

SVOJSTVA PEPELA KOJI NASTAJE SAGOREVANJEM LIGNITA U DOMAĆIM TERMOELEKTRANAMA ZNAČAJNA ZA PRIMENU U INDUSTRIJI GRAĐEVINSKOG MATERIJALA

**FLY ASH PROPERTIES FROM LIGNITE COMBUSTION IN DOMESTIC POWER
PLANTS IMPORTANT FOR USE IN BUILDING MATERIALS INDUSTRY**

Nikola KARLIČIĆ,

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, nkarlicic@mas.bg.ac.rs,

Miroslav STANOJEVIĆ,

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, mstanojevic@mas.bg.ac.rs,

Dejan RADIĆ

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, dradic@mas.bg.ac.rs,

Miloš BAJIĆ

Privredno društvo „Termoelektrane Nikola Tesla“ d.o.o. Obrenovac, milos.bajic@tent.rs,

U termoelektranama Javnog preduzeća „Elektroprivreda Srbije“ (JP EPS) nastaju velike količine pepela iz procesa sagorevanja ugljeva niskog kvaliteta (lignita Kolubara i Kostolac). Najveći deo nastalog pepela se izdvaja iz dimnih gasova prečišćavanjem u elektrofiltrima (EF pepeo). Prema postojećim rešenjima EF pepeo se odlaže na deponije u blizini termoelektrana i predstavlja konstantan izvor zagađenja životne sredine.

Elektrofiltrarski pepeo se kao nusproizvod sagorevanja uglja u termoelektranama više od 50 godina u Evropi koristi kao građevinski materijal, posebno u proizvodnji betona i cementa. Novi sistem otpepeljivanja, koji je delom uveden u termoelektrane JP EPS, omogućio je da se pepeo isporučuje za upotrebu u industriji građevinskog materijala. Korišćenjem EF pepela postiže se dvostruka korist, jer se radi o vezivnom materijalu u interakciji sa cementom, a ostvaruje se znatna ušteda u potrošnji cementa, odnosno energije potrebne za njegovu proizvodnju.

Da bi EF pepeo bio kvalitetan građevinski materijal i da bi se mogao naći na tržištu, mora imati određene fizičko-hemijske karakteristike u skladu sa međunarodnim standardima, kojima se definiše njegova upotreba. Iz tog razloga je neophodno da se u termoelektranama stvore uslovi za izdvajanje pepela odgovarajućeg kvaliteta za upotrebu u građevinskoj industriji. Na osnovu obavljenih istraživanja, u radu su predstavljene fizičko-hemijske karakteristike pepela iz TENT-B, kako bi se utvrdila mogućnost upotrebe u industriji cementa

Ključne reči: leteći pepeo; cement; lignit; termoelektrana; industrija građevinskog materijala;

In Electric Power Industry of Serbia (JP EPS) thermal power plants huge amount of ash is being generated in low rank coal combustion process (lignites Kolubara and Kostolac). The greatest amount of fly ash is removed from the stack gas in Electrostatic Precipitators (ESP fly ash). According to existing solutions ESP fly ash is disposed to landfills near thermal power plants and this is constant source of environmental pollution.

ESP fly ash as byproduct of coal combustion in thermal power plants is used for more than 50 years as building material in Europe, especially in concrete and cement industry. New fly ash handling system, which is partially introduced to JP EPS thermal power plants, has allowed delivery of fly ash for building materials industry. There is double benefit using fly ash, since it is binding material when interacting with cement, and there are significant savings in cement consumption, that is savings in energy required in cement production.

In order to have gotten into the market and to be used as a high quality building material, ESP fly ash must fulfill specific physical and chemical requirements according to international standards which define fly ash usage. This is a reason for thermal power plants to implement appropriate fly ash handling system to ensure its quality for building industry. According to conducted studies, physical and chemical properties of fly ash from TENT-B are presented, to determine possibility of using it in cement industry.

Keywords: fly ash; cement; lignite; thermal power plant; building industry;

I. Uvod

Upotreba uglja u proizvodnji električne energije dovodi do stvaranja velike količine letećeg pepela. U skladu sa savremenim dostignućima industrije i građevinarstva, sve prisutnijim trendom organizovanog korišćenja otpadnog materijala i podizanjem nivoa ekološke svesti, deponije pepela se mogu tretirati kao tehnogena ležišta, gde deponovani pepeo i šljaka predstavljaju tehnogene nemetalične mineralne sirovine. Ove sirovine su danas pronašle svoju primenu u više različitih industrijskih grana.

Različite vrste uglja i različiti kotlovi koji se koriste u ovom procesu dovode do stvaranja različitih vrsta letećeg pepela, sa pucolanskim i/ili latentnim hidrauličkim svojstvima. Elektrofiltarski pepeo se, kao nusproizvod sagorevanja uglja u termoelektranama, više od 50 godina u Evropi koristi kao građevinski materijal, u cementnoj industriji, za podlogu puteva, u proizvodnji raznih vrsta betona, u industriji keramike itd. Pre upotrebe leteći pepeo mora biti podvrgnut izvesnim procesima obrade, kao što su na primer klasifikacija, selekcija, prosejavanje, sušenje, mešanje, drobljenje ili smanjivanje ugljenika kako bi se optimalizovala njegova finoća, smanjila njegova potreba za vodom ili kako bi se poboljšale druge karakteristike. Korišćenje pepela ima višestruku korist jer se radi o vezivnom materijalu u interakciji sa cementom, povećava se kvalitet cementa, betona i same gradnje, a ostvaruje se znatna ušteda u potrošnji cementa, odnosno energije potrebne za njegovu proizvodnju.

U Republici Srbiji se godišnje proizvede preko šest miliona tona pepela, a vrlo se mala količina iskorišti u građevinarstvu i cementnoj industriji. Na osnovu obavljenih istraživanja, u radu su predstavljene fizičko-hemijske karakteristike pepela iz termoelektrane „Nikola Tesla B“ (TENT-B), kako bi se utvrdila mogućnost upotrebe u industriji cementa.

II. Materijali i metode

U termoelektranama Javnog preduzeća „Elektroprivreda Srbije“ (JP EPS) nastaju velike količine pepela iz procesa sagorevanja ugljeva niskog kvaliteta (lignita Kolubara i Kostolac). Ispitivanja čiji su rezultati prikazani u radu su vršena na uzorcima iz TENT-B. Za potrebe TENT-B, uglj se dovozi vozovima iz kolubarskog basena. Godišnje potrebe uglja, za rad blokova TENT-B (2×620 MW) iznose oko 12 miliona tona, što zavisi od kvaliteta uglja i vremena angažovanja blokova. Kvalitet uglja za TENT-B kreće se od 5000 do 9000 kJ/kg. Podaci o kvalitetu uglja koji se sagoreva u TENT-B prema podacima iz Glavnog projekta sistema za transport i deponovanje pepela i šljake su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Količina pepela i šljake iz jednog bloka prema podacima iz Glavnog projekta sistema za transport i deponovanje pepela i šljake (april 1980.)

	<i>Jedinica</i>	<i>Garantovano gorivo</i>	<i>Lošije gorivo</i>
Donja toplotna moć uglja	kJ/kg	6698	5861
Potrošnja uglja	t/h	875	1000
Sadržaj pepela u uglju	%	19,900	155,26
Količina pepela	t/h	162,75	223,2

Osnovne karakteristike uglja Kolubara prema [5] date su u tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike uglja kolubara*

Karakteristika uglja	Jedinica	Ugalj		
		Projektni	Srednji	Lošiji
Vlaga	%	47,8	49,2	44,5
Pepeo	%	19,0	18,5	26,9
Ugljenik	%	20,9	19,8	18,2
Vodonik	%	2,05	2,1	2,0
Ukupni sumpor	%	0,5	0,42	0,47
Azot + kiseonik	%	10,1	10,2	8,1
Donja toplotna moć	kJ/kg	6699	6608	6018

Na blokovima B1 i B2 u TENT-B uveden je novi sistem transporta šljake i pepela. Transport pepela se vrši do silosa udaljenih oko 700 m. Za pneumatski transport pepela jedan blok ima 2 transportne linije kapaciteta od po 129 t/h. Pri radu blokova sa ugljem lošijeg kvaliteta i niže toplotne moći povećava se količina pepela.

Najveći deo nastalog pepela se izdvaja iz dimnih gasova prečišćavanjem u elektrofiltrima (EF pepeo). Prema postojećim rešenjima pepeo i šljaka iz procesa sagorevanja uglja se odlazu na deponije u blizini termoelektrana i predstavljaju konstantan izvor zagađenja životne sredine. Novi sistem otpeljelivanja, koji je delom uveden u termoelektrane JP EPS, omogućio je da se pepeo isporučuje za upotrebu u industriji građevinskog materijala.

Program ispitivanja obuhvatio je ukupno 64 uzorka pepela iz pet serija. Uzorkovanje pepela je vršeno u periodu oktobar 2011. – septembar 2012. godine. Uzorci za ispitivanje su uzeti iz kanala dimnih gasova (KDG), zagrejača vazduha (LUV), elektrofiltra (EF), kao i mešavine pepela iz uređaja za pneumatski transport.

Ispitivanja karakteristika pepela su obavljena u Laboratoriji za procesnu tehniku na Mašinskom fakultetu u Beogradu i u laboratoriji FC Lafarge u Beočinu. Laboratorijska ispitivanja fizičko-hemijskih karakteristika pepela obuhvatila su određivanje nasipne gustine u rastresitom stanju, nasipne gustine u zbijenom stanju, granulometrijskog sastava, srednjeg prečnika zrna, fizičke gustine, poroznosti sloja u rastresitom stanju, poroznosti sloja u zbijenom stanju i hemijskog sastava.

Granulometrijski sastav je određen prema standardima SRPS ISO 2591-1:1992, SRPS ISO 9276-1:1994 i SRPS ISO 565:1994, zapremnska gustina prema SRPS CEN/TS 15103:2009, SRPS EN 1236:2009, SRPS EN 15103:2011, SRPS EN 725-9:2010, SRPS EN ISO 7837:2010, a zapremnska gustina u zbijenom stanju prema SRPS EN 1237:2009, SRPS EN 725-8:2010.

Za sve uzorke određena je nasipna (zapremnska) gustina i nasipna gustina u zbijenom stanju. Nasipna gustina odmah po nasipanju sloja označena je sa $\rho_{\varepsilon 0}$ (kg/m³). Nasipna gustina u zbijenom stanju određena je posle protresanja sloja u trajanju od 30 sekundi (označena sa $\rho_{\varepsilon 0,30}$) i posle protresanja sloja u trajanju od 60 sekundi (označena sa $\rho_{\varepsilon 0,60}$).

Za određivanje nasipne gustine i nasipne gustine u zbijenom stanju korišćena je staklena cilindrična posuda zapremine 1 dm³ i odgovarajući uređaj za zbijanje (slika 1).



a)



b)

Slika 1 Aparatura za određivanje
a) nasipne (zapreminske) gustine
b) nasipne gustine u zbijenom stanju

Poroznost sloja u rastresitom i zbijenom stanju određena je na osnovu podataka o nasipnoj i stvarnoj gustini pepela:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{\varepsilon_0}}{\rho_s},$$

gde su:

ρ_{ε_0} ,kg/m³, nasipna gustina pepela u rastresitom stanju

ρ_s ,kg/m³, stvarna gustina pepela, i

$$\varepsilon_{0,60} = 1 - \frac{\rho_{\varepsilon_0,60}}{\rho_s}$$

gde je:

$\rho_{\varepsilon_0,60}$,kg/m³, nasipna gustina pepela u zbijenom stanju.

Za određivanje granulometrijskog sastava pepela korišćen je komplet od više laboratorijskih sita sa veličinom otvora od 600, 400, 315, 200, 125 i 75 μm .

Za svaku frakciju određen je maseni udeo u kompletnom materijalu:

$$a_i = \frac{F_i}{Q_f} \cdot 100 = \frac{F_i}{\sum_{i=0}^n F_i} \cdot 100 \quad [\%]$$

gde su:

F_i , g, masa frakcije,

$Q_f = \sum F_i$, g, ukupna masa svih frakcija.

Na osnovu podataka o granulometrijskom sastavu uzoraka pepela određeni su srednji prečnici pojedinačnih uzoraka po serijama. Srednji prečnik pojedine frakcije određen je kao aritmetička sredina dimenzija otvora gornjeg i donjeg sita te frakcije. Dimenzija otvora gornjeg sita i -te frakcije označena je sa d_{i+1} , a donjeg sita sa d_i . pa je prema tome srednji prečnik i -te frakcije $d_{sr,i}$:

$$d_{sr,i} = \frac{d_{i+1} + d_i}{2} \quad [\mu\text{m}] \quad d_{sr,i} = \frac{d_{i+1} + d_i}{2} \quad , \mu\text{m},$$

Srednji prečnik za kompletan ispitivani uzorak određen je na osnovu sledećeg izraza:

$$d_{sr} = \frac{\sum_{i=0}^n d_{sr,i} \cdot a_i}{\sum_{i=0}^n a_i} \quad [\mu\text{m}]$$

gde je:

a_i - maseni udeo frakcije uzražen u %.

Stvarna gustina i hemijski sastav su određeni u BFC Lafarde prema internim standardima.

III. Rezultati

Program ispitivanja obuhvatio je ukupno 64 uzorka pepela. Ispitivanjima su određene sledeće fizičko-hemijske karakteristike pepela: nasipna (zapreminska) gustina i nasipna gustina u zbijenom stanju, stvarna (fizička) gustina pepela, poroznost nasutog sloja pepela u rastresitom i zbijenom stanju, hemijski sastav (oksidni sastav, sadržaj kvarca i sadržaj amorfnе faze), granulometrijski sastav (sitovna analiza), srednji prečnik zrna. Rezultati dobijeni laboratorijskim ispitivanjima prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati laboratorijskih ispitivanja za sve uzorke

Naziv	Oznaka	Jedinica	Brojna vrednost
Nasipna (zapreminska) gustina	ρ_{e0}	kg/m ³	559 ÷ 1097
Nasipna gustina u zbijenom stanju	$\rho_{e0,30}$	kg/m ³	629 ÷ 1240
Nasipna gustina u zbijenom stanju	$\rho_{e0,60}$	kg/m ³	636 ÷ 1242
Stvarna (fizička) gustina	ρ_s	kg/m ³	1500 ÷ 2490
Srednji prečnik	d_{sr}	μm	95 ÷ 290
Poroznost nasutog sloja	ε_0	-	0,56 ÷ 0,67
Poroznost sloja u zbijenom stanju	$\varepsilon_{0,60}$	-	0,49 ÷ 0,61
Kvarc	-	%	10 ÷ 70
Amorfna faza	-	%	18 ÷ 70
Gubitak žarenjem	GŽ	%	1,54 ÷ 5,27
Silicijum dioksid	SiO ₂	%	52,3 ÷ 65,5
Aluminijum oksid	Al ₂ O ₃	%	18,6 ÷ 26,9
Gvožđe(III) oksid	Fe ₂ O ₃	%	4,6 ÷ 6,5
Kalcijum oksid	CaO	%	2,7 ÷ 7,3
Magnezijum oksid	MgO	%	1,3 ÷ 2,6
Fosfor(V) oksid	P ₂ O ₅	%	0,04 ÷ 0,067
Sumpor trioksid	SO ₃	%	0,15 ÷ 0,51
Kalijum oksid	K ₂ O	%	1,15 ÷ 1,56
Natrijum oksid	Na ₂ O	%	0,07 ÷ 0,276
Titanijum dioksid	TiO ₂	%	0,649 ÷ 0,852
Hrom(III) oksid	Cr ₂ O ₃	%	0,037 ÷ 0,049
Mangan(III) oksid	Mn ₂ O ₃	%	0,056 ÷ 0,108
Cink oksid	ZnO	%	0,001 ÷ 0,01
Stroncijum oksid	SrO	%	0,019 ÷ 0,041

IV. Diskusija

U radu su analizirane karakteristike pepela i uglja koje imaju uticaj na mogućnost korišćenja EF pepela u industriji građevinskog materijala kao što su nasipna gustina, stvarna gustina, poroznost nasutog sloja, granulometrijski sastav i hemijski sastav. Na osnovu nekoliko serija ispitivanja uzoraka pepela, iz procesa sagorevanja u kotlovima TENT-B, utvrđeno je da je pepeo promenljiv po krupnoći i fizičko-hemijskom sastavu, odnosno da svi parametri nisu jednoznačno određeni zbog uzoraka pepela koji su heterogeni i po krupnoći i po fizičko-hemijskom sastavu.

Leteći pepeo se smatra pucolanskim materijalom jer sadrže silicijum-dioksid i aluminijum-oksidi. Pri hidrataciji kalcijum silikata oslobađa se kalcijum-hidroksid i reaguje sa silicijum-dioksidom. U toj reakciji nastaje kalcijum silikat hidrat, čija je uloga da svež beton pretvori u čvrstu masu.

Leteći pepeo ima hidrofilnu površinu i izuzetno je porozan, a reaktivnost u najvećoj meri određuje veličina čestica. Uglavnom su sitne čestice reaktivnije iz dva razloga. Kao prvo, manje čestice imaju veću specifičnu površinu za kontakt sa hidroksidima, a drugi razlog je da se manje čestice, nakon izlaska iz kotla, brže hlade, što utiče na neuređenu, a samim tim reaktivniju strukturu.

Iz prikazanih podataka za nasipnu (zapreminsku) gustinu, stvarnu (fizičku) gustinu i srednji prečnik svih uzoraka (u koje su uključeni i uzorci iz kanala dimnog gasa - KDG pepela) može se konstatovati sledeće:

- nasipna (zapreminska) gustina (ρ_e) je u oblasti od 559 do 1097 kg/m³, za 56 % uzoraka je od 600 do 700 kg/m³,

- stvarna (fizička) gustina (ρ_s) je u oblasti od 1500 do 2490 kg/m³, a za 50 % uzoraka je od 1700 do 1900 kg/m³,

- srednji prečnik (d_{sr}) je u oblasti od 95 do 290 μ m, za 56 % uzoraka je od 100 do 200 μ m.

Kvalitet elektrofilterskog pepela i šljake na osnovu hemijskog sastava je veoma neujednačen, različit, jer ugallj od koga se proizvodi električna energija nije homogenizovan (zavisi od vrste uglja, prisustva jalovine i drugih neorganskih komponenti).

Prema američkom standardu ASTM C618 leteći pepeo, koje nastaju u procesu sagorevanja uglja, se klasifikuje u dve grupe, tip F i tip C. Tip F (kiseo) nastaje pri sagorevanju antracita i bituminoznih ugljeva sa niskim sadržajem kalcijum-oksida (< 7%) i sa povećanim sadržajem silicijum-dioksida, aluminijum-oksida i oksida gvožđa. Tip C (alkalni) nastaje pri sagorevanju lignita i sarži veću količinu kalcijum-oksida (od 15 do 30%). Iako se radi o lignita, EF pepeo iz TENT-B sadrži velike količine Si i Al jedinjenja i prema ASTM C618 standardu se svrstava sa niskim sadržajem kalcijum-oksida, odnosno u klasu F.

Prema SRPS EN 197-1 standardu, elektrofilterski pepeo je dodatak koji se koristi pri proizvodnji cementa. Pepeo koji se koristi po prirodi može biti silikatno-aluminatni ili silikatno-kalcijumski. Silikatno-aluminatni ima pucolanske, a silikatno-kalcijumski hidraulične osobine. Gubitak žarenjem kod obe grupe pepela mora biti niži od 5 %.

Prema oba standarda, ASTM C618 i SRPS EN 197-1, EF pepeo se definiše kao materijal koji se dobija elektrostatičkim ili mehaničkim taloženjem praškastih čestica iz dimnih gasova peći u kojima se sagoreva sprasanim ugallj. Pepeo koji se dobije na drugi način ne sme biti upotrebljen za proizvodnju cementa koji odgovara ovim standardima.

V. Zaključak

Prosečna starost termoelektrana u Srbiji oko 30 godina i mnoge su iscrpele svoj proizvodni radni vek. JP EPS u okviru svojih aktivnosti posebnu pažnju posvećuje poboljšanju održavanja, povećanju snage, sanaciji, revitalizaciji i modernizaciji postojećih proizvodnih kapaciteta u cilju povećanja energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti postrojenja termoelektrana. Jedan od preduslova ostvarivanja navedenih ciljeva je snabdevanje termoelektrana ugljem odgovarajućeg kvaliteta.

Prethodna ispitivanja sprovedena na uzorcima elektrofilterskog pepela iz TENT-B pokazala su da pepeo poseduje dobra pucolanska svojstva, što je od bitnog značaja za primenu u cementnoj industriji, da je sadržaj radionuklida i teških metala je veoma nizak, skoro zanemarljiv tako da ne ugrožava prirodnu sredinu i može naći primenu u putnom građevinarstvu, a po osnovu ispitivanih fizičko-mehaničkih karakteristika, vrlo je povoljan materijal za izgradnju objekata u putogradnji, za nasipe, ispune iza objekata, i sl. Uvođenjem novog sistema otpeljevanja u TENT-B, omogućeno je skladištenje suvog EF pepela u silosima i isporuku suvog EF pepela građevinskoj industriji pomoću auto-cisterni. Samo u toku 2011. godine iz TENT-B je isporučeno oko 50.000 t pepela cementarama.

Na osnovu ispitivanja više serija uzoraka, koje je izvršeno u saradnji Mašinskog fakulteta u Beogradu i BFC *Lafarge*, utvđeno je da je EF pepeo iz TENT-B je veoma raznolik u zavisnosti od kvaliteta uglja, režima rada termoelektrane i mnogih drugih parametara. Korišćenje elektrofiltarskog pepela iz TENT B isplativo je i ekološki opravdano iz više razloga. Manje su naknade za odlaganje otpada, ostvaruje se prihod od prodaje pepela, smanjuju se troškovi za transport i odlaganje pepela na deponije, čime se produžava radni vek deponije. Kao najbitiniji razlog se izdvajaju manja eksploatacija prirodnih resursa i smanjenje degradirajućeg uticaja pepela na životnu sredinu.

Da bi EF pepeo bio kvalitetan građevinski materijal, i da bi se mogao naći na tržištu, mora imati određene fizičko-hemijske karakteristike u skladu sa međunarodnim standardima, kojima se definiše njegova upotreba. Iz tog razloga je neophodno da se u termoelektranama stvore uslovi za izdvajanje pepela odgovarajućeg kvaliteta za upotrebu u građevinskoj industriji

VI. Literatura

- [1] *Elaborat sa predlogom mera za povećanje pouzdanosti u radu novog sistema otpeljivanja na blokovima B1 i B2 u TENT D.O.O., Obrenovac*, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2013.
- [2] *Studija Razvoj novih vrsta hidrauličnih veziva na bazi elektrofiltarskog pepela termoelektrana*, Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd, 2008.
- [3] *Studija Pepeli u Srbiji*, Institut IMS, Beograd, 2006.
- [4] **Kisić, D., Miletić, S., Radonjić, V., Radanović S., Filipović, J., Gržetić, I.**, Prirodna radioaktivnost uglja i letećeg pepela u termoelektrani „Nikola Tesla B“, *Hemijska industrija*, 2013, vol. 67, br. 5, str. 729-738
- [5] **Životić, M., Stojilković, D., Jovović, A., Čudić, V.**, Mogućnost korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane „Nikola Tesla“ kao otpada sa upotrebom vrednošću, *Hem. Ind.*, 66, 2013, 3, 403–412
- [6] SRPS EN 197-1, *Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cimente*
- [7] ASTM C618 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*
- [8] SRPS EN 450-1, *Leteći pepeo za beton – Deo 1: Definicije, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti*
- [9] *Pravilnik o kvalitetu cementa*, Sl. glasnik RS, br. 34/2013 i 44/2014
- [10] **Bušatlić, I.**, Ispitivanje kvaliteta elektrofiltarskog pepela TE „Kakanj“ u funkciji njegove upotrebe u industriji, zbornik radova 6. *Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem „Kvalitet 2009“*, Neum, Bosna i Hercegovina, 4-7.6.2009.
- [11] *Upotreba elektrofiltarskog pepela i šljake proizvedenih iz termoenergetskih postrojenja*, Privredna komora Srbije, 2011.