

N. JOVANOVIĆ<sup>1</sup>  
M. KOMLJENOVIĆ<sup>1</sup>  
LJ. PETRAŠINOVIĆ–  
STOJKANOVIĆ<sup>1</sup>  
Z. BAŠČAREVIĆ<sup>1</sup>  
V. BRADIĆ<sup>1</sup>  
A. ROSIĆ<sup>2</sup>

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

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

NAUČNI RAD

66.046.59:666.9.022.2:666.942 +  
+543:553

## SUPSTITUCIJA GLINOVITE MINERALNE KOMPONENTE LIGNITSKIM ELEKTROFILTERSKIM PEPELOM PRI SINTEZI PORTLAND–CEMENTNOG KLINKERA

*Elektrofilterski pepeo iz četiri termoelektrane u Srbiji (TE "Morava" – Svilajnac, TE "Kolubara" – Veliki Crižani, TE "Kostolac" blok B1 i B2 – Kostolac i TE "Nikola Tesla" blok A i B – Obrenovac) upotrebljen je kao polazna komponenta za sintezu portland–cementnog klinkera. Kao druge dve polazne komponente upotrebljeni su krečnjak i kvarcni pesak iz fabrike cementa "Holcim–Srbija, a.d.". Na bazi hemijskog sastava polaznih komponenti, kao i zadatih cementnih modula, izračunato je njihovo učešće u sirovinskim mešavinama. Pripremljeno je šest različitih sirovinskih mešavina – svaka se sastojala iz krečnjaka, peska i različitog elektrofilterskog pepela. Kao referentni materijal korišćena je sirovska mešavina iz industrijske proizvodnje fabrike cementa "Holcim–Srbija, a.d.". Pripremljene sirovinske mešavine sinterovane su u laboratorijskoj peći na 1400°C. Sintetizovani klinkeri analizirani su u pogledu hemijskog i mineralnog sastava. Karakteristike sintetizovanih klinkera na bazi elektrofilterskog pepela, upoređene su sa karakteristikama industrijskog portland–cementnog klinkera iz fabrike cementa "Holcim–Srbija, a.d.". Rezultati istraživanja pokazali su da je elektrofilterski pepeo iz termoelektrana Srbije pogodan za dobijanje portland–cementnog klinkera.*

Razvoj ekološke svesti na globalnom nivou doprineo je povećanju zabrinutosti čovečanstva nad pitanjem sopstvenog opstanka. Entuzijazam izazvan tehnološkim napretkom dvadesetog veka splasnio je pred nizom neželjenih posledica koje su doprinele progresivnoj degradaciji biosfere i ekosistema i intenzivnom smanjivanju neobnovljivih mineralnih sirovina. Istraživanja mogućnosti prerade i iskorišćenja otpadnih materijala predmet su brojnih studija širom sveta.

Ogromne količine elektrofilterskog pepela, koje nastaju sagorevanjem uglja u termoelektranama, predstavljaju, kako u svetu, tako i u Srbiji, ozbiljan ekonomski i ekološki problem. Količine pepela koje se godišnje deponuju mere se u milionima tona. Velika pažnja naučne javnosti posvećena je upravo istraživanju mogućnosti primene elektrofilterskog pepela za proizvodnju građevinskih materijala. Zahvaljujući pucolanskim svojstvima elektrofilterski pepeo je najpre našao primenu u industriji cementa, kao pucolanski dodatak portland–cementu [1–7]. Količine pepela koje se na ovaj način konzumiraju su nedovoljne za trajno rešavanje problema deponija pepela. U nekim zemljama velike količine pepela upotrebljavaju se za puteve, kao frakcija u nosećim slojevima [8,9]. Postoje podaci o izradi građevinskih opeka na bazi elektrofilterskog pepela [10,11]. Pepeo se takođe može upotrebiti i kao sirovska komponenta za sintezu različitih silikatnih materijala, na primer mulitne keramike, staklo–keramike i keramičkih pločica [12–14]. Takođe su

interesantni podaci o upotrebi pepela za stabilizaciju i očvršćavanje industrijskog otpada [15,16].

Po svom hemijskom sastavu elektrofilterski pepeo je sličan glinovitom materijalu koji se u fabrikama cementa koristi kao jedna od sirovinskih komponenti za proizvodnju portland–cementnog klinkera. Rezultati nekih istraživanja ukazuju da se zamenom glinovite komponente elektrofilterskim pepelom u procesu dobijanja portland–cementnog klinkera postiže bolje pečenje klinkera, a zatim i bolja hidraulična svojstva ovako dobijenog cementa [17–24].

Za ocenu kvaliteta cementnog klinkera koriste se cementni parametri ili cementni moduli. Najvažniji cementni modul je **stepen zasićenja – SZ**, koji predstavlja odnos između stvarno vezane količine kalcijum–oksida (CaO) i teorijski maksimalne količine kalcijum–oksida koju mogu vezati kiseli oksidi (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), prisutni u sirovinskoj mešavini. Poznat je još pod imenom krečni standard. Ostali, takođe važni, cementni moduli su **silikatni modul – SM** i **aluminatni modul – AM**. Vrednost silikatnog modula predstavlja odnos SiO<sub>2</sub> i zbira Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i pokazuje odnos sadržaja minerala kalcijum–silikata i minerala topitelja (kalcijum–aluminata i kalcijum–alumoferita) u klinkeru. Vrednost aluminatnog modula je odnos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i pokazuje odnos sadržaja kalcijum–aluminata i kalcijum–alumoferita.

U većini fabrika cementa u svetu vrednost ovih modula se kontroliše tako da se njihove vrednosti u klinkeru kreću u sledećim okvirima: stepen zasićenja od 92 do 98%; silikatni modul od 2,0 do 3,0 i aluminatni modul od 1,00 do 4,00 [25]. U fabrici cementa "Holcim–Srbija, a.d." vrednosti ovih modula se u idealnom slučaju nalaze u sledećim opsezima: stepen zasićenja od 93 do 102; silikatni modul od 2,45 do 2,60 i aluminatni modul od 1,80 do 2,25.

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.

Proračun sastava sirovinskih mešavina za proizvodnju portland-cementnog klinkera na bazi elektrofilterskog pepela predstavljen u ovom radu, izvršen je na osnovu sledećih, prethodno zadatih vrednosti za cementne module, koji su uobičajeni u fabrici cementa "Holcim-Srbija, a.d.":

$$SZ = 98\%$$

$$SM = 2,6$$

Upotreba pepela na ovaj način je nesumnjivo poželjna, kako sa ekološkog aspekta, tako i sa aspekta očuvanja kvalitetnih prirodnih mineralnih sirovina, čije nemilosrdno trošenje u eri tehnološkog razvoja neminovno dovodi do njihove deficitarnosti.

Količine pepela koje nastaju radom termoelektrana u Srbiji, prema procenama, iznose oko  $8 \cdot 10^6$  tona godišnje [26]. Rezultati naših prethodnih istraživanja o mogućnosti primene elektrofilterskog pepela iz termoelektrane kao sirovinske komponente za proizvodnju cementa pokazali su da je upotreba elektrofilterskog pepela u ove svrhe moguća [27,28]. U nastavku istraživanja u ovom pravcu, ispitivanja su proširena na elektrofilterski pepeo iz više termoelektrana u Srbiji.

## 2. EKSPERIMENTALNI DEO

### 2.1. Materijali i metode

Polazne komponente koje su korišćene za pripremu sirovinskih mešavina za dobijanje portland-cementnog klinkera su elektrofilterski pepeli:

ITE "Morava" – Svilajnac

IIITE "Kolubara" – Veliki Crljani

IIIITE "Kostolac" B1 – Kostolac

IVITE "Kostolac" B2 – Kostolac

VITE "Nikola Tesla", TENT A – Obrenovac

VITE "Nikola Tesla", TENT B – Obrenovac,

kao i krečnjak i kvarcni pesak iz fabrike cementa "Holcim-Srbija, a.d.".

Rezultati detaljnih ispitivanja fizičkih, hemijskih, mineraloških i termičkih karakteristika elektrofilterskih pepela, dati su u radu [29]. Na osnovu hemijskog sastava polaznih komponenti, kao i zadatih cementnih modula, pripremljeno je šest različitih sirovinskih mešavina na bazi šest uzoraka elektrofilterskog pepela (oznake Sml,

SmlII, SmlIII, SmlIV, SmlV i SmlVI). Kao referentni materijal korišćena je sirovinska mešavina iz industrijskog pogona fabrike cementa "Holcim-Srbija, a.d." (označena kao Sm 0), koja je pripremljena na bazi laporca, krečnjaka i kvarcnog peska.

Hemijska analiza sirovinskih mešavina izvršena je prema grupi standarda JUS B.H8.359-369 (1973), koji predstavljaju važeće standarde iz oblasti rudarstva i minerala.

Pripremljene sirovinske mešavine su homogenizovane u laboratorijskom mlinu sa keramičkim kuglama, u trajanju od 60 minuta. Presovanjem pod pritiskom od 15 MRa, od svake mešavine su pripremljene tablete. Tablete su sinterovane u komornoj laboratorijskoj peći "Elektron" na temperaturi od  $1400^{\circ}\text{C}$  u periodu od 60 minuta, pri čemu je brzina zagrevanja iznosila oko  $25^{\circ}\text{C}$  u minuti. Sintetizovani klinkeri, označeni kao KI, KII, KIII, KIV, KV i KVI (respektivno prema odgovarajućim sirovinskim mešavinama), spontano su hladjeni u peći do temperature od oko  $1000^{\circ}\text{C}$ , a zatim su vađeni iz peći i naglo hladjeni na vazduhu. Ohlađeni uzorci sintetizovanih klinkera spraseni su u keramičkom avanu, a zatim je izvršena hemijska i mineraloška analiza.

Hemijska analiza sintetizovanih portland-cementnih klinkera izvršena je prema standardu JUS EN 196-2:1995.

Mineraloška analiza sintetizovanih portland-cementnih klinkera izvršena je difraktometrom za prah PHILIPS PW1710, pod istim uslovima datim u radu [29]. Za kvantitativnu analizu sintetizovanih ekocementnih klinkera, kao i referentnog portland-cementnog klinkera, korišćeni su sledeći referentni pikovi prisutnih mineralnih faza:

– trikalcijum-silikat –	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ( $\text{C}_3\text{S}$ )	$d = 3.03 \text{ \AA}$
– dikalcijum-silikat –	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ( $\text{C}_2\text{S}$ )	$d = 2.88 \text{ \AA}$
– trikalcijum-aluminat –	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ( $\text{C}_3\text{A}$ )	$d = 2.70 \text{ \AA}$
– tetrakalcijum-alumoforit –	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF)	$d = 2.64 \text{ \AA}$
– slobodan kalcijum-oksidi –	CaO	$d = 2.40 \text{ \AA}$

### 2.2. Rezultati i diskusija

#### 2.2.1. Polazne komponente i sirovinske mešavine

##### 2.2.1.1. Hemijski sastav polaznih komponenti i proračun sirovinskih mešavina

Tabela 1. Hemijski sastav polaznih komponenti (maseni %)

Table 1. The chemical composition of the starting raw components (mass.%)

Hemijski sastav	Elektrofilterski pepeo						Krečnjak	Kvarcni pesak
	I	II	III	IV	V	VI		
SiO <sub>2</sub>	55.23	62.13	46.85	45.56	48.71	54.26	1.10	93.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.43	17.20	23.20	22.90	24.60	24.90	0.70	1.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.42	5.95	12.14	13.66	6.81	6.50	0.22	0.85
CaO	7.94	5.67	8.26	8.93	8.92	6.34	52.90	2.15
MgO	2.61	2.00	2.77	2.68	2.83	1.89	0.46	–
SO <sub>3</sub>	0.81	0.67	1.48	1.79	1.00	2.51	0.08	–
Gubit. žar.	1.66	2.88	4.44	3.34	4.38	2.06	43.07	0.71
Ukupno	97.10	96.50	99.10	98.87	97.21	98.49	98.57	98.96

Tabela 2. Proračun sastava sirovinske mešavine na osnovu klasičnih hemijskih analiza komponenti  
Table 2. The chemical composition of the raw mixtures and their moduli

	Komponente sirovinske mešavine							
	Krečnjak	EFP Svilajnac	EFP Kolubara	EFP Kostolac B1	EFP Kostolac B2	EFP TENT A	EFP TENT B	Kvarcni pesak
Moduli za pojedine komponente								
SM	1,20	1,91	2,68	1,33	1,25	1,55	1,73	34,59
AM	3,18	2,89	2,89	1,91	1,68	3,61	3,83	2,18
Proračun mešavine iz tri komponente (krečnjak, EFP i kvarcni pesak)								
Zadata vred- nost modula	Izračunati moduli u sirovinskoj mešavini							
		SM <sub>3</sub> I	SM <sub>3</sub> II	SM <sub>3</sub> III	SM <sub>3</sub> IV	SM <sub>3</sub> V	SM <sub>3</sub> VI	
SZ = 98		97	96	98	98	98	98	
SM = 2,60		2,59	2,60	2,60	2,60	2,58	2,60	
AM		2,90	2,92	2,05	1,84	3,48	3,66	
Oznaka mešavine	Učešće komponenti u sirovinskoj mešavini (maseni %)							
SM <sub>3</sub> I	79,78	15,48						4,74
SM <sub>3</sub> II	79,64		19,61					0,75
SM <sub>3</sub> III	79,87			12,45				7,68
SM <sub>3</sub> IV	79,86				12,04			8,10
SM <sub>3</sub> V	79,48					13,99		6,53
SM <sub>3</sub> VI	80,28						14,06	5,66

Tabela 3. Hemijski sastav sirovinskih mešavina (maseni %) i njihovi moduli  
Table 3. The chemical composition of the clinkers and their moduli

Hemijski sastav	Oznaka sirovinske mešavine						
	Sm I	Sm II	Sm III	Sm IV	Sm V	Sm VI	Sm 0
SiO <sub>2</sub>	13,66	13,55	13,59	13,20	13,35	13,43	13,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,82	4,02	3,43	3,20	4,11	4,20	3,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,27	1,19	1,66	1,74	1,09	1,81	1,41
CaO	43,07	43,17	43,35	43,57	43,22	43,27	41,88
MgO	0,72	0,71	0,67	0,66	0,73	0,73	1,71
SO <sub>3</sub>	0,26	0,28	0,42	0,40	0,61	0,31	0,54
Gub. žarenjem	34,38	34,76	34,63	34,46	34,76	34,75	35,06
Ukupno	97,44	97,92	97,85	97,33	98,08	98,72	98,18
Moduli sirovinskih mešavina							
SZ (%)	98,80	99,40	100,40	104,10	100,60	100,00	95,30
SM	2,69	2,60	2,67	2,67	2,55	2,54	2,66
AM	3,00	3,39	2,07	1,83	3,70	3,84	2,66

Iz podataka prikazanih u tabeli 3 može se videti da pripremljene sirovinske mešavine pokazuju zadovoljavajuće slaganje sa referentnom sirovinskom smešom u pogledu hemijskog sastava i vrednosti kontrolisanih modula. Ovo se, pre svega, odnosi na vrednosti stepena zasićenja i silikatnog modula. Aluminatni modul kod komponovanih mešavina pokazuje značajnija odstupanja od referentne mešavine, što je razumljivo, jer ovim proračunom aluminatni modul nije kontrolisan.

## 2.2.2. Portland-cementni klinkeri

### 2.2.2.1. Hemijski sastav

Rezultati hemijske analize sintetizovanih portland-cementnih klinkera, kao i njihovi izračunati moduli, dati

su u tabeli 4. Kao referentni uzorak korišćen je uzorak portland-cementnog klinkera industrijski proizveden u pogonu fabrike "Holcim-Srbija, a.d." (označen sa K0).

Sintetizovani klinkeri na bazi elektrofilterskog pepela ne pokazuju značajnije razlike u odnosu na referentni industrijski klinker, kako u pogledu hemijskog sastava, tako i pogledu kontrolisanih modula.

Vrednosti stepena zasićenja kod svih klinkera pokazuju dobro slaganje sa zadatom vrednošću (98%). Najnižu vrednost stepena zasićenja pokazuje klinker KI (96,62%), a najvišu klinker KII (100,44%), dok kod referentnog klinkera stepen zasićenja iznosi 95,38%. Stepenski zasićenja kod svih klinkera kreću se u opsegu vrednosti koje, prema podacima iz fabrike cementa "Holcim-Srbija, a.d." predstavljaju veoma dobar klinker.

Tabela 4. Hemijski sastav klinkera (maseni %) i njihovi moduli

Table 4. Quantitative analysis of the mineralogical phases present in the synthesized clinkers and the reference industrial clinker

Hemijski sastav	Oznaka klinkera						
	KI	KII	KIII	KIV	KV	KVI	KO
SiO <sub>2</sub>	20,90	21,63	21,44	21,10	21,44	21,58	20,88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,40	6,70	6,34	6,37	6,60	6,36	6,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,38	2,03	2,75	2,80	2,28	2,27	2,74
CaO	67,91	67,43	67,29	67,63	67,12	67,29	64,23
MgO	0,72	0,90	0,84	1,08	1,04	0,96	3,01
SO <sub>3</sub>	0,38	0,38	0,39	0,39	0,64	0,39	1,20
Gubitak žar.	0,94	0,72	0,71	0,61	0,61	0,58	0,34
Ukupno	99,63	99,79	99,76	99,98	99,73	99,43	98,41
Slob. CaO	3,77	3,71	5,56	3,68	4,32	4,32	0,23
Moduli							
SZ (%)	100,44	96,62	97,10	98,95	96,85	96,95	98,18
SM	2,38	2,48	2,36	2,30	2,41	2,50	2,38
AM	2,68	3,30	2,31	2,28	2,21	2,80	2,19

Vrednosti silikatnog modula kod svih klinkera pokazuju dobro slaganje sa zadatom vrednošću (2,60). Najnižu vrednost silikatnog modula pokazuje klinker KIV (2,30), a najvišu klinker KV (2,50), dok je kod referentnog klinkera silikatni modul 2,38. Kao što se može uočiti, vrednosti ovog modula variraju kod ispitivanih klinkera (u odnosu na zadatu vrednost), ali se mogu smatrati zadovoljavajućim.

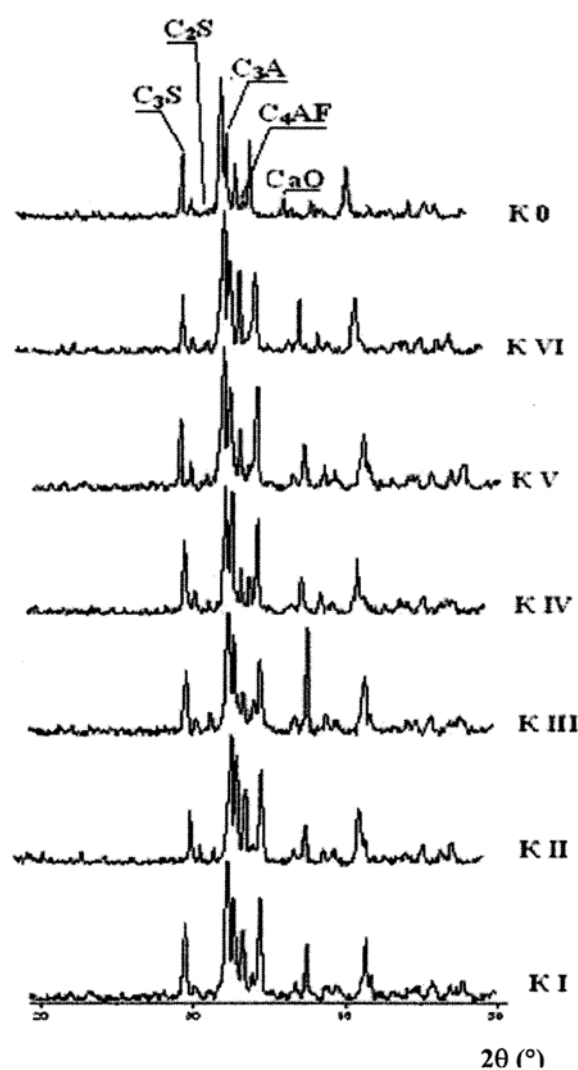
Aluminatni modul je kod skoro svih klinkera (sa izuzetkom KV i industrijskog klinkera) nešto povećan. Najnižu vrednost ovog modula pokazuje industrijski klinker (2,19), a najvišu klinker KII (3,30). Kao što je već prokomentarisano, vrednost aluminatnog modula u ovim eksperimentima nije kontrolisana.

Međutim, sadržaj slobodnog SaO veći je kod svih klinkera na bazi elektrofilterskog pepela (kreče se u rasponu od 3,71 do 5,56%), u odnosu na industrijski klinker kod koga sadržaj slobodnog SaO iznosi 0,23%. Ovo je verovatno posledica različitih uslova sinteze. Naime, laboratorijski klinkeri su sintetizovani, kako je već rečeno, na temperaturi od 1400oC, dok je referentni klinker dobijen u industrijskim uslovima na temperaturi od oko 1450°C.

Takođe, nešto veća vrednost za MgO kod industrijskog klinkera verovatno je povezana sa malim sadržajem dolomita u krečnjaku od koga je pripremljena sirovinska mešavina za dobijanje ovog klinkera. U industrijskim uslovima sirovinska mešavina za proizvodnju cementa priprema se od nisko-kvalitetnog krečnjaka u pogledu hemijskog sastava, što podrazumeva relativno visok sadržaj MgO u ovom krečnjaku (i do preko 3%). Za ispitivanja u ovom radu korišćen je visoko-kvalitetni krečnjak, sa veoma niskim sadržajem MgO (0,46%).

#### 2.2.2.2. Mineraloških sastav

Mineraloški sastav sintetizovanih klinkera, kao i referentnog klinkera, određen je rendgenskom difrakcionom analizom. Rendgenski difraktogrami sintetizovanih klinkera prikazani su na slici 1.



Slika 1. Rendgenski difraktogrami klinkera sintetizovanih na bazi elektrofilterskog pepela i referentnog industrijskog klinkera

Figure 1. XRD patterns of the synthesized clinkers based on the fly ash and reference industrial clinker

Tabela 5. Kvantitativna analiza mineralnih faza u sintetizovanim klinkerima i referentnom klinkeru (maseni %)  
Table 5.

Mineralni sastav	Oznaka klinkera						
	KI	KII	KIII	KIV	KV	KVI	KO
C <sub>3</sub> S	57	46	48	51	59	44	55
C <sub>2</sub> S	24	26	26	23	21	26	17
C <sub>3</sub> A	11	13	6	7	11	14	10
C <sub>4</sub> AF	10	9	12	14	8	7	9
Slob. CaO	4	3	7	3	3	4	2

Na svim difraktogramima karakteristično je pojavljivanje pikova u oblasti  $2\theta$  od 28 do 34°. U ovoj oblasti preklapaju se najintenzivnije refleksije minerala cementnog klinkera, što se bez izuzetka uočava kod svih sintetizovanih klinkera. Kod svih uzoraka identifikovane su mineralne faze portland-cementnog klinkera, odnosno trikalcijum-silikat, dikalcijum-silikat, trikalcijum-aluminat i tetraalkalijum-alumoforit. Na difraktogramima se takođe može uočiti i difrakcioni maksimum slobodnog kalcijum-oksida, koji je najizraženiji kod klinkera KIII, što je u skladu sa hemijskom analizom ovog uzorka.

Rezultati kvantitativne mineraloške analize su dati u tabeli 5.

Na osnovu rezultata predstavljenih u tabeli 5 može se zaključiti da se u svim sintetizovanim klinkerima (KI – KVI) učešće C<sub>3</sub>S kreće od 44–59% (masenih), u odnosu na 55% kod referentnog klinkera. Učešće C<sub>2</sub>S faze se kod sintetizovanih klinkera kreće od 21–26%, odnosno 17% kod referentnog klinkera. Udeo trikalcijum-aluminata je od 6–14% a u referentnom uzorku 10%, dok je udeo tetraalkalijum-alumoferita od 7–14% (u referentnom uzorku 9%).

Slobodan SaO je takođe prisutan u svim slučajevima (3–7% u odnosu na referentnih 2%).

### 3. ZAKLJUČAK

Za sintezu klinkera korišćeno je šest uzoraka elektrofilterskog pepela uzetog sa različitih lokacija: TE "Morava" – Svilajnac, TE "Kolubara" – Veliki Crljani, TE "Kostolac" blok B1 i B2 – Kostolac, TE "Nikola Tesla", blok A i B – Obrenovac. Druge dve polazne komponente za pripremu sirovinskih mešavina su krečnjak i kvarcni pesak iz fabrike cementa "Holcim-Srbija, a.d".

Na osnovu rezultata ispitivanja hemijskog sastava polaznih sirovina za sintezu portland-cementnog klinkera, kao i unapred zadatih cementnih modula, izvršen je proračun sastava sirovinskih mešavina za sintezu portland-cementnog klinkera. Na bazi izvršenog proračuna, pripremljeno je šest sirovinskih mešavina. Rezultati hemijske analize, kao i izračunati cementni moduli, pokazali su zadovoljavajuće slaganje sa odgovarajućim vrednostima referentne sirovinske mešavine (iz industrijskog pogona fabrike cementa "Holcim-Srbija, a.d").

Od sirovinskih mešavina na bazi elektrofilterskog pepela u laboratorijskim uslovima sintetizovani su portland-cementni klinkeri, koji su analizirani hemijski i mineraloški.

Zaključeno je da se sintetizovani klinkeri na bazi elektrofilterskog pepela termoelektrana, po svom hemijskom i mineralnom sastavu, veoma malo razlikuju od referentnog portland-cementnog klinkera dobijenog u industrijskim uslovima fabrike cementa "Holcim-Srbija, a.d". Na ovaj način je dokazano da je u laboratorijskim uslovima moguće dobiti portland-cementni klinker zadovoljavajućih karakteristika na bazi ispitivanih uzoraka elektrofilterskog pepela termoelektrana u Srbiji.

**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. Autori se posebno zahvaljuju fabrici cementa "Holcim-Srbija, a.d", za pruženu pomoć tokom realizacije ovih istraživanja.

### LITERATURA

- [1] F. Massazza, Pozzolan Cement, Cement and Concrete Research, **15** (4) (1993) 185–214
- [2] M.I. Sanchez de Rojas, M. Frias, The Pozzolan Activity of Different Materials, its Influence on the Hydration Heat in Mortars, Cement and Concrete Research **26** (1996) 203–213
- [3] X. Pu, Investigation on Pozzolan Effect of Mineral Additives in Cement and Concrete by Specific Strength Index, Cement and Concrete Research **29** (1999) 951–955
- [4] P.K. Mehta, The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-products in Concrete, Proc. CANMET/ACI First International Conference in Montebello, SP-79, vol. 1, 1983, American Concrete Institute, Detroit.
- [5] I. Elkhadiri, A. Diouri, A. Boukhari, J. Aride, F. Puertas, Mechanical Behavior of Various Mortars Made by Combined Fly Ash and Limestone in Moroccan Portland Cement, Cement and Concrete Research **32** (2002) 1597–1603
- [6] G.C. Isaia, A.L.G. Gastaldini, R. Morales, Physical and Pozzolan Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High-Performance Concrete, Cement and Concrete Composites, **25** (2003) 69–76.
- [7] F. Canpolat, K. Yilmaz, M.M. Kose, M.Sumer, M.A. Yurudev, Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement in Cement Production, Cement and Concrete Research **34** (2004) 731–735
- [8] E. Mulder, A Mixture of Fly Ashes as Road Base Construction Material, Waste Management, **16** (1–3) (1996) 15–20
- [9] D.J. White, K.L. Bergeson, Long-Term Strength and Durability of Hydrated Fly Ash Road Bases, Geology and Properties of Earth Materials 2001 Transportation Research record 1755 (2001) 151–159
- [10] T. Fath, A. Umit, Utilization of Fly Ash in Manufacturing of Building Bricks, International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper 13, 2001, www.flyash.info.

- [11] K. Freidin, E. Erell: "Bricks Made of Coal Fly Ash and Slag, Cured in the Open Air", *Cement and Concrete Composites* **17** (1995) 289–300
- [12] J.S. Jung, H.C. Park, Mullite Ceramics Derived From Coal Fly Ash, *Journal of Materials Science Letters*, **20** (2001) 1089–1091
- [13] M. Ferraris, M. Salvo, F. Smeacetto, L. Augier, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, Glas matrix composites from solid waste materials, *Journal of European Ceramic Society* **21** (2001) 453–460
- [14] 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 pp. 132
- [15] D. Dermetas, X. Meng, Utilization of Fly Ash for Stabilization/Solidification of Heavy Metal Contaminated Soils, *Engineering Geology* **70** (2003) 377–394
- [16] J. Sheng, Vitrification of Borate Waste From Nuclear Power Plant Using Coal Fly Ash (I) Glass Formulation Development, *Fuel* **80** (2001) 1365–1369
- [17] H.C. Nielsen, Alstec; F.L. Smidth, Preparation of Cement Using Fly Ash, *Ciments, Betons, Plâtres, Chaux* **1** (1981) 36–41
- [18] H.E. Borgholm, Reducing Environmental Pollution by Using Fly Ash as a Raw Meal Component, *Zement Kalk Gips* **45** (4) (1992) 163–165; 168–170
- [19] H.E. Borgholm, P.E. Nielson, Start-up at Aalborg (Denmark) of the World's Semi-dry Route Furnace, *Ciments, Betons, Plâtres, Chaux*, **4** (79) (1989) 236–240
- [20] J.S. Damtoft, Use of Fly Ash and Other Waste Materials as Raw Feed And Energy Source in the Danish Cement Industry, *CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry*, ACI, 1998, 95–105
- [21] T. Mori, Features of Coal Storage and Coal Ash Treatment Systems for Large Scale Coal-Fired Power Generation At EPDC's Takehara Thermal Power Station, No.3 Extension Unit, Proceedings of the 6th International Conference on Coal Research, National Board, London, 1982, 705–725
- [22] Y. Erel, A. Matthews, Y. Nathan, Potential Use of Coal Ash in The Israel Cement Industry, *Cement and Concrete Research*, **18** (1988) 503–512
- [23] A. Puri, M. Georgescu, Fly Ash – A Raw Material for Cement Production, *Zement Kalk Gips* **45** (12) (1992) 657–660
- [24] J. Majling, D.M. Roy, The Potential of Fly Ash for Cement Manufacture, *American Ceramic Society Bulletin*, **72** (10) (1993) 77–80
- [25] P.-H. Shih, J.-E. Chang, H.-C. Lu, L.-C. Chiang, Reuse of Heavy Metal-Containing Sludges in Cement Production, *Cement and Concrete Research* **35** (2005) 2110–2115
- [26] M.B. Tošić, V.D. Živanović, J.D. Nikolić, Z.M. Žbogar, D.M. Kisić, Mogućnost korišćenja pepela iz TE "Nikola Tesla" kao sirovine za dobijanje staklokeramičkih materijala, Međunarodna konferencija ELECTRA II ISO 14000 – Upravljanje zaštitom životne sredine u Elektroprivredi, 2002, 363–367, Tara, 10.–14. jun, Srbija i Crna Gora
- [27] N. Jovanović, A. Rosić, Lj. Petrašinović–Stojkanović, B. Živanović, M. Komljenović, G. Branković, Proučavanje mogućnosti sinteze portland-cementnog klinkera sa elektrofilterskim pepelom kao sirovinskom komponentom, *Materijali i konstrukcije* 2003, 3–6
- [28] 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, Seventh Annual Conference of the Yugoslav Materials Research Society, 12–16th September, Herceg Novi, 2005.
- [29] Z. Baščarević, M. Komljenović, Lj. Petrašinović–Stojkanović, N. Jovanović, A. Rosić i M. Ršumović, Ispitivanje svojstava elektrofilterskog pepela termoelektrana u cilju njegove upotrebe kao sekundarne sirovine za proizvodnju portland cementnog klinkera, *Hemijska industrija* **60** (9–10) (2006) (u štampi).

## ABSTRACT

### SUBSTITUTION OF THE CLAY-LIKE MINERAL COMPONENT BY LIGNITE FLY ASH IN PORTLAND CEMENT CLINKER SYNTHESIS

(Scientific paper)

N. Jovanović<sup>1</sup>, M. Komljenović<sup>1</sup>, Lj. Petrašinović–Stojkanović<sup>1</sup>, Z. Baščarević<sup>1</sup>, V. Bradić<sup>1</sup>, A. Rosić<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Fly ash from four power plants in Serbia (PP "Morava" – Svilajnac, PP "Kolubara" – Veliki Crljani, PP "Kostolac" – units B1 and B2 – Kostolac and PP "Nikola Tesla" – units A and B – Obrenovac) was utilized as the starting raw component for Portland cement clinker synthesis. Limestone and quartz sand from the "Holcim – Serbia, a.d." cement factory were the other two starting raw components. Based on the chemical composition of the raw components and from the projected cement moduli, the amounts of raw components in raw mixtures were calculated. Six different the raw mixtures were prepared – each one consisted of limestone, sand and different fly ash. A raw mixture from the industrial production of the "Holcim – Serbia, a.d." cement factory was used as the reference material. The prepared raw mixtures were sintered in a laboratory furnace at 1400°C. The chemical and mineralogical compositions of the synthesized clinkers were determined. The characteristics of clinkers, based on fly ash, were compared to the characteristics of the the industrial Portland cement clinker from the "Holcim – Serbia, a.d." cement factory. The results of the investigation showed that fly ash from power plants in Serbia can be suitable for Portland cement clinker synthesis.

Key words: Fly ash • Raw mixture • Portland cement clinker • Mineralogical analysis •

Ključne reči: Elektrofilterski pepeo • Sirovinska mešavina • Portland-cementni klinker • Mineraloška analiza •

