

ZVEZDANA BAŠČAREVIĆ<sup>1</sup>  
MIROSLAV KOMLJENIĆ<sup>1</sup>  
LJILJANA PETRAŠINOVIĆ–  
STOJKANOVIĆ<sup>1</sup>  
NATAŠA JOVANOVIĆ<sup>1</sup>  
ALEKSANDRA ROSIĆ<sup>2</sup>  
MIHAILO RŠUMOVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centar za multidisciplinarnu  
studiju Univerziteta u Beogradu,  
Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Rudarsko–geološki fakultet  
Univerziteta u Beogradu,  
Beograd, Srbija

<sup>3</sup>Institut za puteve D.D. Beograd,  
Beograd, Srbija

STRUČNI RAD

66.046.59.004.12:536.5.004.12:666.942

## ISPITIVANJE SVOJSTAVA ELEKTRO- FILTERSKOG PEPELA TERMoeLEKTRANA U CILJU NJEGOVE UPOTREBE KAO SEKUNDARNE SIROVINE ZA PROIZVODNJU PORTLAND–CEMENTNOG KLINKERA

*U ovom radu predstavljeni su rezultati ispitivanja svojstava elektrofilterskog pepela iz četiri termoelektreane u Srbiji. Izvršena je fizička, hemijska, mineraloška i termička karakterizacija elektrofilterskog pepela u cilju utvrđivanja mogućnosti njegove upotrebe kao sirovine u industriji građevinskih materijala, pre svega u industriji cementa. Među ispitivanim uzorcima elektrofilterskog pepela postoje određene razlike u pogledu fizičkih, hemijskih i mineraloških karakteristika, budući da osobine pepela zavise od vrste uglja, uslova sagorevanja u peći, efikasnosti elektrofiltera i brojnih drugih faktora. Međutim, ispitivani uzorci pepela su u pogledu termičkih karakteristika veoma slični. Zaključeno je da upotreba elektrofilterskog pepela, kao jedne od komponenti sirovinske mešavine za proizvodnju portland–cementnog klinkera, ne samo da omogućava supstituciju prirodnih sirovina, nego bi mogla da ima i pozitivan uticaj na sniženje temperature sinterovanja portland–cementnog klinkera.*

U celom svetu postoji problem sa čvrstim otpadnim materijalom, kao i sa deponijama čvrstog otpada, usled čega se javlja potreba za njegovim iskorišćenjem. Jedan od problema je i elektrofilterski pepeo (EFP) iz termoelektreane. Tokom procesa sagorevanja samlevanog uglja u kotlovima termoelektreane, čestice pepela koje izlaze zajedno sa dimnim gasovima, sakupljaju se na elektrofilterima. Ovaj pepeo se zove elektrofilterski i predstavlja oko 85% od ukupne količine pepela u termoelektreanama.

U Srbiji godišnje nastane između 6 i 7 miliona tona elektrofilterskog pepela. Deponije elektrofilterskog pepela nalaze se pored termoelektreane i pokrivaju značajne površine obradivog zemljišta, približno 1800 hektara [1]. Trenutno se u Srbiji, kao i u svetu, samo deo proizvedenog elektrofilterskog pepela koristi kao pucolanski dodatak u industriji cementa i betona [2–4].

Lokalna eksploatacija ovog otpada, kao sekundarne sirovine u određenim proizvodnim procesima, nameće se kao jedino održivo rešenje. Velike količine elektrofilterskog pepela mogu jedino da se upotrebe u građevinarstvu i industriji građevinskih materijala. U okviru brojnih istraživanja o mogućnostima upotrebe elektrofilterskog pepela, neki autori bavili su se ispitivanjem mogućnosti korišćenja pepela kao sirovine za proizvodnju portland–cementa [5–8]. Može se očekivati da će primena elektrofilterskog pepela porasti u građevinarstvu, za proizvodnju lakih agregata [9] ili kao materijala za konsolidaciju zemljišta u putogradnji [10]. Rezultati nekih istraživanja pokazuju da bi elektrofilterski pepeo mogao da se koristi za proizvodnju staklo–keramike

[11,12]. Takođe, ispitivana je i mogućnost upotrebe pepela za proizvodnju građevinske keramike [13–15]. Neki autori su ispitivali elektrofilterski pepeo sa aspekta moguće primene [16–17].

Evropski standard EN 197–1: 2000. god., (deo 1: sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente), predviđa korišćenje elektrofilterskog pepela kao mineralnog (industrijski pucolan) dodatka cementu, ne i kao sirovinske komponente za proizvodnju portland–cementnog klinkera.

U ovom radu predstavljeni su rezultati ispitivanja svojstava elektrofilterskog pepela iz četiri termoelektreane u Srbiji. Izvršena je fizička, hemijska, mineraloška i termička karakterizacija elektrofilterskog pepela, u cilju utvrđivanja mogućnosti njegove upotrebe kao sirovine u industriji građevinskih materijala, prevashodno za proizvodnju portland–cementnog klinkera, odnosno cementa.

### EKSPERIMENTALNI DEO

#### Materijali i metode

U okviru ovog istraživanja ispitivan je elektrofilterski pepeo iz četiri termoelektreane (TE) u Srbiji: TE "Morava" – Svilajnac, TE "Kolubara" – Veliki Crljani, TE "Kostolac" – Kostolac i TE "Nikola Tesla" – Obrenovac. Ukupno je ispitivano šest različitih uzoraka elektrofilterskog pepela i to:

1. TE "Morava" – Svilajnac
2. TE "Kolubara" – Veliki Crljani
3. TE "Kostolac" B1 – Kostolac
4. TE "Kostolac" B2 – Kostolac
5. TE "Nikola Tesla", TENT A – Obrenovac
6. TE "Nikola Tesla", TENT B – Obrenovac

Raspodela veličina čestica uzoraka elektrofilterskog pepela određena je prosejavanjem na sitima veličine otvora od 63 i 43  $\mu\text{m}$ . Raspodela veličina čestica frakcije elektrofilterskog pepela ispod 43  $\mu\text{m}$  je određena

Adresa autora: M. Komljenović, Centar za multidisciplinarnu studiju Univerziteta u Beogradu, Kneza Višeslava 1a, 11000 Beograd, Srbija

E–mail: miroslav@ibiss.bg.ac.yu

Rad primljen: Jun 13, 2006.

Rad prihvaćen: Septembar 27, 2006.

na na uređaju kulter-multisajzer (Coulter Multisizer). Kao elektrolit za uzorke elektrofilterskog pepela korišćen je 2% rastvor  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ .

Određivanje hemijskog sastava je vršeno klasičnom hemijskom analizom – alkalnim topljenjem (AT), prema standardima JUS B.H.8.359–369 (1973) koji predstavljaju važeće standarde za ispitivanje pepela čvrstih goriva.

Mineraloška karakterizacija je rađena na difraktometru za prah PHILIPS PW1710, pod sledećim uslovima: zračenje sa antikatode bakra talasne dužine  $\text{CuK}\alpha = 1,54178 \text{ \AA}$  i grafitni monohromator, radni napon,  $U = 40 \text{ kV}$ , jačina struje,  $I = 30 \text{ mA}$ . Svi uzorci su ispitani pod istim eksperimentalnim uslovima u opsegu  $5 - 50^\circ 2\theta$  sa korakom  $0,02^\circ$  i vremenskim zadržavanjem  $0,5 \text{ s}$  na svakom koraku.

Proučavanje faznih transformacija tokom zagrevanja uzoraka elektrofilterskog pepela, odnosno simultana termogravimetrijska analiza (TGA) i diferencijalno-termička analiza (DTA) obavljena je na uređaju Q-600 SDT, TA Instruments, u temperaturnom intervalu od  $20$  do  $1200^\circ\text{C}$ . Uzorci su zagrevani u atmosferi vazduha čiji je protok iznosio  $100 \text{ ml/min}$ . Brzina zagrevanja iznosila je  $20^\circ\text{C/min}$ .

Promena dimenzija uzoraka elektrofilterskog pepela tokom zagrevanja ispitivana je termomikroskopom tipa E. LEITZ. WETZLAR, sa termoparom platina–rodijum/platina ( $T_{\text{max}} = 1600^\circ\text{C}$ ). Ispitivanje je izvršeno u temperaturnom opsegu od  $20$  do  $1400^\circ\text{C}$ , odnosno sve do tačke topljenja.

## REZULTATI I DISKUSIJA

### Karakterizacija materijala

#### Fizička karakterizacija

Rezultati ispitivanja su predstavjeni u tabeli 1. Može se videti da se raspodela veličina čestica ispitivanih uzoraka elektrofilterskog pepela razlikuje od uzorka do uzorka. Najveći udeo čestica ispod  $43 \mu\text{m}$  (68,65%) sadrži EFP "Morava", dok uzorci EFP "Kostolac B1" i "TENT B" sadrže najmanje čestica ispod  $43 \mu\text{m}$  (37,50 i 36,05%, respektivno).

Rezultati ispitivanja raspodele veličina čestica frakcije ispod  $43 \mu\text{m}$  dati su na slici 1. Može se videti da ispitivani uzorci polaznih sirovina imaju veoma sličnu, kontinualnu raspodelu veličina čestica ispod  $43 \mu\text{m}$ , pri čemu se srednji prečnik čestica (maseni udeo od 50%), uglavnom kreće u rasponu od  $15-20 \mu\text{m}$ , osim u slučaju EFP "Kostolac B1" (oko  $23 \mu\text{m}$ ).

Raspodela veličina čestica uzoraka elektrofilterskog pepela ukazuje na značajno prisustvo veoma sitnih čestica, što je veoma važno sa aspekta mogućeg korišćenja elektrofilterskog pepela kao sekundarne sirovine za proizvodnju portland-cementa, jer to znači da nije potrebna prethodna priprema elektrofilterskog pepela u smislu njegovog usitnjavanja ili mlevenja. S druge strane, prisustvo veoma sitnih čestica je povoljna okolnost jer one, po svojoj prirodi, lako reaguju sa drugim česticama tokom procesa sinterovanja.

#### Hemijska karakterizacija

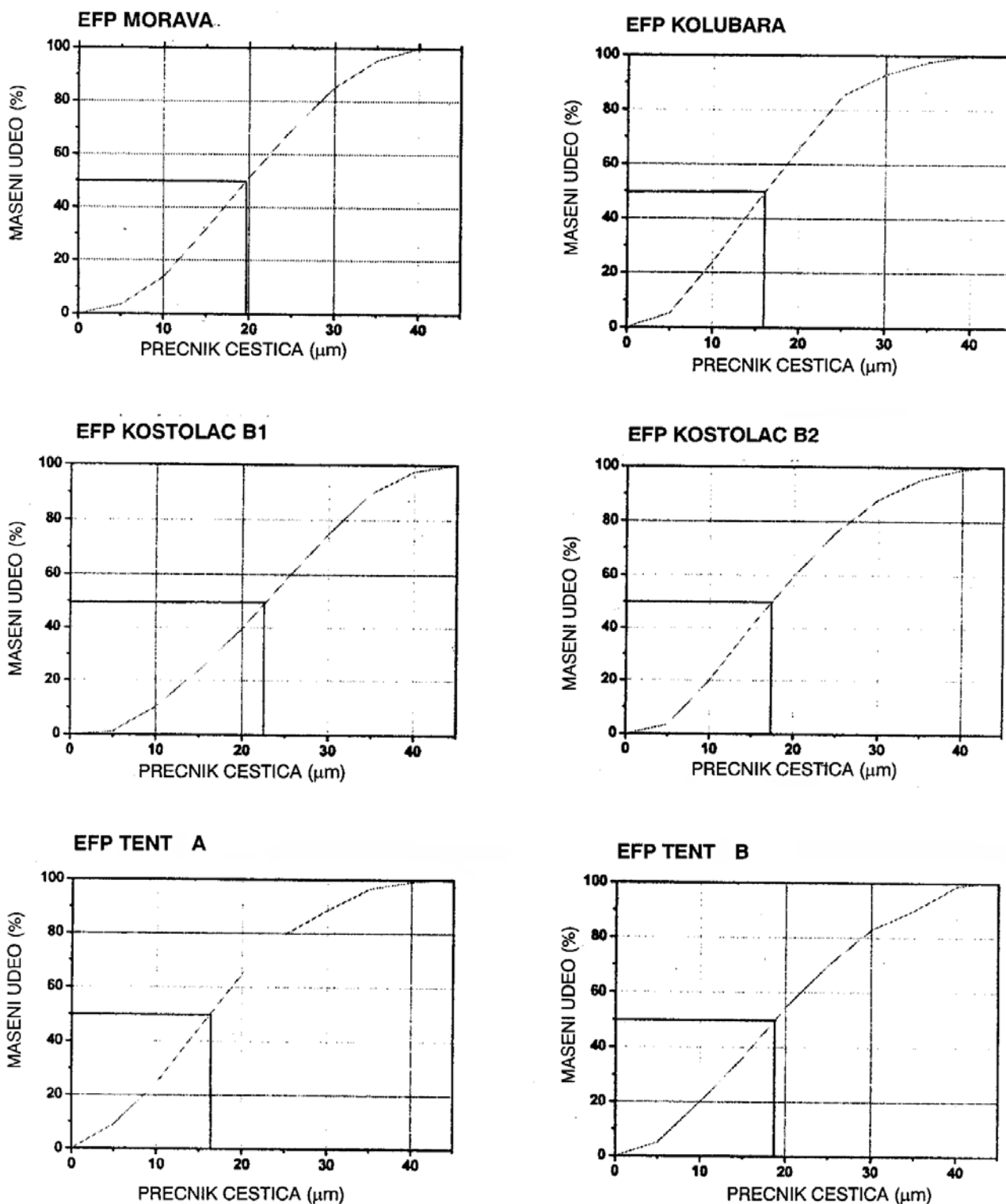
Hemijski sastav uzoraka elektrofilterskog pepela dat je u tabeli 2. Kao što se vidi, hemijski sastav varira od uzorka do uzorka elektrofilterskog pepela. Udeo  $\text{SiO}_2$

Tabela 1. Raspodela veličina čestica uzoraka elektrofilterskog pepela  
Table 1. Particle size distribution of the fly ash samples

Oznaka uzorka	Maseni udeo čestica (%)			
	+63 $\mu\text{m}$	-63 $\mu\text{m}$ +43 $\mu\text{m}$	-43 $\mu\text{m}$	Ukupno
EFP "Morava"	23,30	8,05	68,65	100
EFP "Kolubara"	42,65	5,30	52,05	100
EFP "Kostolac B1"	56,50	6,00	37,50	100
EFP "Kostolac B2"	30,35	8,45	61,20	100
EFP "TENT A"	30,66	7,33	62,01	100
EFP "TENT B"	55,70	8,25	36,05	100

Tabela 2. Hemijski sastav uzoraka elektrofilterskog pepela  
Table 2. Chemical composition of the fly ash samples

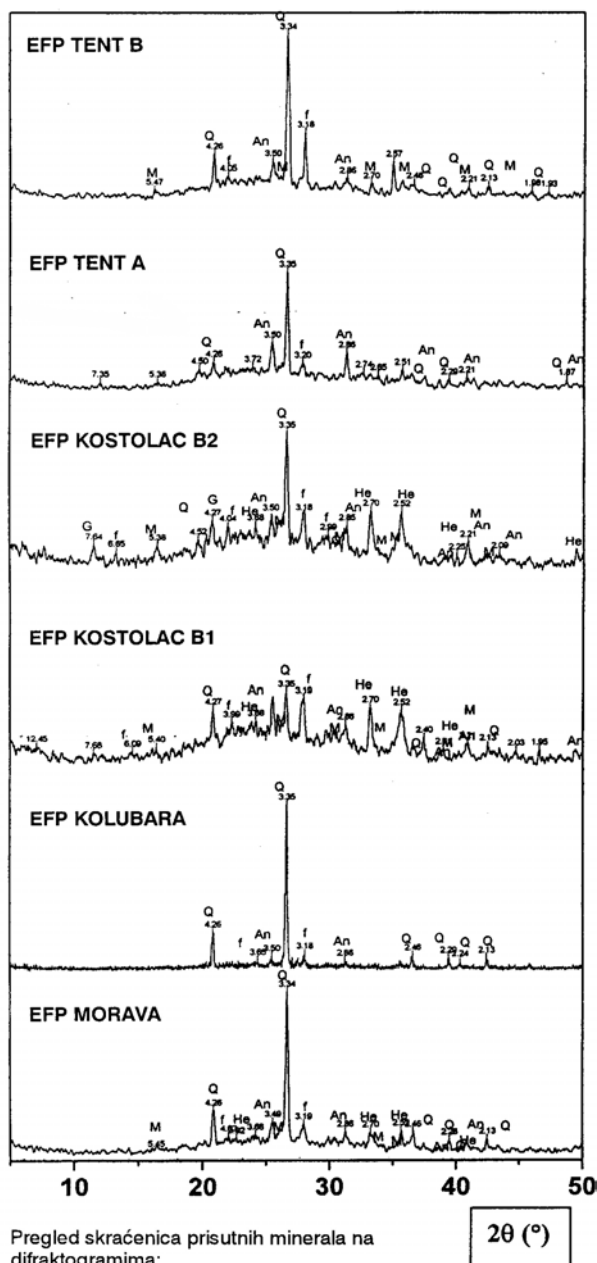
Ispitivani sastav	Oznaka uzorka					
	EFP "Morava"	EFP "Kolubara"	EFP "Kostolac B1"	EFP "Kostolac B2"	EFP "TENT A"	EFP "TENT B"
$\text{SiO}_2$	55,23	62,13	46,85	45,56	48,71	54,26
$\text{Al}_2\text{O}_3$	21,43	17,20	23,20	22,90	24,60	24,90
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,42	5,95	12,14	13,66	6,81	6,50
CaO	7,94	5,67	8,26	8,93	8,92	6,34
MgO	2,61	2,00	2,77	2,68	2,83	1,89
$\text{SO}_3$	0,81	0,67	1,48	1,79	1,00	2,51
Gubitak žarenjem na $1000^\circ\text{C}$	1,66	2,88	4,44	3,34	4,38	2,06
Ukupno	97,10	96,50	99,10	98,87	97,21	98,49



Slika 1. Raspodela veličina čestica uzoraka elektrofilterskog pepela  
Figure 1. Particle size distribution of the fly ash samples

kreće se od 45,56% u uzorku EFP "Kostolac B2" do 62,13% u EFP "Kolubara". Udeo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u uzorcima elektrofilterskog pepela kreće se od 17,20% (EFP "Kolubara") do 24,90% (EFP "TENT B"). Udeo  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  varira od

5,95% (EFP "Kolubara") do 13,66% (EFP "Kostolac B2"). Udeo  $\text{CaO}$  je relativno nizak i kreće se u granicama od 5,67% (EFP "Kolubara") do 8,93% (EFP "Kostolac B2"), dok je udeo  $\text{MgO}$  još manji i kreće se u granicama od



Slika 2. Difraktogrami uzoraka elektrofilterskog pepela  
Figure 2. XRD patterns of the fly ash samples

Tabela 3. Sadržaj amorfne i kristalnih faza u elektrofilterskim pepelima  
Table 3. The content of amorphous and crystalline phases in the fly ash samples

Oznaka uzorka	Sadržaj amorfne faze	Sadržaj kristalnih faza
EFP "Morava"	značajan	najzastupljeniji kvarc, mala količina, feldspata, anhidrita, hematita, mulita
EFP "Kolubara"	manja količina	najzastupljeniji kvarc, male količine, feldspata i anhidrita
EFP "Kostolac B1"	značajan	male količine hematita, anhidrita, kvarca, feldspata i vrlo malo mulita
EFP "Kostolac B2"	značajan	male količine hematita, anhidrita, feldspata, kvarca i vrlo malo mulita
EFP "TENT A"	značajan	kvarc, anhidrit i vrlo malo feldspata, mulit u tragovima
EFP "TENT B"	značajan	kvarc, feldspat, anhidrit i mulit u malim količinama

1,89% (EFP "TENT B") do 2,83% (EFP "TENT A"). Na kraju, treba pomenuti da je udeo SO<sub>3</sub> u ispitivanim uzorcima takođe relativno nizak i da se kreće u granicama od 0,67% (EFP "Kolubara") do 2,51% (EFP "TENT B").

Gubitak žarenjem na 1000°C se kreće u granicama od 1,66% (EFP "Morava") do 4,44% (EFP "Kostolac B1"), što ukazuje na prisustvo nesagorelih čestica uglja.

Hemijski sastav ispitivanih uzoraka ukazuje na prisustvo svih važnijih oksida koji se inače nalaze u osnovnim sirovinskim komponentama, odnosno mešavinama za proizvodnju portland-cementnog klinkera, a koji su značajni za formiranje osnovnih klinkernih minerala (kalcijum-silikata i kalcijum-aluminata) tokom procesa sintezovanja. Dominantno prisustvo SiO<sub>2</sub> u elektrofilterskom pepelu takođe je značajno pri komponovanju mešavine, kada se zbog neodgovarajućeg hemijskog sastava osnovnih komponenti (uglavnom krečnjak i laporac), odnosno nedovoljnog udela SiO<sub>2</sub>, mora uvesti nova komponenta koja je nosilac SiO<sub>2</sub> (na primer, kvarcni pesak).

Na osnovu hemijske analize ispitivanih uzoraka elektrofilterskog pepela, može se zaključiti da se oni mogu koristiti kao sirovinska komponenta za sintezu portland-cementnog klinkera.

#### Mineraloška karakterizacija

Rezultati mineraloške analize dati su na slici 2. Dobijeni podaci položaja difrakcionih maksimuma 2θ(°), vrednosti međuplosnih rastojanja d (Å), kao i odgovarajući intenziteti I prikazani su za sve uzorke elektrofilterskog pepela uporedno. Na osnovu dobijenih vrednosti I i d upoređivanjem sa literaturnim podacima i JCPDS karticama identifikovane su prisutne kristalne faze.

Zbog značajnog prisustva amorfne faze u ispitivanim uzorcima elektrofilterskog pepela nije moguće, sa zadovoljavajućom preciznošću, odrediti kvantitativno učešće pojedinih mineralnih faza. Pregled ocene sadržaja amorfne faze i kristalnih faza u ispitivanim uzorcima elektrofilterskog pepela prikazan je u tabeli 3.

Generalno se može reći da svi uzorci elektrofilterskog pepela sadrže znatnu količinu amorfne faze, od kristalnih faza najzastupljeniji su kvarc i feldspat, a u većini slučajeva prisutni su i hematit, anhidrit i mulit. Termodinamički posmatrano, amorfna faza bi trebala da ima veću reaktivnost u odnosu na prisutne kristalne faze, čime se naglašava opravdanost korišćenja elektrofilterskog pepela kao supstituenta prirodnih sirovina u sirovinskoj mešavini za sintezu portland-cementnog klinkera.

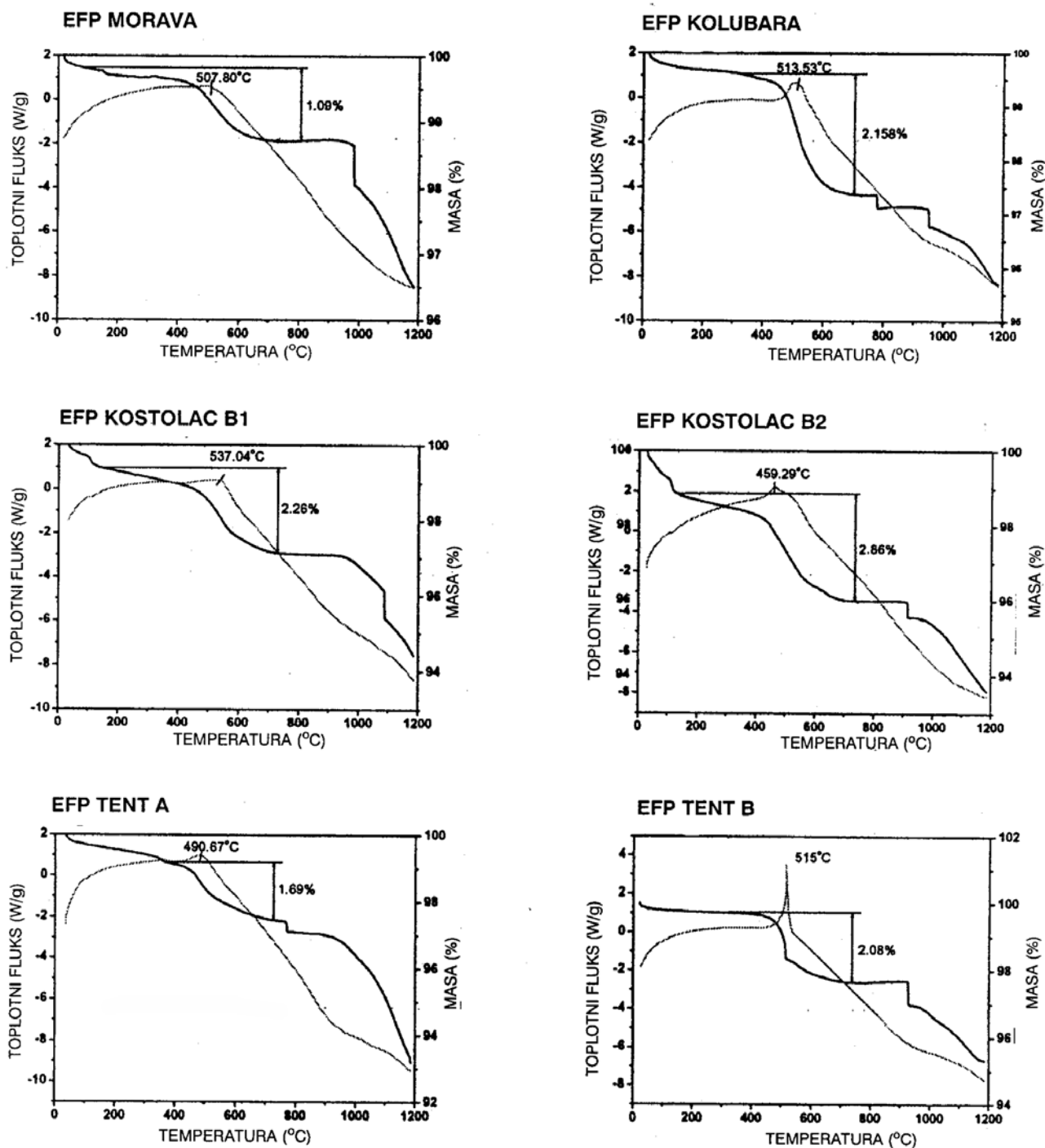
## Termička analiza

### Termogravimetrijska i diferencijalno-termička analiza

Rezultati simultane termičke analize dati su na slici 3.

Termogravimetrijska analiza ukazuje da kod svih ispitivanih uzoraka elektrofilterskog pepela dolazi do značajnijeg gubitka mase na oko 500°C, što je praćeno odgovarajućim egzotermnim pikom na DTA krivoj. Ovaj

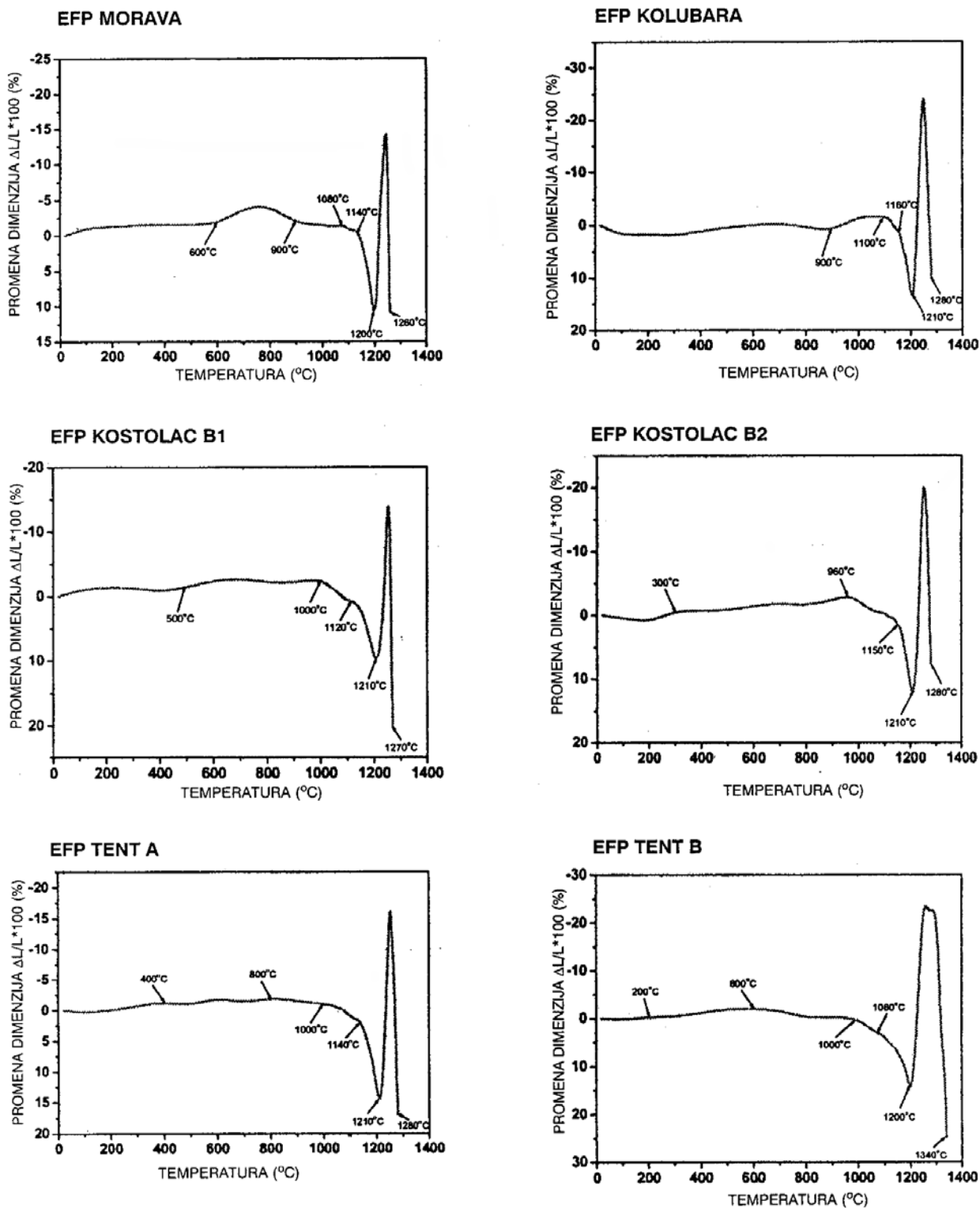
gubitak mase, kao i prisustvo egzoternog pika, ukazuju da na toj temperaturi dolazi do sagorevanja zaostalih, nesagorelih čestica uglja. Egzotermni pik na oko 500°C je najizraženiji u slučaju uzorka EFP "TENT B". Položaj ovog pika, kod različitih uzoraka elektrofilterskog pepela, nalazi se u temperaturnom opsegu od 459°C (EFP "Kostolac B2") do 537°C (EFP "Kostolac B1").



Slika 3. Diferencijalno-termička analiza i termogravimetrijska analiza uzoraka elektrofilterskog pepela  
Figure 3. DTA and TG curves of the fly ash samples

Prisustvo nesagorelih čestica uglja u elektrofilter-skom pepelu predstavlja dodatnu povoljnu okolnost, jer bi se korišćenjem elektrofilterskog pepela u sirovinskoj mešavini unosila i manja količina gorivog materijala, što bi, u krajnjoj liniji, moglo da dovede i do izvesnog smanjenja utroška potrebne energije za proces sintrovanja.

Na DTA krivama ispitivanih uzoraka elektrofilter-skog pepela u intervalu do 1200°C nisu uočeni drugi egzotermni pikovi, koji bi eventualno odgovarali nastanku novih mineralnih faza tokom zagrevanja i sintrovanja.



Slika 4. Promene dimenzija uzoraka elektrofilterskog pepela tokom zagrevanja  
Figure 4. Change of dimension of the fly ash samples

Tabela 4. Termičke karakteristike uzoraka elektrofilterskog pepela  
Table 4. Thermal characteristics of the fly ash samples

Oznaka uzorka	Temperatura (°C)				
	Značajnije širenje	Početno skupljanje	Intenzivno skupljanje	Tačka omekšavanja	Tačka topljenja
EFP "Morava"	600–900	1080–1140	1140–1200	1200	1260
EFP "Kolubara"	900–1100	1100–1160	1160–1210	1210	1280
EFP "Kostolac B1"	500–1000	1000–1120	1120–1210	1210	1270
EFP "Kostolac B2"	300–960	960–1150	1150–1210	1210	1280
EFP "TENT A"	400–800	1000–1140	1140–1210	1210	1280
EFP "TENT B"	200–600	1000–1080	1080–1200	1200	1340

### Termomikroskopska analiza

Rezultati termičke karakterizacije uzoraka elektrofilterskog pepela dati su na slici 4 i u tabeli 4. Na osnovu predstavljenih podataka može se uočiti da intenzivno skupljanje kod ispitivanih uzoraka elektrofilterskog pepela započinje u temperaturnom intervalu od 1080°C (EFP "TENT B") do 1160°C (EFP "Kolubara"). Pri tome, za sve ispitivane uzorke tačka omekšavanja se kreće u sasvim malom rasponu od 1200 do 1210°C. Tačka topljenja se takođe kreće u malom rasponu od 1260 do 1280°C, osim u slučaju elektrofilterskog pepela EFP "TENT B" kada ona iznosi 1340°C. Ovo je veoma važno, jer iako među ispitivanim uzorcima postoje određene razlike u pogledu fizičkih, hemijskih i mineraloških karakteristika, oni su u pogledu termičkih karakteristika veoma slični.

Ovi podaci su takođe veoma važni za ocenu da li je elektrofilterski pepeo moguće koristiti kao sirovinu za proizvodnju portland-cementnog klinkera. Naime, standardna mešavina za proizvodnju portland-cementnog klinkera se peče, odnosno sinteruje, na temperaturi od oko 1450–1500°C, u prisustvu tečne faze, kada jednim delom već dođe do topljenja sirovinske mešavine. Sinterovanjem u prisustvu tečne faze se svakako ubrzava reakcija i postiže homogeniji mineralni sastav proizvoda, kao i njegove ujednačenije karakteristike. Kako ispitivani uzorci elektrofilterskog pepela počinju da se tope na znatno nižim temperaturama, to bi značilo da njihovo korišćenje, kao jedne od komponenti sirovinske mešavine, može da ima pozitivan uticaj na raniju pojavu tečne faze, a samim tim i na sniženje temperature sinterovanja [7]. Dakle, za ispitivane uzorke elektrofilterskog pepela interval sinterovanja u prisustvu tečne faze, započinje od tačke omekšavanja, odnosno sa prvom pojavom tečne faze. Intenzivnija reakcija, odnosno veća brzina sinterovanja može da se očekuje između tačke omekšavanja (1200–1210°C) i tačke topljenja (1260–1340°C), odnosno u intervalu temperatura gde dolazi do intenzivnije pojave tečne faze.

Iz rezultata termičke karakterizacije uzoraka elektrofilterskog pepela može se zaključiti da svi ispitivani uzorci elektrofilterskog pepela ne samo da mogu da se koriste za supstituciju standardnih, prirodnih komponenti u sirovinskoj mešavini, već da bi njihovo korišćenje

imalo uticaja i na sniženje temperature sinterovanja portland-cementnog klinkera, odnosno na uštedu energije.

### ZAKLJUČAK

Rezultati fizičke, hemijske, mineraloške i termičke karakterizacije uzoraka elektrofilterskog pepela iz više termoelektrana u Srbiji ukazuju na mogućnost njihovog korišćenja kao sirovinske komponente za sintezu portland-cementnog klinkera. Korišćenjem ovih otpadnih materijala za sintezu portland-cementnog klinkera može se izvršiti zamena i ušteda prirodnih neobnovljivih sirovina. Takođe, na osnovu rezultata termičke analize, može se zaključiti da bi upotreba elektrofilterskog pepela dovela i do značajnih energetskih ušteda. Korišćenje elektrofilterskog pepela kao sekundarne sirovine takođe može značajno doprineti održivom razvoju u industriji građevinskih materijala i poboljšanju ekološke situacije u našoj zemlji.

**Napomena:** Istraživanja prezentovana u ovom radu, predstavljaju deo rezultata istraživanja u okviru projekta TR6720B, pod naslovom: "Razvoj novih vrsta hidrauličnih veziva na bazi elektrofilterskog pepela termoelektrana", koji finansiraju Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije, kao i JP "Elektroprivreda Srbije", u okviru programa tehnološkog razvoja.

### LITERATURA

- [1] <http://www.eps.co.yu/ekologija/zastita.htm>
- [2] M. Ilic, C. Cheeseman, C. Sollars, J. Knight, Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash, *Fuel* **82** (2003) 331–336
- [3] J.I. Bhatti, J. Gajda, F.M. Miller, "Commercial Demonstration of High-Carbon Fly Ash Technology in Cement Manufacturing", 2003 International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, <http://www.flyash.info/index.html>
- [4] Kuen-Sheng Wang, Kae-Long Lin, Zuh-Quia Huang, Hydraulic Activity of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash-slag-Blended Eco-cement, *Cement and Concrete Research* **31** (2001) 91–103
- [5] T. Okuda, Y. Isihara, Y. Aoyagi, Manufacturing a New Type of Compound Cement Using Limestone and Coal Ash as Main Raw Material, Review of the 42nd general meeting. Technical session. Tokyo, Cement Association of Japan, (1988) 46–49
- [6] A.K. Mullick, K. Mohan, S.K. Handoo, S. Kumar, Use of Fly Ash as a Component of Raw Mix for Cement Manufacture, *Cimento ve Beton Dunyasi* **4**, **23** (2000) 31–42

- [7] M.K. Mukherjee, S.B. Hegde, R.A. Somani, Burnability Improvement and Raw Mix Optimization by Addition of Fly Ash, *Zement Kalk Gips* 55, 2 (2002) 76–79
- [8] N. Jovanović, A. Rosić, Lj. Kandić, M. Komljenović, Lj. Petrašinović–Stojkanović, Z. Baščarević, M. Ršumović, X-Ray Diffraction Analysis of Ordinary Portland Cement Clinker Based on Fly Ash, The Seventh Yugoslav Materials Research Society Conference YUCOMAT 2005, 12–16th September 2005, Herceg Novi, The Book of Abstracts pp.157
- [9] M. Aineto, A. Acosta, J. Ma Rincon, M. Romero, Production of Lightweight Aggregates from Coal Gasification Fly Ash and Slag, 2005 International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, <http://www.flyash.info/index.html>
- [10] E. Mulder: A mixture of fly ashes as road base construction material, *Waste Management* 16 (1–3) (1996) 15–20
- [11] L. Barbieri, I. Lancellotti, T. Manfredini and G.C. Pellacani, J. Ma. Rincon and M. Romero, Nucleation and Crystallization of New Glasses from Fly Ash Originating from Thermal Power Plants, *Journal of the American Ceramic Society* 84, 8 (2001) 1851–1858
- [12] C. Leroy, M.C. Ferro, R.C.C. Monteiro, M.H.V. Fernandes, Production of glass–ceramics from coal ashes, *Journal of the European Ceramic Society* 21 (2001) 195–202
- [13] K. Dana, J. Dey, S. K. Das, Synergistic effect of fly ash and blast furnace slag on the mechanical strength of traditional porcelain tiles, *Ceramics International* 31 (2005) 147–152
- [14] A. Olgun, Y. Erdogan, Y. Ayhan, B. Zeybek, Development of ceramic tiles from coal fly ash and tincal ore waste, *Ceramics International* 31 (2005) 153–158
- [15] Z. Baščarević, Lj. Petrašinović–Stojkanović, M. Komljenović, J. Bossert, P. Obradović, Utilization of Fly Ash in Dense Ceramic Composites: Ecotechnological and Economical Benefits, The Seventh Yugoslav Materials Research Society Conference YUCOMAT 2005, 12–16th September 2005, Herceg Novi, The Book of Abstracts p.132
- [16] H.A. Foner, T.L. Robl, J.C. Hower, U.M. Graham, Characterization of fly ash from Israel with reference to its possible utilization, *Fuel* 78 (1999) 215–223
- [17] A. Acosta, M. Aineto, I. Iglesias, M. Romero, J.Ma. Rincon, Physico–chemical characterization of slag waste coming from GICC thermal power plant, *Materials Letters* 50 (2001) 246–250

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF FLY ASH PROPERTIES WITH PURPOSE OF ITS UTILIZATION AS A SECONDARY RAW MATERIAL FOR PORTLAND CEMENT CLINKER PRODUCTION

(Professional paper)

Zvezdana Baščarević<sup>1</sup>, Miroslav Komljenović<sup>1</sup>, Ljiljana Petrašinović–Stojkanović<sup>1</sup>, Nataša Jovanović<sup>1</sup>, Aleksandra Rosić<sup>2</sup>, Mihailo Ršumović<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Center for Multidisciplinary Studies, University of Belgrade, Kneza Višeslava 1, 11000 Belgrade, Serbia

<sup>2</sup>Faculty of Mining and Geology, Djušina 7, 11000 Belgrade, Serbia

<sup>3</sup>Highway Institute, Kumodraška 257, 11000 Belgrade, Serbia

In this paper the results of the investigated properties of fly ash from four thermal power plants in Serbia are presented. The physical, chemical, mineralogical and thermal characterization of fly ash was carried out, in order to determine the possibility to utilize this material in the building materials industry, foremost in the cement industry. It was determined that, although there are differences concerning the physical, chemical, and mineralogical characteristics of the investigated samples, they are very similar concerning their thermal characteristics. It was concluded that using fly ash as one of the raw components in the mixture for Portland cement clinker synthesis, not only enables the substitution of natural resources, but it might have a positive effect on the lowering of the sintering temperature.

Key words: Fly ash • Characterization • Thermal properties •

Ključne reči: Elektrofilterski pepeo • Karakterizacija • Termička svojstva •