiť ako úžitkovú zložku pre stavebníctvo. Podľa EN 206-1 je pre použitie popolčeka v betónoch limitný obsah 3 – 5 % s.ž.

Tab. 1. Mokrú zrnitostnú analýzu vzorky popolčeka z kotla K1, výsyпка č. 7.  
Tab. 1. Wet grain size analysis of fly ash from boiler K1, dumping hopper No. 7.

Zrnitosť	Hmotnostný výnos triedy		Strata žíhaním s.ž.	Fe vo vzorke	Fe v popole
	[mm]	[g]			
+0,250	1,41	1,41	68,21	2,19	26,71
0,12 – 0,25	9,49	9,49	77,19	2,52	11,37
0,071 – 0,12	6,96	6,96	69,04	2,07	13,26
0,040 – 0,071	2,91	2,91	51,63	3,57	14,61
0 – 0,040	79,23	79,23	3,16	5,33	5,49
Podanie - vstup	100,00	100,00	17,46	4,75	5,75
Analyzované			17,28		

V tab. 2 sú výsledky mokrej zrnitostnej analýzy z kotla K1, výsycky č. 11 (prvá výsyпка v druhom rade), ktorá bola realizovaná v laboratórnom rozsahu. Podľa prevádzkových meraní a stanovení obsahu zvyškov nespáleného uhlia bolo opakovane zistené, že v II. rade výsypek sa zachytávajú častice s vysokým obsahom s.ž. Z tabuľky je možné zistiť, že v najjemnejšej zrnitostnej triede 0 – 0,04 mm je obsah nedopalu 14,78 % s.ž. V hrubších zrnitostných triedach dochádza k dramatickému nárastu obsahu nedopalu 70 – 82 % s.ž. V prípade popolčeka z II. radu výsypek nie je vhodné uvažovať s odtriedením častíc s nižším obsahom nedopalu v najjemnejšej triede 0 – 0,04 mm. Odtriedenie častíc zrnitostnej triedy 0 – 0,04 mm by bolo z hľadiska praktického využitia zbytočné, nakoľko by ich nebolo možné podľa kritérií EN 206-1 použiť.

Tab. 2. Mokrú zrnitostnú analýzu vzorky popolčeka z kotla K1, výsyпка č. 11.  
Tab. 2. Wet grain size analysis of fly ash from boiler K1, dumping hopper No. 11.

Zrnitosť	Hmotnostný výnos triedy		Strata žíhaním s.ž.	Fe vo vzorke	Fe v popole
	[mm]	[g]			
+0,250	1,93	1,50	53,62	4,27	9,20
0,12 – 0,25	16,82	13,09	81,84	1,06	5,84
0,071 – 0,12	29,28	22,79	82,06	1,34	7,49
0,040 – 0,071	17,47	13,59	70,17	2,84	9,51
0 – 0,040	63,00	49,03	14,78	3,83	4,50
Podanie - vstup	160,41	100,00	47,00	2,77	6,11
Analyzované			46,57		

O praktickom použití technologického uzla mokrého triedenia je možné pochybovať, nakoľko nie je záruka, že v jednotlivých výsypkách bude vždy zachytávaný popolček s rovnakým obsahom s.ž., teda nie je zaručená dostatočná ostrosť triedenia popolčeka. Ak by bolo suché aj mokré triedenie realizované v priemyselnom rozsahu, pravdepodobne nedosiahne požadovanú technickú účinnosť. Suché triedenie býva realizované s účinnosťou len okolo 30 %, mokré 60 – 80 %, avšak ani pri mokrom triedení nie je vysoká pravdepodobnosť z priemernej vzorky získať popolček s obsahom spáliteľných látok pod 10 %.

### Flotácia

Flotácia je fyzikálno-chemický spôsob rozdzušovania, založený na výberovom spájaní vzduchových bubliniek s tuhými časticami vo vodnom prostredí. Spájanie závisí od hydrofóbnosti povrchu tuhých častíc. Ak povrch tuhej častice, ktorú je potrebné flotačne oddeliť, nie je prirodzene hydrofóbný, jeho hydrofóbnosť je možné zvýšiť prísadami - zberačmi. Zberače, pridávané do popolčekovej suspenzie, svojou výberovou adsorpciou na povrchu tuhej látky zabezpečujú zvýšenie jej hydrofóbnosti, a tým prednostné prichytávanie

vzduchových bubliniek. Agregáty – vzduchové bublinky a minerál, resp. tuhá látka – majú nižšiu hustotu ako rmut, ktorý ich obklopuje, preto vyplávajú - vyflotujú - a na hladine rmutu vytvárajú mineralizovanú penu, ktorá sa stiera. Takto sa flotovateľná úžitková zložka oddelí od iných sprievodných zložiek (Michalíková et al., 2003; Špaldon, 1986).

Flotačnou separáciou zvyškov nespáleného uhlia z popolčiek vzniknú dve úžitkové zložky:

- flotačný koncentrát, ktorý je recyklovateľný, alebo iným spôsobom použiteľný,
- flotačný „odpad“, ktorý môže byť následne magneticky separovaný so ziskom magnetického produktu, pričom „odpad“ z magnetického rozdzružovania je ten produkt, ktorý vďaka nízkemu obsahu s.ž. môže byť zužitkovaný v stavebníctve.

### Elektrostatické metódy rozdzružovania

Elektrostatické metódy rozdzružovania sú založené na rozličných elektrických vlastnostiach minerálov, alebo tuhých látok, ktoré sa pohybujú v elektrickom poli. Elektrostatická separácia využíva princíp rozdielnej veľkosti povrchového náboja na časticiach popolčeka: dobré vodivé vlastnosti majú zvyšky nespáleného uhlia a vlastnosti izolátorov majú silikátové a aluminosilikátové anorganické zložky.

Princíp rozdzružovania je nasledovný: Na kovový elektricky nabitý valec (bubon) je privádzaná zmes zrn s rozličnou elektrickou vodivosťou. Častice, ktoré sa rýchlejšie nabijajú rovnomerným nábojom, budú od valca odpudzované, kým častice, ktoré sa nabijajú pomaly alebo sa nenabijú, nie sú od valca odpudzované. V prípade popolčeka dochádza k javu, že častice spáliteľných látok majú tendenciu získať elektrický náboj zhodný s elektródou prístroja, z toho dôvodu sú odpudzované, teda dopadajú do väčšej vzdialenosti od valca.

Tento spôsob rozdzružovania popolčeka s cieľom odseparovať zvyšky nespáleného uhlia suchou cestou na popolčeku z EVO Vojany nie je možné uplatniť, nakoľko elektrostatické rozdzružovanie poskytne „koncentrát“ a „odpad“, v ktorom sa zníži obsah s.ž. najviac o 50 %. V prípade popolčeka z EVO Vojany, kde je priemerný obsah 17 – 30 % s.ž., by takéto zníženie neprineslo požadovaný efekt, t.j. obsah s.ž. by nedosiahol 3 – 5 %.

### Magnetická separácia

Magnetická separácia využíva rozdielne magnetické vlastnosti tuhých látok v magnetickom poli. Na rozdzružovanie popolčiek sa používajú nízkointenzitné magnetické rozdzružovače (s permanentnými magnetmi alebo s elektromagnetmi), nakoľko cieľom je čo najvyššie skoncentrovanie Fe zložky.

Popolčeky sú paramagnetické. Výsledky chemických analýz a výsledky stanovenia obsahu chemických prvkov meraniami elektronovým mikroskopom, najmä mapy distribúcií chemických prvkov preukázali, že takmer každá častica popolčeka obsahuje Fe, pričom zložka Fe môže byť prevažne vo forme minerálneho novotvaru magnetitu (Michalíková et al., 2003). Z uvedeného vyplýva, že na separáciu Fe zložky bude vhodné použiť proces nízkointenzitného magnetického rozdzružovania. Pri tomto postupe sa do magnetického produktu kumulujú častice popolčiekov s vyššími obsahmi Fe.

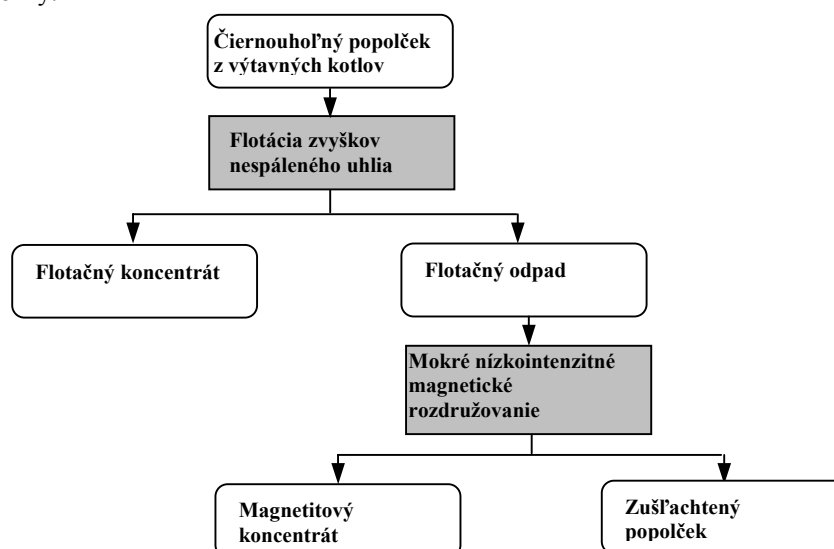
### Kombinovaný spôsob rozdzružovania popolčeka

Kombinovaný spôsob rozdzružovania popolčeka spočíva v tom (Michalíková et al., 2004), že najprv sú z popolčeka flotáciou odstránené zvyšky nespáleného uhlia, pričom flotačný koncentrát tvorí jednu z úžitkových zložiek. Z odpadu po flotácii, t.j. z popolčeka s obsahom 0 až max. 2,5 % s.ž. je mokrým nízkointenzitným magnetickým rozdzružením oddelené magnetitové železo.

Úvahy, ktoré viedli k použitiu kombinovaného spôsobu rozdzružovania popolčeka boli nasledovné:

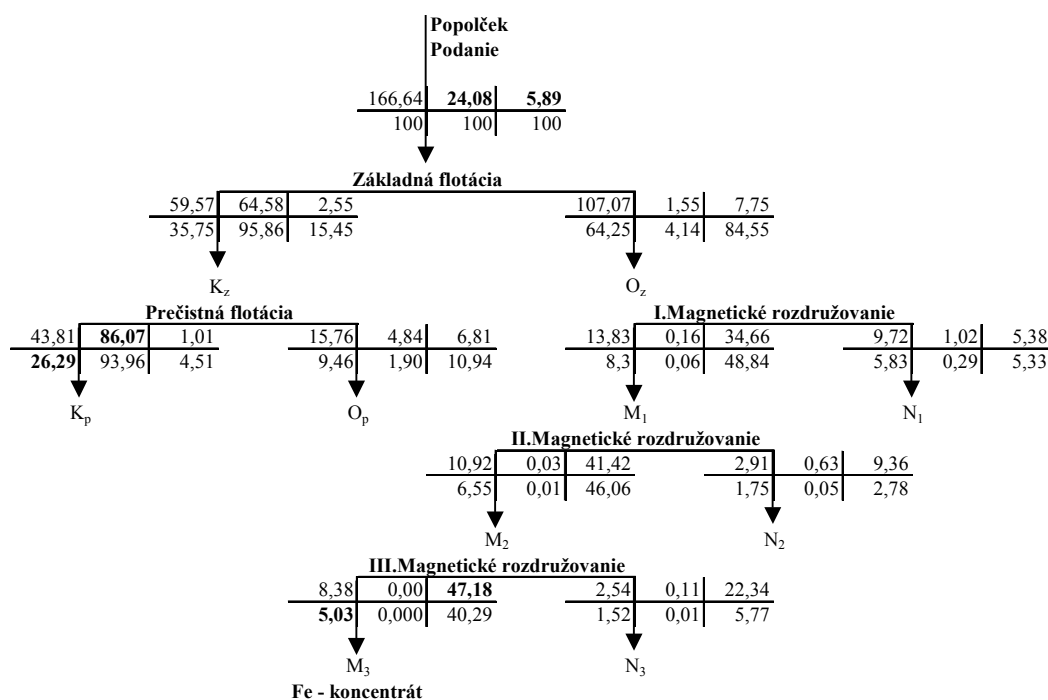
- ak majú byť popolčeky využívané v stavebníctve, je potrebné znížiť v nich obsah zvyškov nespáleného uhlia/spáliteľných látok/nedopalu na hranicu maximálne 4 až 10 % straty žihaním (STN 722062-69), ale podľa EN 206-1 je pre použitie popolčeka v betónoch limitný obsah 3 – 5 % s.ž.,
- v procese flotácie sa získa flotačný koncentrát so značným obsahom spáliteľných látok, ktorý môže byť ďalej zužitkovaný,
- odstránenie magnetitového železa môže zlepšiť vlastnosti „zušľachteného“ popolčeka (odpadu po flotácii a magnetickej separácii), zužitkovateľného v stavebníctve na výrobu stavebných materiálov (tepelnizolačné vlastnosti, možnosť farbenia stavebných dielcov v hmote),
- získaný magnetitový koncentrát môže byť použitý:
  - o ako surovina pre výrobu železa,
  - o ako predajný produkt - zaťažkávadlo pre rozdzružovanie uhlia v ťažkých suspenziách, doplnkový materiál pre výrobu šamotových pecí, atď.

Na obr. 1 je schéma kombinovaného spôsobu rozdrúžovania popolčeka, ktorým sa z popolčeka získavajú úžitkové zložky.



Obr. 1. Schéma kombinovaného spôsobu rozdrúžovania popolčeka.  
Fig. 1. The flow sheet of combined approach separation of fly ash.

Technologický postup a výsledky kombinovaného rozdrúžovania priemernej vzorky z výsypiek I.radu č. 7, 8, 9 a 10 popolčeka z kotla K1 Elektrárne EVO, je uvedený na obr. 2.



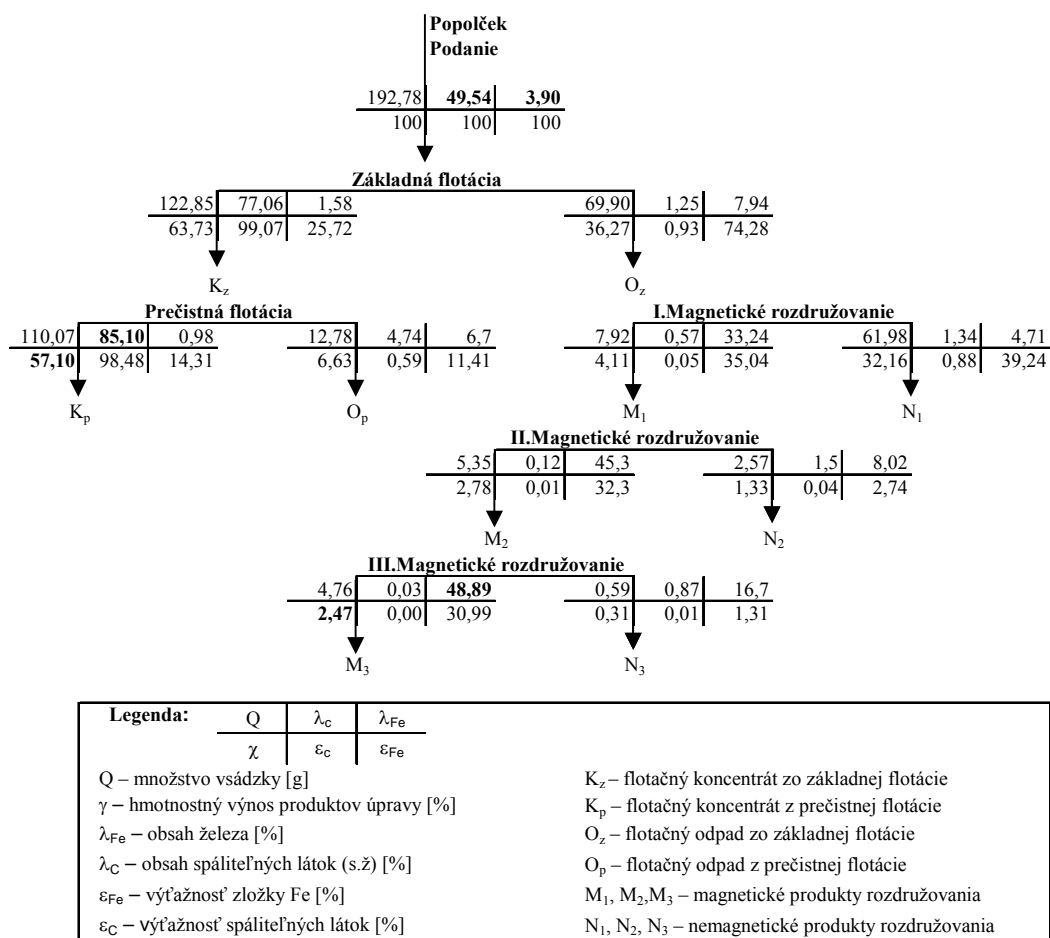
Legenda:	Q	$\lambda_c$	$\lambda_{Fe}$
	$\chi$	$\epsilon_c$	$\epsilon_{Fe}$
Q – množstvo vsádzky [g]			
$\gamma$ – hmotnostný výnos produktov úpravy [%]			
$\lambda_{Fe}$ – obsah železa [%]			
$\lambda_c$ – obsah spáliteľných látok (s.ž) [%]			
$\epsilon_{Fe}$ – výťažnosť zložky Fe [%]			
$\epsilon_c$ – výťažnosť spáliteľných látok [%]			
K <sub>z</sub> – flotačný koncentrát zo základnej flotácie			
K <sub>p</sub> – flotačný koncentrát z prečistnej flotácie			
O <sub>z</sub> – flotačný odpad zo základnej flotácie			
O <sub>p</sub> – flotačný odpad z prečistnej flotácie			
M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> – magnetické produkty rozdrúžovania			
N <sub>1</sub> , N <sub>2</sub> , N <sub>3</sub> – nemagnetické produkty rozdrúžovania			

Obr. 2. Úpravnická schéma kombinovaného rozdrúžovania popolčeka flotáciou a následným mokrou nízko-intenzívnou magnetickou separáciou - vzorka č.1.  
Fig. 2. The flow sheet of combined separation of fly ash with flotation and subsequent wet low-intensity magnetic separation - sample 1.

Z popolčeka bol základnou flotáciou získaný koncentrát s obsahom 64,58 % s.ž. Následne bol prečisťovaný v jednostupňovej prečistnej flotácii. Koncentrát prečistnej flotácie obsahoval **86,07 % s.ž.** a jeho hmotnostný výnos bol 26,29 %, odpad po prečistnej flotácii obsahoval iba **4,84 % s.ž.**

Komorový produkt po základnej flotácii - odpad  $O_z$  - bol magneticky rozdrúžovaný na žliabkovom magnetickom rozdrúžovači s permanentnými magnetmi. Magnetická indukcia B sa menila od 0,15 do 0,03 T (v závislosti od hrúbky prepážky medzi vrchnou plochou žliabku, na ktorej sa uskutočňuje rozdrúžovanie a medzi permanentnými magnetmi). Magnetický produkt po prvej (základnej) magnetickej separácii bol v ďalších stupňoch prečisťovaný tak, aby konečný produkt prečistnej magnetickej separácie mal vysoký obsah Fe. Zo schémy úpravy je možné zistiť, že finálny magnetický produkt – magnetitový koncentrát po troch prečistných magnetickej separáciách – obsahuje **47,18 % Fe**. Nemagnetický produkt – odpad zo základného mokrého magnetického rozdrúžovania – je zušľachtený popolček a obsahuje 1,02 % s.ž., 5,38 % Fe.

Obr. 3 dokumentuje technologický postup a výsledky kombinovaného rozdrúžovania priemernej vzorky popolčeka z kotla K1 Elektrárne EVO z výsypiek II. radu č. 11, 12, 13 a 14.



Obr. 3. Úpravnícka schéma kombinovaného rozdrúžovania popolčeka flotáciou a následným mokrým nízkointenzitným magnetickým rozdrúžovaním pre vzorku č. 2.  
 Fig. 3. The flow sheet of combined separation of fly ash with flotation and subsequent wet low intensity magnetic separation – sample 2.

Koncentrát základnej flotácie s obsahom 77,06 % s.ž. bol prečisťovaný v jednostupňovej prečistnej flotácii. Koncentrát po prečistnej flotácii obsahoval **85,70 % s.ž.** s hmotnostným výnosom **57,10 %**.

Komorový produkt po základnej flotácii – odpad  $O_z$  – bol magneticky rozdrúžovaný. Magnetický produkt po prvej (základnej) magnetickej separácii bol v ďalších stupňoch prečisťovaný. Zo schémy úpravy je možné zistiť, že finálny magnetický produkt – magnetitový koncentrát po troch prečistkách – obsahuje **48,89 % Fe**. Nemagnetický produkt – odpad zo základného mokrého magnetického rozdrúžovania  $N_1$  – obsahuje 1,34 % s.ž. a 4,71 % Fe.

### Záver

Laboratórny výskum možnosti úpravy tuhého odpadu - popolčeka z Elektrárne EVO Vojany, o. z. potvrdil, že kombinovaným rozdrúžovaním popolčeka flotáciou a následným mokrým nízkointenzívnym magnetickým rozdrúžovaním je možné dosiahnuť najvhodnejšiu skladbu finálnych produktov:

Flotačný koncentrát. Má obsah spáliteľných látok 85 – 86 % s.ž. a spalné teplo 26 – 27 MJ.kg<sup>-1</sup>, ktoré je podobné ako spalné teplo pôvodného spaľovaného uhlia. Flotačný koncentrát je použiteľný ako prekurzor uhľikátých materiálov.

Magnetitový koncentrát s obsahom 47 – 49 % Fe pri hmotnostnom výnose 2,8 – 5 a viac percent v závislosti od obsahu zvyškov nespáleného uhlia v pôvodnej vzorke. Ak popolček obsahuje 24 % s. ž., magnetický produkt sa získa s hmotnostným výnosom viac ako 5 % (obsah Fe = 47,18 %). Ak popolček obsahuje 49,5 % s.ž., potom z „odpadu“ po flotácii sa môže získať magnetický produkt iba s hmotnostným výnosom 2,8 % (obsah Fe = 48,89 %). Získanie magnetitového koncentráta môže znamenať ekonomický prínos, pretože umelý magnetit v mnohých prípadoch môže nahradiť prírodnú surovinu. Výhodné je jeho použitie ako zaťažkávadla pri rozdrúžovaní uhlia v ťažkých suspenziách, pretože vďaka prevažne guľôčkovému tvaru je ľahšie zmývateľný z povrchu rozdrúžovaného materiálu (Michalíková et al., 2005).

„Odpad“ po flotácii a prvom magnetickom rozdrúžovaní, t.j. produkt s minimálnym obsahom spáliteľných látok (1,02 – 1,34 % s.ž.) a s minimálnym obsahom (5,38 – 4,71 %) železa vo forme oxidov - zušľachtený popolček. Zušľachtený popolček je využívaný v stavebníctve, v keramických hmotách, vo výrobe cementu ako prísada do betónov. Nemenej zaujímavé je jeho využitie ako náhrady prírodných zeolitov (Mikulášová, 2001).

Odpady z prečisťujúcich stupňov magnetického rozdrúžovania by pravdepodobne mohli byť vzhľadom na obsah železa a silikátov použiteľné pri výrobe šamotových pecí, ale rovnako môžu byť použité – podobne ako zušľachtený popolček – v stavebníctve pri výrobe betónov.

Využívanie priemyselnej úpravy tuhého odpadu zo spaľovania uhlia v elektrárňach v praxi závisí od mnohých faktorov, z ktorých v súčasnosti najzávažnejší je ekonomický, no s ohľadom na budúcnosť by sa ním čo najskôr mal stať environmentálny. Dôsledkom aplikovania úpravnických postupov na separáciu jednotlivých úžitkových zložiek bude zhodnocovanie popolčeka, ktoré sa doteraz v priemyselnom rozsahu nerealizuje.

*Práca bola realizovaná aj v rámci riešenia grantového projektu č.1/3347/06*

### Literatúra – References

- Jacko, V., Michalíková, F.: Možnosti zužitkovania čierouhoľného popolčeka z DZ Energetika U. S. Steel Košice. *Acta Montanistica Slovaca*, roč. 10, 1/2005, s. 209-213, ISSN 1335-1788.
- Michalíková, F., Floreková, L., Benková, M.: Vlastnosti energetického odpadu - popola a využitie technológií pre environmentálne nakladanie. *Tlačiareň Krivda*, 2003, ISBN 80-8073-054-7.
- Michalíková, F., Škvarla, J., Zeleňák, F.: Možnosti využitia popílku ze spalování černého uhlí. *Odpady 2*, 2004, s. 21., ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- Michalíková, F.: Overenie možnosti recyklácie popolčekov. *Výskumná správa v rámci zmluvného projektu*, 2004.
- Michalíková, F., Nagyová, L., Belanská, H.: Využitelnost' populov z tepelných elektrární. *Odpady 6-7/2005*, s.7-10, ISSN 1335-7808.
- Mikulášová, M.: Sledovanie obsahu úžitkových zložiek v popole z výtavného kotla. *Diplomová práca 2001*, Fakulta BERG TU v Košiciach.
- Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky. *Správa o stave životného prostredia*, SR, 1999-2003, ISBN 802-888833-24-8.
- Špaldon, F.: Úprava nerastných surovín., *Alfa-SNTL Praha*, 1986.