

# SVOJSTVA ELEKTROFILTARSKOG PEPELA IZ TERMoeLEKTRANA ZNAČAJNA ZA RADSISTEMA ZA ODLAGANJE I DEPONOVANJE I NJEGOVU PRIMENU

Nikola Karličić\*, Aleksandar Jovović\*, Dejan Radić\*,  
Marko Obradović\*, Dušan Todorović\*, Miroslav Stanojević\*

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

**Apstrakt:** U termoelektranama u Srbiji kao osnovno gorivo se koristi ugalj sa visokim sadržajem mineralnih materija. Njegovim sagorevanjem nastaju velike količine elektrofiltarskog pepela. Karakteristike elektrofiltarskog pepela predstavljaju osnovu za projektovanje sistema za njegov transport i deponovanje, kao i pokazatelj mogućnosti za njegovu dalju primenu. Sve više termoelektrana prelazi na modernije sisteme pneumatskog transporta i deponovanja elektrofiltarskog pepela, ne samo iz ekoloških razloga, već i zbog velike potražnje za ovom vrstom nusproizvoda. Sve prethodno navedeno određuje pepeo kao proizvod čije je karakteristike neophodno poznavati, a to zahteva konstantna istraživanja i obavljanje detaljnih analiza. U radu su istaknute karakteristike elektrofiltarskog pepela bitne s aspekta odabira adekvatnog sistema za transport i deponovanje, a s druge strane bitne za upotrebu pepela u različitim industrijskim granama. U Laboratoriji za procesnu tehniku na Mašinskom fakultetu u Beogradu je obavljeno ispitivanje nekoliko serija uzoraka pepela iz termoelektrana. Između ostalog, određena je nasipna gustina, stvarna gustina, srednji prečnik čestica, poroznost, minimalna brzina fluidizacije, permeabilnost i hemijski sastav. Takođe, izvršena je klasifikacija na osnovu koje se mogu dobiti određene smernice za izbor i odvijanje pneumatskog transporta.

**Ključne reči:** karakteristike elektrofiltarskog pepela, termoelektrana na ugalj, odlaganje elektrofiltarskog pepela, korišćenje elektrofiltarskog pepela

# CHARACTERISTICS OF FLY ASH FROM THERMAL POWER PLANTS IMPORTANT FOR HANDLING AND STORAGE SYSTEMS DESIGN AND ITS UTILIZATION

**Nikola Karličić<sup>\*</sup>, Aleksandar Jovović<sup>\*</sup>, Dejan Radić<sup>\*</sup>,  
Marko Obradović<sup>\*</sup>, Dušan Todorović<sup>\*</sup>, Miroslav Stanojević<sup>\*</sup>**

*University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, nkarlicic@mas.bg.ac.rs<sup>\*</sup>*

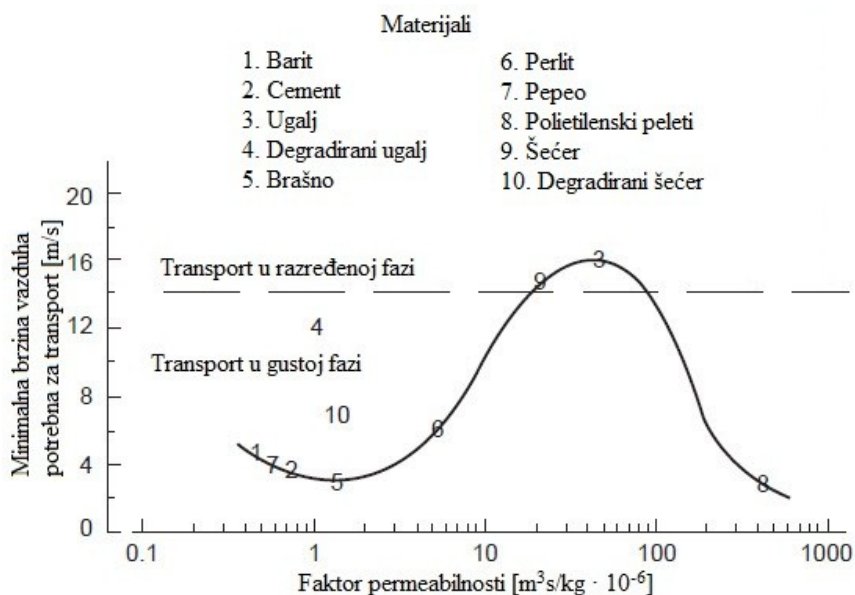
**Abstract:** Power plants in Serbia, based on high mineral contents coal usage, produce huge volumes of fly ash. Variation in coal quality is known to be related to quantities and composition of fly ash that is to be deposited. Fly ash characteristics are the most important precursor to design of handling and storage systems, as well as indicator for many possibilities on different reutilization. More and more thermal power plants are switching to sophisticated pneumatic conveying systems and storing dry fly ash, not only because of environmental aspects, but due to high demands for this kind of by-product. All of the above determines fly ash as a product whose characteristics have to be known, what requires continuous investigations and detailed analysis. This paper attempts to highlight significant fly ash characteristics important from the aspect of selecting adequate and reliable handling systems and utilization of fly ash in various industrial branches. Several trials on series of fly ash samples were carried out in Laboratory for Process Engineering - Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade. Among other analysis it was determined bulk density, particle density, average diameter, porosity, minimum fluidization velocity, permeability and chemical composition. Also, a classification for obtaining guidelines for pneumatic conveying system selection was made.

**Key words:** fly ash properties, coal based thermal power plant, fly ash handling, fly ash utilization

## 1. UVOD

Termoenergetski kapaciteti predstavljaju osnov energetske sistema u Srbiji zbog značajnih resursa uglja. Ulaganjem u nove ili modernizacijom postojećih kapaciteta se očekuje porast proizvodnje električne energije u termoelektranama koje kao gorivo koriste lignit. Srbija ima najveću ukupnu proizvodnju električne energije u regionu, a termoelektrane na ugalj su i dalje osnovni izvor električne energije, pri čemu dominira lignit sa udelom koji dostiže preko 70%. Upotreba uglja u proizvodnji električne energije dovodi do stvaranja velike količine letećeg pepela. U termoelektranama Javnog preduzeća „Elektroprivreda Srbije“ (JP EPS) iz procesa sagorevanja ugljeva niskog kvaliteta (lignita Kolubara i Kostolac), godišnje se proizvede preko šest miliona tona pepela. Najveći deo nastalog pepela se izdvaja iz dimnih gasova prečišćavanjem u elektrofiltrima, takozvani elektrofiltarski ili leteći pepeo. Leteći pepeo predstavlja fino dispergovani produkt sagorevanja uglja iz termoelektrana izdvojen iz dimnih gasova. U pitanju je heterogeni materijal sastavljen iz čestica veličine do 1 mm, različitih hemijskih, fizičkih, mineraloških i morfoloških svojstava. 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 više od 50 godina u Evropi koristi kao građevinski materijal, u cementnoj industriji, za podlogu putev, 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.

David Mills [1] i Mark G Jones [2] su pokušali da na osnovu permeabilnosti odrede pogodnost materijala za neki vid pneumatskog transporta. Na osnovu urađenih testova sa različitim materijalima izvedena je zavisnost permeabilnosti od minimalne srednje brzine vazduha potrebne za transport (slika 1).



Slika 1. Uticaj permeabilnosti na vrstu transporta [1]

Rad je nastao kao rezultat aktivnosti koje su obuhvatale praćenje, evidentiranje i analizu nedostataka i problema u eksploataciji sistema pneumatskog transporta na blokovima B1 i B2 Termoelektrane „Nikola Tesla B“ (TENT-B), a u cilju definisanja preporuka za rad postrojenja u različitim uslovima i predloga izmena, bez promena osnovne koncepcije postrojenja radi povećanja pouzdanosti i optimizacije rada. Predstavljane su karakteristike elektrofiltarskog pepela bitne s aspekta odabira adekvatnog sistema za transport i deponovanje, a s druge strane bitne za upotrebu pepela u različitim industrijskim granama.

## 2. MATERIJALI I METODE

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. Donja toplotna moć uglja se kreće od 5000 do 9000 kJ/kg. Osnovni podaci o kvalitetu uglja Kolubara koji se sagoreva u TENT-B date su u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike uglja Kolubara[3]

Karakteristika	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 i kiseonik	%	10,1	10,2	8,1
Donja toplotna moć	kJ/kg	6699	6608	6018

U Laboratoriji za procesnu tehniku na Mašinskom fakultetu u Beogradu i u saradnji sa fabrikom cementa Lafarge u Beočinu je obavljeno ispitivanje preko 60 uzorakapepela iz TENT-Buzetihu dužem vremenskom periodu. Određena je nasipna gustina, stvarna gustina, srednji prečnik čestica, poroznost, minimalna brzina fluidizacije, permeabilnost i hemijski sastav. Za 12 reprezentativnih uzoraka su prikazani kompletni rezultati, a za ostale uzorke zbirni rezultati za bitne parametare. Takođe, izvršena je klasifikacija na osnovu koje se mogu dobiti određene smernice za izbor i odvijanje pneumatskog transporta.

Analize stvarne gustine i hemijskog sastava pepela izvršila je laboratorija fabrike cementa Lafarge u Beočinu prema internim standardima.

### 2.1 Nasipna gustina

Nasipna gustina odmah po nasipanju sloja označena je sa  $\rho_{\varepsilon,0}$ ,  $\text{kg/m}^3$ . Za određivanje nasipne gustine korišćena je cilindrična staklena posuda zapremine  $1 \text{ dm}^3$ . Uz poznatu masu i zapreminu nasutog materijala, dobija se vrednost nasipne gustine:

$$\rho_{\varepsilon,0} = \frac{m_m}{V}, \text{ kg/m}^3$$

### 2.2 Granulometrijski sastav i srednji prečnik čestica

Za određivanje granulometrijskog sastava korišćeno je više laboratorijskih sita sa različitim nazivnim veličinama otvora 600, 400, 315, 200, 125 i  $75\mu\text{m}$  (slika 2). Za svaku frakciju određen je maseni udeo frakcije u kompletnom materijalu  $a_i$ :

$$a_i = \frac{F_i}{Q_F} \cdot 100 = \frac{F_i}{\sum_{i=0}^n F_i} \cdot 100, \%$$

Na osnovu podataka o granulometrijskom sastavu uzoraka pepela određeni su srednji prečnici pojedinačnih uzoraka. Srednji prečnik pojedine frakcije određen je kao aritmetička sredina dimenzija otvora gornjeg i donjeg sita te frakcije. Srednji prečnik  $i$ -te frakcije je računat prema izrazu  $d_{sr,i}$ :

$$d_{sr,i} = \frac{d_{i+1} + d_i}{2}, g$$



Slika 2. Aparatura za određivanje granulometrijskog sastava pepela pomoću sita

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

$$d_{sr} = \frac{\sum_{i=0}^n d_{sr,i} a_i}{\sum_{i=0}^n a_i}, g$$

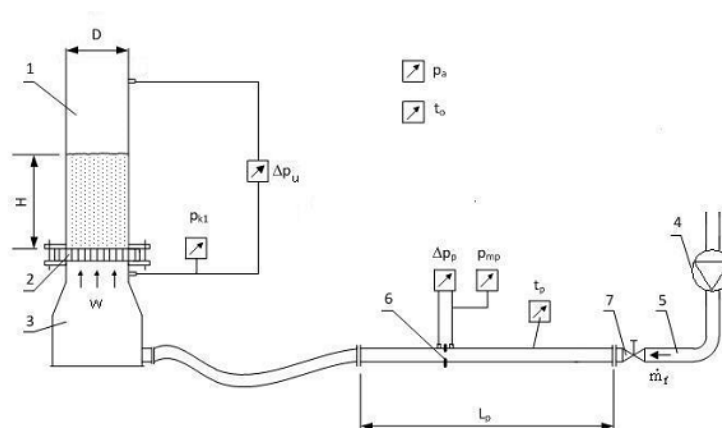
### 2.3 Poroznost

Poroznost nasutog sloja pepela u rastresitom stanju određena je prema izrazu:

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

### 2.4 Fluidizacione karakteristike

Eksperimentalno određivanje parametara potrebnih za definisanje minimalne brzine fluidizacije i permeabilnosti pepela izvedeno je na instalaciji prikazanoj na slici 3.



Slika 3. Šema instalacije za ispitivanja permeabilnosti

1) Kolona od pleksiglasa ( $D = 142$  mm,  $H_C = 1750$  mm); 2) Porozna pregrada; 3) Komora za umirenje struje vazduha; 4) Rotaciona klipna duvaljka ("Ludbreg", tip RP2); 4) Sistem cevi za dovod vazduha; 5) Prigušnica ( $d_p = 11,7$  mm) montirana u pravolinijskom delu cevi ( $D_p = 52,3$  mm,  $L_p = 3$  m), za određivanje protoka vazduha za fluidizaciju; 6) Odgovarajući ventili za regulaciju protoka vazduha.

### 2.5.1 Minimalna brzina fluidizacije

Za sve uzorke određene su zavisnosti jediničnog pada pritiska ( $\Delta p_s/H$ ) kao i ukupnog pada pritiska ( $\Delta p_s$ ) kroz sloj pepela od brzine fluidizacije ( $w$ ). Merenja su vršena u smeru povećanja brzine vazduha, a zatim u smeru smanjenja brzine vazduha kroz sloj. Jedinični pad pritiska ( $\Delta p_s/H$ ) određen je svođenjem ukupnog pada pritiska ( $\Delta p_s$ ) kroz sloj pepela na jedinicu izmerene visine. Brzina vazduha kojim se vrši fluidizacija data je jednačinom:

$$w^* = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f \cdot A}$$

### 2.5.2 Permeabilnost

Permeabilnost pepela određena je za uslove strujanja vazduha kroz sloj pepela pre dostizanja minimalne brzine fluidizacije, prema izrazu:

$$PE = \frac{w^*}{\frac{\Delta p_s}{H}}$$

## 3. REZULTATI

Rezultati granulometrijske analize dati su u tabeli 2, nasipna gustina, stvarna gustina, srednji prečnik čestica, poroznost, minimalne brzine fluidizacije i permeabilnost u tabeli 3, a u tabeli 4 rezultati hemijske analize uzoraka pepela.

Tabela 2 Granulometrijski sastav uzoraka pepela

R.b. uzorka	Granulometrijski sastav, $a_i$ , %						
	> 600 [ $\mu\text{m}$ ]	400 ÷ 600 [ $\mu\text{m}$ ]	315 ÷ 400 [ $\mu\text{m}$ ]	200 ÷ 315 [ $\mu\text{m}$ ]	125 ÷ 200 [ $\mu\text{m}$ ]	75 ÷ 125 [ $\mu\text{m}$ ]	< 75 [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,65	1,25	2,7	10,6	18,75	23,95	42
2	0,45	1,8	5	18,7	31,65	23,2	19,2
3	1,05	2,5	5,1	17,3	21,2	23,55	29,25
4	1,5	6,25	11,35	23,6	20	17,6	19,65
5	9,25	8,55	11	25,05	22	14,45	9,6
6	11,8	10,2	14,55	26,3	21,65	11,35	4,15
7	9,1	7,05	10,6	31,7	22,95	13,3	5,15
8	0,5	1,35	6,1	27,45	38,65	19,65	6,3
9	8,55	14,5	19	36,15	12,2	5,35	4,2
10	4,9	9,35	14,7	31,25	25,9	11,15	2,75
11	1,7	3,1	7,25	33,45	36,2	15,25	3,05
12	9,15	7,95	10,3	28,6	29,1	12,3	2,55

Tabela 3 Vrednosti nasipne gustine, stvarne gustine, poroznosti, srednjeg prečnika čestica, minimalne brzine fluidizacije i permeabilnosti

Veličina	Jedinica	R.b. uzorka											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\rho_{\varepsilon,0}$	kg/m <sup>3</sup>	690,6	594,1	672,7	709,1	607,4	569,6	671,9	617,3	617,5	568,5	683	617,8
$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	1680	1500	1700	1620	1660	1630	1650	1710	1590	1600	1770	1730
$\varepsilon_0$	-	0,59	0,6	0,6	0,56	0,63	0,65	0,59	0,64	0,61	0,64	0,61	0,64
$d_{sr}$	$\mu\text{m}$	117	160	151	199	256	290	262	187	200	263	213	266

$w_1^*$	cm/s	1,37	1,67	1,68	1,68	2,91	2,38	2,57	2,17	2,37	1,94	2,91	3,22
PE	$10^{-6}$ $m^2/(Pa \cdot s)$	3,55	5,85	5,28	5,57	8,08	5,02	8,06	8,14	7,90	5,50	7,13	7,29

Tabela 4 Hemijska analiza uzoraka pepela

Veličina	Jedinica	R.b. uzorka											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kvarc	%	14,79	10,51	17,74	18,79	22,68	11,97	31,85	33,04	22,92	12,17	30,51	26,71
A.F.	%	57,23	54,94	53,62	70,68	45,58	53,19	59,93	71,67	51,48	53,46	57,23	54,94
G.Ž.	%	1,6	2,18	1,97	4,31	5,27	1,77	3,59	2,83	1,86	4,36	1,6	2,18
SiO <sub>2</sub>	%	56,13	55,88	57,06	57,91	60,31	55,85	64,38	64,02	60,44	56,79	65,5	61,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	25,63	26,88	25,08	23,73	23,21	25,76	18,57	21,22	22,85	26,31	20,62	21,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5,86	6,18	5,78	6,15	5,36	6,17	4,59	4,66	5,87	6,21	5,27	4,96
CaO	%	5,27	3,91	5,18	4,54	4,12	3,05	3,17	3,49	2,68	2,77	2,66	3,12
MgO	%	2,02	1,96	1,96	1,9	1,69	1,75	1,3	1,5	1,5	1,75	1,44	1,57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
SO <sub>3</sub>	%	0,36	0,22	0,51	0,29	0,31	0,16	0,2	0,25	0,16	0,15	0,16	0,23
K <sub>2</sub> O	%	1,56	1,5	1,35	1,55	1,35	1,49	1,15	1,44	1,32	1,53	1,24	1,33
Na <sub>2</sub> O	%	0,128	0,07	0,094	0,174	0,138	0,075	0,231	0,276	0,115	0,072	0,171	0,247
TiO <sub>2</sub>	%	0,848	0,797	0,796	0,803	0,775	0,764	0,649	0,793	0,698	0,779	0,661	0,67
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,037	0,04	0,041	0,04	0,042	0,037	0,043	0,049	0,039	0,039	0,045	0,045
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,076	0,061	0,08	0,088	0,071	0,074	0,062	0,061	0,062	0,066	0,065	0,056
ZnO	%	0,01	0,009	0,009	0,01	0,003	0,005	0,001	0,005	0,004	0,006	0,004	0,002
SrO	%	0,03	0,026	0,029	0,029	0,025	0,022	0,021	0,024	0,019	0,02	0,019	0,021

U tabeli 5 je dat opseg rezultata dobijenih laboratorijskim ispitivanjima bitnih parametara za ostale uzorke za koje nisu predstavljena kompletna ispitivanja.

Tabela 5 Rezultati ispitivanja ostalih uzoraka

Veličina	Jedinica	Vrednost
$\rho_{\epsilon,0}$	kg/m <sup>3</sup>	559 ÷ 1097
$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	1500 ÷ 2490
$\epsilon_0$	-	0,56 ÷ 0,67
$d_{sr}$	µm	95 ÷ 290
Kvarc	%	10 ÷ 70
A.F.	%	18 ÷ 70
G.Ž.	%	1,54 ÷ 5,27
SiO <sub>2</sub>	%	52,3 ÷ 65,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18,6 ÷ 26,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,6 ÷ 6,5
CaO	%	2,7 ÷ 7,3
MgO	%	1,3 ÷ 2,6

#### 4. ANALIZA REZULTATA

U radu su analizirane karakteristike pepela koje imaju uticaj kako na odvijanje pneumatskog transporta termoelektrane, tako i na mogućnost korišćenja ovog pepela u različitim industrijskim granama, pre svega u industriji građevinskog materijala. Ispitivanjima velikog broja uzoraka pepela iz TENT-B, utvrđeno je da je pepeo promenljiv po krupnoći i fizičko-hemijskom sastavu, što je značajno za odvijanje procesa fluidizacije i samog pneumatskog transporta.

Na osnovu prikazanih rezultata za nasipnu (zapreminsku) gustinu, stvarnu (fizičku) gustinu i srednji prečnik svih uzoraka (tabela 5) može se konstatovati da se vrednosti nasipne gustine ( $\rho_{\epsilon,0}$ ) kreću u oblasti od 559 do 1097 kg/m<sup>3</sup>. Posmatrajući 12 reprezentativnih uzoraka, može se videti da oko 70% uzoraka ima nasipnu gustinu između 600 i 700 kg/m<sup>3</sup> (tabela 3), što se poklapa i sa podacima dobijenim ispitivanjem većeg broja uzoraka (tabela 5). Stvarna gustina svih uzoraka ( $\rho_s$ ) se nalazi u oblasti od 1500 do 2490 kg/m<sup>3</sup>. 70% od posmatranih 12 uzoraka ima vrednost stvarne gustine između 1600 i 1700 kg/m<sup>3</sup>, a vrednost za oko 65% svih obrađenih uzoraka se kreće

od 1700 do 1900 kg/m<sup>3</sup>. Podaci dobijeni za vrednost srednjeg prečnika ( $d_{sr}$ ) najbolje pokazuju heterogenost uzoraka, jer se kreće u oblasti od 95 do 290  $\mu\text{m}$ , a samo nešto više od 50% uzoraka se može svrstati u kategoriju od 100 do 200  $\mu\text{m}$ .

Ugalj, koji se sagoreva u TENT-B, je nedovoljno homogenizovan, što pokazuje veoma neujednačen hemijski sastav pepela, jer isti zavisi od vrste uglja, prisustva jalovine i drugih neorganskih komponenti. Prema američkom standardu ASTM C618 leteći pepeo, iz procesa sagorevanja uglja, klasifikuje se 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 lignitu, EF pepeo iz TENT-B sadrži velike količine Si i Al jedinjenja i prema ASTM C618 standardu se svrstava u klasu F, odnosno sa niskim sadržajem kalcijum-oksida. Prema SRPS EN 197-1 standardu, elektrofiltarski pepeo je definisan kao 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%.

#### Faktor

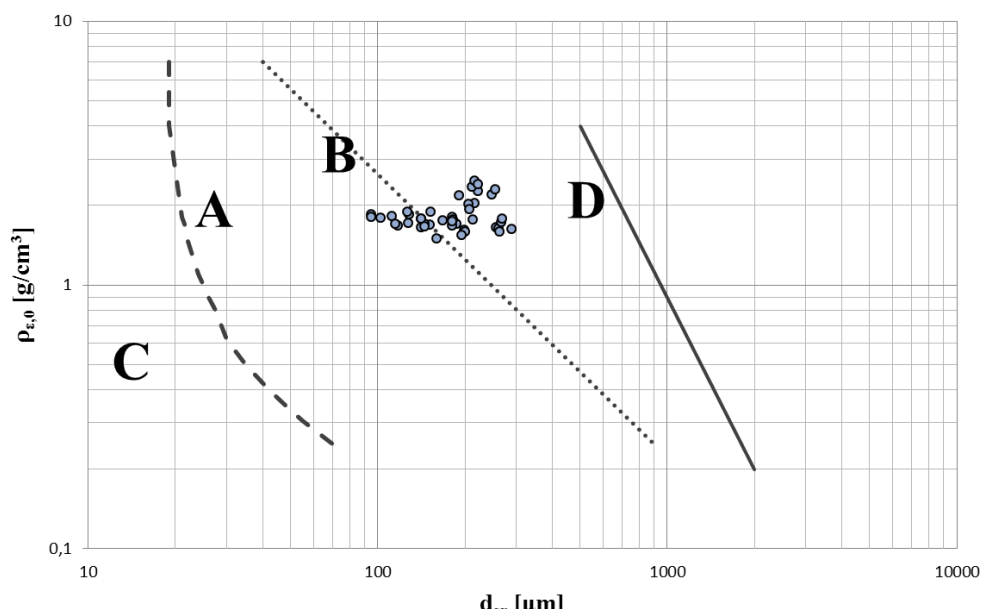
permeabilnost je parametar koji pokazuje propustljivost, odnosno lakoću prostrujavanja sloja sitnozrnasto-gčvrstog materijala. Prihvaćen je kao lako merljiv indikator propustljivosti materijala prema vazduhu i dovodi se u vezu sa performansama pneumatskog transporta kao jedan od bitnih parametara pri izboru vrste pneumatskog transporta nekog materijala. Rezultati koji se dobijaju pri merenju faktora permeabilnosti su veoma pouzdani u pogledu ponovljivosti i proizvode dobre linearne veze.

Pepeo iz TENT-B je promenljiv i po krupnoći i po fizičko-hemijskom sastavu što dovodi do određenih pojava pri fluidizaciji i veoma je značajno za analizu rezultata permeabilnosti i definisanje uslova pneumatskog transporta. Permeabilnost pepela određena je za uslove strujanja vazduha kroz sloj pepela pre dostizanja minimalne brzine fluidizacije. Postoje preporuke da se za materijale koji imaju  $PE = 10^{-5} \div 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$  primenjuje leteći pneumatski transport (transport niske koncentracije čvrste faze do 15 kg čvrste faze/kg vazduha), koji se odvija pri velikim brzinama vazduha (> 12 m/s) uz značajan utrošak energije za transport. Za niže vrednosti permeabilnosti, preporučuje se nesuspendovani (zgusnuti) pneumatski transport (sa koncentracijama čvrste faze većim od 20 kg/kg, i brzinama većim od 3 m/s). Prema dobijenim vrednostima za permeabilnost, može se konstatovati da je ova vrsta pepela više pogodna za nesuspendovani (zgusnuti) vid pneumatskog transporta.

Čvrsti materijali u prašenoj obliku, prema ponašanju pri fluidizaciji gasom, mogu se vrstati u četiri prepoznatljive grupe. Klasifikacija se vrši na osnovu gustine i srednjeg prečnika.

Dijagram ukome se prikazuje navedenaklasifikacijapraškastihmaterijalajeuliteraturipoznatkao Geldartov dijamram. Na slici 4 prikazani su svi ispitivani uzorci pepela u Geldartovom dijamramu.





**Slika 4. Geldartov dijagram za ispitivane uzorke pepela**

Na osnovu položaja tačaka za određeni materijal u Geldartovom dijagramu mogu se dobiti smernice za izbor vrste pneumatskoh transporta. Linije na dijagramu predstavljaju granice između oblasti (A, B, C i D) za određene oblike pneumatskog transporta: A (zgusnuti fluidizovani transport), B (otežan zgusnuti transport), C (transport zgusnutih praškastih materijala) i D (čepasti transport pri malim brzinama). Uočava se da veći deo uzoraka pripada oblasti B, a manji oblasti A. Oblasti A odgovara zgusnuti fluidizovani transport, a oblasti B otežan zgusnuti transport materijala. Prahovi koji spadaju u grupu A pokazuju svojstvo ugušćenog širenja pri početnoj fluidizaciji i rani početak bubrenja (stvaranja mehurova), dok kod prahova u grupi B stvaranje mehurova nastaje pri početnoj fluidizaciji.

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanjima je obuhvaćeno preko 60 uzoraka elektrofiltarskog pepela, pri čemu su za 12 odabranih uzoraka prikazani kompletni rezultati ispitivanja: nasipna gustina, stvarna gustina, srednji prečnik čestica, poroznost, minimalna brzina fluidizacije, permeabilnost i hemijski sastav, dok su za ostale uzorke dati zbrini rezultati karakteristika bitnih za definisanje kvaliteta pepela.

Utvrđeno je da je pepeo iz TENT-Birazito neujednačen po krupnoći i po fizičko-hemijskom sastavu. Karakteristike i kvalitet elektrofiltarskog pepela koji nastaje sagorevanjem domaćih lignitasu u direktnoj vezi sa sa promenljivim kvalitetom uglja (povećanim sadržajem pepela i promenama u hemijskom sastavu), režimom rada termoelektrane i mnogim drugim parametrima.

Sve više termoelektrana prelazi na modernije sisteme pneumatskog transporta i deponovanja elektrofiltarskog pepela, ne samo iz ekoloških razloga, već i zbog velike potražnje za ovom vrstom produkta procesa sagorevanja spraćenog uglja. Zbog toga, pravilno sagledavanje i predviđanje karakteristika elektrofiltarskog pepela predstavljaju osnov za projektovanje sistema za transport i deponovanje, kao i pokazatelj za mnoge mogućnosti za dalje korišćenje.

Za preporuku izbora pneumatskog transporta za određeni materijal, potrebno je u razmatranje uključiti kako fizičko-hemijske karakteristike, tako i aeraciona svojstva. Neophodno je poznavati sve podatke o njegovim svojstvima i količinama, na osnovu čega će se pouzdano definisati radni uslovi.

Potpunije utvrđivanje uticaja karakteristika praškastih materijala daće mogućnost za otklanjanje problema u pneumatskom transportu koji su prisutni kod postojećih rešenja u eksploataciji. Do tada, najbolja sredstva za definisanje vrste pneumatskog transporta predstavljaju karakteristike materijala vezane za interakciju gas-čestica, na prvom mestu permeabilnost.

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. Takođe, sadržaj radionukleida 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 otpeljavanja 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 fabrikama cementa.

Korišćenje elektrofilterskog 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. Sve prethodno navedeno određuje pepeo kao proizvod čije je karakteristike neophodno poznavati, ato zahteva konstantna istraživanja i detaljne analize.

## NOMENKLATURA

$m_m$	- Masa materijala, [kg]
$V$	- Zapremina materijala, [m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\varepsilon,0}$	- Nasipna (zapreminska) gustina materijala (= $m_m/V$ ), [kg/m <sup>3</sup> ]
$F_i$	- Masa frakcije (ostatka na situ), [g]
$Q_F$	- Ukupna masa svih frakcija (= $\sum F_i$ ), [g]
$a_i$	- Maseni udeo frakcije (= $F_i \cdot 100/Q_F$ ), [%]
$d_{sr,i}$	- Srednji prečnik i-te frakcije (= $(d_{i+1} + d_i)/2$ ), [m] [μm]
$d_{i+1}$	- Dimenzija otvora gornjeg sita i-te frakcije, [m]
$d_i$	- Dimenzija otvora donjeg sita i-te frakcije, [m]
$d_{sr}$	- Srednji prečnik uzorka materijala (= $\sum_{i=0}^n d_{sr,i} a_i / \sum_{i=0}^n a_i$ ), [m] [μm]
$\rho_s$	- Stvarna (fizička) gustina materijala, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon_0$	- Poroznost sloja materijala (= $1 - \rho_{\varepsilon,0} / \rho_s$ ), [-]
$w^*$	- Minimalna brzina fluidizacije (= $\frac{\dot{m}_f}{\rho_f A}$ ), [cm/s] [m/s]
$\dot{m}_F$	- Maseni protok vazduha kroz instalaciju, [kg/s]
$\rho_F$	- Gustina vazduha, [kg/m <sup>3</sup> ]
$A$	- Površina poprečnog preseka kolone za fluidizaciju, [m <sup>2</sup> ]
$PE$	- Faktor permeabilnosti (= $w^* / \frac{\Delta p_s}{H}$ ), [m <sup>2</sup> /(Pa · s)]
$\frac{\Delta p_s}{H}$	- Jedinični pad pritiska u području fluidizacije pri konstantnoj poroznosti, [Pa/m]
$\Delta p_s$	- Ukupan pad pritiska kroz sloj, [Pa]
$H$	- Visina sloja materijala, [m]

## REFERENCE

- [1] David Mills: Pneumatic conveying Design guide, 2nd Ed (2004)
- [2] Jones, Mark G. The influence of bulk particulate properties on pneumatic conveying performance. PhD thesis, Thames Polytechnic. (1988)
- [3] Životić, M., Stojiljković, D., Jovović, A., Čudić, V., Mogućnost korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane „Nikola Tesla“ kao otpada sa upotrebom vrednošću, *Hemijska industrija*, 66, 2013, 3, 403–412

- [4] Klinzing G.E., Rizk F., Marcus R., Leung L.S.: Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach, 3rd Ed (2010)
- [5] 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.
- [6] Upotreba elektrofilterskog pepela i šljake proizvedenih iz termoenergetskih postrojenja, Privredna komora Srbije, 2011.
- [7] Studija Razvoj novih vrsta hidrauličnih veziva na bazi elektrofilterskog pepela termoelektrana, Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd, 2008.
- [8] Studija Pepeli u Srbiji, Institut IMS, Beograd, 2006.
- [9] 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
- [10] SRPS EN 197-1, Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente
- [11] ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
- [12] SRPS EN 450-1, Leteći pepeo za beton – Deo 1: Definicije, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti
- [13] Pravilnik o kvalitetu cementa, Sl. glasnik RS, br. 34/2013 i 44/2014
- [14] Bušatlić, I., Ispitivanje kvaliteta elektrofilterskog 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.
- [15] Bušatlić, I., Ispitivanje kvaliteta elektrofilterskog 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.
- [16] Hitt R. J.: An investigation into the Low Velocity Pneumatic Conveying of Bulk Solids. Phd Thesis, Thames Polytechnic, London UK (1984)