

UDK: 691.55+691.32:662.613.11(045)

UTICAJ ELEKTROFILTERSKOG PEPELA NA KVALITET CEMENTNOG MALTERA I BETONA

Zoran Grdić¹
Gordana Topličić-Ćurčić²
Iva Despotović³
Ana Stanković⁴

Rezime

Korišćenje elektrofilterskog pepela u industriji građevinskog materijala i građevinarstvu je pre svega značajno posmatrano kako sa aspekta zaštite čovekove okoline, tako i sa aspekta poboljšanja određenih svojstva cementnih maltera i betona. Elektrofilterski pepeo ima određenu pucolansku aktivnost koja je dovoljna da se on može koristiti kao dodatak cementnom malteru i betonu. U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja obavljenih i na cementnom malteru i na betonu, u oba slučaja sa različitim procentima dodatka elektrofilterskog pepela.

Ključne reči: elektrofilterski pepeo, cementni malter, beton

1. UVOD

Upotrebom elektrofilterskog pepela u industriji građevinskih materijala i u tehnologiji betona rešavaju se problemi stvaranja industrijskog otpada, zagađenja čovekove sredine, uništavanja hiljada hektara zemljišta. Pritom se istovremeno pruža mogućnost stvaranja novih, ekonomičnijih građevinskih materijala.

¹ Dr, vanredni profesor, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu

² Mr, asistent, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu

³ dipl.inž.građ., stipendista Ministarstva nauke, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu

⁴ dipl.inž.građ., stipendista Ministarstva nauke, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu

Elektrofilterski pepeo se odavno primenjuje u svetu, uglavnom modifikovan različitim aditivima kako bi se poboljšala njegova svojstva kao vezivnog materijala ili agregata u malterima i betonima. Takođe, postoji mogućnost i njegove fizičke ili termalne modifikacije koja se primenjuje u brojnim državama. U ovom radu korišćen je pepeo sa deponije bez ikakvih promena njegovog hemijskog sastava da bi se razmotrila realna mogućnost njegove direktne primene u praksi.

Ekperimentalno istraživanje prikazano u ovom radu imalo je za cilj utvrđivanje uticaja dodatka elektrofilterskog pepela cementnom malteru i betonu na promenu njegove čvrstoće pri pritisku, značajnom uslovu kvaliteta za te materijale.

2. MATERIJALI KORIŠĆENI U EKSPERIMENTU

Materijali korišćeni u eksperimentalnom istraživanju su:

- cement PC 35M(S-Q) 42,5N Holcim, Novi Popovac za spravljanje maltera,
- cement PC 20S 42,5N Titan, Kosjerić za spravljanje betona,
- rečni pesak "Moravac" krupnoće zrna od 0 – 2 mm za malter,
- separisani agregat iz J.Morave izdelfjen u frakcije 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm i 16/31,5 mm za beton,
- elektrofilterski pepeo sa deponije TE "Kostolac" za malter i TE "Obrenovac" za beton,
- superplastifikator SPR 949 "PRVI MAJ" Čačak i
- voda iz gradskog vodovoda.

Mineraloški sastav elektrofilterskog pepela zavisi od prirode i starosti upotrebljenog goriva – uglja, postignutih temperatura sagorevanja i režima hlađenja. Elektrofilterski pepeli nastaju u zonama visokih temperatura (iznad 1000°C) na kojima dolazi do omekšavanja, pa čak i do topljenja nesagorelih mineralnih čestica, koje zatim dolaze u zonu relativno niske temperature (reda oko 250°C). Usled ovakvog termičkog naprezanja elektrofilterski pepeli dobijaju staklastu strukturu, pri čemu se zbog površinskih napona formiraju u obliku optica ili fragmenete nepravilnog oblika. Osnovnu mineralnu tvorevinu u ovim pepelima čine staklaste materije i mulit, uz manje učešće hematita, magnetita, getita i ugljene supstance.

Mikroskopska analiza pokazuje da su čestice elektrofilterskih pepela najčešće sfernog oblika (mada mogu biti i izdužena, zaobljena ili sasvim nepravilna) dimenzija 3 do 200 x 10⁻⁶ m, specifične mase (gustine) 1,7 do 2,6 g/cm³.

Elektrofilterski pepeo karakteriše veoma niska zapreminska masa, koja u rastresitom stanju iznosi nešto preko 500 kg/m³. Uobičajeni hemijski sastav elektrofilterskog pepela je dat u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav elektrofilterskog pepela

Oksid	Procenat učešća
SiO ₂	42 - 50
Al ₂ O ₃	16 - 30
Fe ₂ O ₃	3 - 10
CaO	2 - 4
MgO	0,5 - 9
Na ₂ O + K ₂ O	4 - 7
SO ₃	0 - 2
Gubitak žarenjem	promenljiv

Svi ostali materijali korišćeni u eksperimentu ispunjavali su sve uslove kvaliteta propisane odgovarajućim srpskim standardima.

3. EKSPERIMENT

3.1 Eksperiment na malteru

Predmetni problem proučavan je eksperimentalnom metodom. Eksperiment je urađen u akreditovanoj Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu. U navedenoj laboratoriji postoje svi potrebni aparati, uređaji, merni instrumenti, pribor i materijali za izvođenje eksperimenta.

Čvrstoće maltera pri savijanju i pritisku ispitivane su na uzorcima oblika prizme dimenzija 4 x 4 x16 cm prema standardima SRPS EN 196-1:1997 i SRPS EN 196-1/1:2001.

Da bi se doneo zaključak o uticaju elektrofilterskog pepela na čvrstoću cementnog maltera, napravljene su četiri serije uzoraka, pri čemu su tri serije uzoraka spravljene od cementnog maltera sa dodatkom 10, 20 i 30% elektrofilterskog pepela, a četvrta od cementnog maltera bez dodataka pepela - etalon. Sve serije prizmi napravljene su i ispitane pod identičnim uslovima, u skladu sa odredbama navedenih standarda.

Važno je naglasiti da su svi uzorci napravljeni od malterskih smeša jednake konzistencije koja je iznosila 180 ± 2 mm na potresnom stolu. Čvrstoće su ispitivane pri starostima uzoraka od 2, 7 i 28 dana.

3.2 Eksperiment na betonu

Eksperimentalna ispitivanja su sprovedena na uzorcima – betonskim kockama ivice 15 cm. Ponovo su spravljene četiri serije uzoraka. Jedna serija je spravljena bez dodatka pepela i ona je služila kao etalon. Tri serije su spravljene sa dodatkom superplastifikatora SPR949 i elektrofilterskog pepela pri čemu je procenat pepela u betonu bio 20, 25 i 30%. Čvrtoća pri pritisku merena je prema standardu SRPS ISO 4012:2000, a zapreminska masa očvrslog betona SRPS ISO 6275:1997.

3.2.1 Betonska mešavina B-OPT1/30 (sadrži 30% elektrofilterskog pepela)

Količine materijala za spravljanje 1 m³ svežeg betona oznake B-OPT1/30 date su u tabeli 2.

Tabela 2. Količine materijala za spravljanje 1 m³ betona B-OPT1/30

Materijal	Količina za 1 m ³ svežeg betona
Cement	340 kg
Elektrofilterski pepeo	110 kg
Voda	211 kg
Superplastifikator SPR 949	9 kg
Agregat ukupno	1800 kg
frakcija 0/4 mm (33%)	590 kg
frakcija 4/8 mm (17%)	310 kg
frakcija 8/16 mm (17%)	310 kg
frakcija 16/31,5 mm (33%)	590 kg

Na osnovu količina materijala prikazanih u tabeli 2 mogu se izvesti sledeće relacije:

- količnik agregat/vezivo $\Rightarrow 1800/(340 + 110) = 4,0$ što ukazuje da je beton bogat pastom i ima ima dobru ugradljivost i obradljivost,
- vodocementni faktor $\Rightarrow (211 + 9)/(340 + 110) = 0,49$,
- procenat dodatka superplastifikatora u odnosu na ukupnu masu veziva (cement + pepeo) iznosi 2%,
- konzistencija je merena vebe metodom i iznosi 6 stepeni što odgovara slabo plastičnoj konzistenciji i još uvek dozvoljava dobru ugradljivost betona zbog prisustva dovoljne količine paste u betonu uz obaveznu primenu odgovarajućih mehaničkih sredstava.

3.2.2 Betonska mešavina B-OPT2/25 (sadrži 25% elektrofilterskog pepela)

Količine materijala za spravljanje 1 m³ svežeg betona oznake B-OPT2/25 date su u tabeli 3.

Tabela 3. Količine materijala za spravljanje 1 m³ betona B-OPT2/25

Materijal	Količina za 1 m ³ svežeg betona
Cement	360 kg
Elektrofilterski pepeo	90 kg
Voda	198 kg
Superplastifikator SPR 949	9 kg
Agregat ukupno	1800 kg
frakcija 0/4 mm (33%)	590 kg
frakcija 4/8 mm (17%)	310 kg
frakcija 8/16 mm (17%)	310 kg
frakcija 16/31,5 mm (33%)	590 kg

Na osnovu količina materijala prikazanih u tabeli 3 mogu se izvesti sledeće relacije:

- količnik agregat/vezivo $\Rightarrow 1800/(360 + 90) = 4,0$ što ukazuje da je beton bogat pastom i ima ima dobru ugradljivost i obradljivost,
- vodocementni faktor $\Rightarrow (198 + 9)/(360 + 90) = 0,46$,
- procenat dodatka superplastifikatora u odnosu na ukupnu masu veziva (cement + pepeo) iznosi 2%,
- konzistencija je merena webe metodom i iznosi 6 stepeni što odgovara slabo plastičnoj konzistenciji.

3.2.3 Betonska mešavina B-OPT3/20 (sadrži 20% elektrofilterskog pepela)

Količine materijala za spravljanje 1 m³ svežeg betona oznake B-OPT3/20 date su u tabeli 4. Na osnovu količina materijala prikazanih u tabeli 4 mogu se izvesti sledeće relacije:

- količnik agregat/vezivo $\Rightarrow 1800/(375 + 75) = 4,0$,
- vodocementni faktor $\Rightarrow (192,5 + 9)/(375 + 75) = 0,43$,
- procenat dodatka superplastifikatora u odnosu na ukupnu masu veziva (cement + pepeo) iznosi 2%,
- konzistencija je merena webe metodom i iznosi 6 stepeni.

Kako se iz navedenog vidi i prilikom spravljanja betonskih mešavina poštovan je princip jednakih konzistencija.

Tabela 4. Količine materijala za spravljanje 1 m³ betona B-OPT3/20

Materijal	Količina za 1 m ³ svežeg betona
Cement	375 kg
Elektrofilterski pepeo	75 kg
Voda	192.5 kg
Superplastifikator SPR 949	9 kg
Agregat ukupno	1800 kg
frakcija 0/4 mm (33%)	590 kg
frakcija 4/8 mm (17%)	310 kg
frakcija 8/16 mm (17%)	310 kg
frakcija 16/31,5 mm (33%)	590 kg

4. REZULTATI EKSPERIMENTA I DISKUSIJA

4.1 Rezultati dobijeni na malteru

Ispitivanja etalona i prizmi sa 10, 20 i 30% elektrofilterskog pepela su obavljena nakon 2, 7 i 28 dana pri čemu su merene čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku. Rezultati merenja su prikazani u tabeli 5.

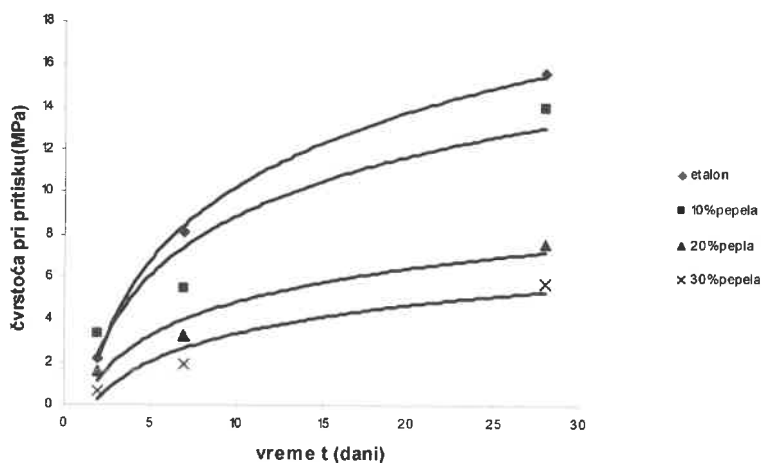
Tabela 5. Čvrstoće pri savijanju i pritisku dobijene nakon 2,7 i 28 dana

Starost	Merene veličine	etalon	10% el.pepela	20% el.pepela	30% el.pepela
2 dana	γ [kg/m ³]	2,142	2,104	2,055	1,955
	f_s [N/mm ²]	0,656	0,604	0,558	0,446
	f_p [N/mm ²]	2,207	3,346	1,548	0,621
7 dana	γ [kg/ m ³]	2,161	2,131	1,942	1,999
	f_s [N/mm ²]	2,140	1,492	0,984	0,533
	f_p [N/mm ²]	8,145	5,416	3,220	1,916
28 dana	γ [kg/ m ³]	2,187	2,080	2,055	2,059
	f_s [N/mm ²]	3,925	3,620	2,180	1,520
	f_p [N/mm ²]	15,615	14,000	7,540	5,670

Oznake u drugoj koloni tabele 5 označavaju:

- γ – zapreminska masa očvrslog betona,
- f_s – čvrstoća pri savijanju,
- f_p – čvrstoća pri pritisku.

Promena čvrstoće pri pritisku cementnog maltera, etalona i maltera sa različitim procentom dodatka elektrofilterskog pepela, u funkciji vremena data je na slici 1.



Slika 1. Promena čvrstoće pri pritisku cementnog maltera, etalona i sa različitim procentom dodatka elektrofilterskog pepela, u funkciji vremena

Analizom dobijenih rezultata dolazi se do zaključka da je optimalno učešće elektrofilterskog pepela kao veziva koje zamenjuje deo cementa u cementnom malteru 10% od mase cementa pri čemu se dobijaju malteri zadovoljavajućih čvrstoća. Navedeni zaključak se odnosi na cementni malter razmere mešanja po masi 1 : 3. Povećanjem procenta učešća elektrofilterskog pepela čvrstoće maltera opadaju u značajnoj meri tako da se može postaviti pitanje njegove praktične primene. Ovde još jednom naglašavamo da je u eksperimentu sa malterom korišćen elektrofilterski pepeo sa deponije koji je u određenom vremenskom periodu bio izložen dejstvu atmosferilija.

4.2 Rezultati dobijeni na betonu

Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrstlog betona (γ_b) i čvrstoće pri pritisku (f_{pb}) betona oznake B-OPT1/30 prikazani su u tabeli 6.

Tabela 6. Vrednosti zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku betona B-OPT1/30

Starost betona [dani]	Pojedinačna vrednost zapreminske mase γ_b [kg/m ³]	Srednja vrednost zapreminske mase γ_b [kg/m ³]	Pojedinačna vrednost čvrstoće pri pritisku f_{pb} [MPa]	Srednja vrednost čvrstoće pri pritisku f_{pb} [MPa]
3	2310	2310	13,33	13,00
	2310		12,67	
7	2310	2318	21,77	22,21
	2325		22,66	
28	2330	2330	37,30	37,30
	2330		37,30	

Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslog betona (γ_b) i čvrstoće pri pritisku (f_{pb}) betona oznake B-OPT2/25 prikazani su u tabeli 7.

Tabela 7. Vrednosti zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku betona B-OPT2/25

Starost betona [dani]	Pojedinačna vrednost zapreminske mase γ_b [kg/m ³]	Srednja vrednost zapreminske mase γ_b [kg/m ³]	Pojedinačna vrednost čvrstoće pri pritisku f_{pb} [MPa]	Srednja vrednost čvrstoće pri pritisku f_{pb} [MPa]
3	2310	2310	13,78	14,45
	2310		15,11	
7	2320	2325	24,40	25,55
	2330		26,70	
28	2350	2350	39,10	38,45
	2350		37,80	

Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslog betona (γ_b) i čvrstoće pri pritisku (f_{pb}) betona oznake B-OPT3/20 prikazani su u tabeli 8.

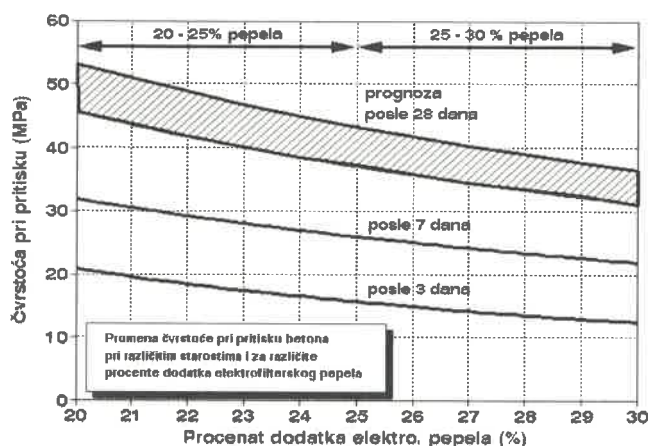
Tabela 8. Vrednosti zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku betona B-OPT3/20

Starost betona [dani]	Pojedinačna vrednost zapreminske mase γ_b [kg/m ³]	Srednja vrednost zapreminske mase γ_b [kg/m ³]	Pojedinačna vrednost čvrstoće pri pritisku f_{pb} [MPa]	Srednja vrednost čvrstoće pri pritisku f_{pb} [MPa]
3	2347	2355	22.00	21.65
	2364		21.30	
7	2356	2348	32.40	32.20
	2341		32.00	
28	2370	2370	43.50	43.95
	2370		44.40	

Promena čvrstoće pri pritisku pri starosti betona od 3 i 7 dana u funkciji povećanja procenta dodatka elektrofilterskog pepela prikazana je na slici 2. Na istoj slici je prikazana prognoza – očekivane vrednosti čvrstoća pri starosti betona od 28 dana, kao i vrednosti čvrstoća pri pritisku posle 28 dana (puna linija u šrafiranom području).

5. ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati pokazuju da se dodavanjem elektrofilterskog pepela kao zamena dela cementa u cementnom malteru dobija malter primenljiv u praksi. Na taj način se postiže znatna ušteda u potrošnji cementa, a samim tim i u ceni koštanja maltera. Takođe, otvara se mogućnost daljih istraživanja u oblasti primene elektrofilterskog pepela u proizvodnji građevinskih prefabrikata. U slučaju rada sa čistim portland cementom (praksa u svetu) može se povećati procenat učešća pepela u malteru. Dalja istraživanja treba usmeriti ka malterima sa istovremenim dodavanjem pepela i odgovarajućih aditiva koji će uticati na dobijanje maltera većih čvrstoća.



Slika 2. Promena čvrstoće pri pritisku betona, etalona i sa različitim procentom dodatka elektrofilterskog pepela, u funkciji vremena

Sastav betona je optimiziran do prihvatljivog nivoa čvrstoća i po tom pitanju se ne razlikuje od betona koji se svakodnevno koriste. U eksperimentalnom radu je korišćen cement koji je već sadržao 30% fabrički dodatog elektrofilterskog pepela. Ako bi se upotrebio čist portland cement to znači da bi se procenat dodatka elektrofilterskog pepela od optimalnih 20-25% verovatno mogao povećati na 40 - 50%.

Beton koji nosi oznaku B-OPT3/20 ima najpovoljnija svojstva i u potpunosti odgovara nameni za koju je njegov sastav dizajniran – izrada trotoara, betonskih prefabrikata i slično. Na osnovu prirasta čvrstoća u periodu do 28 dana zbog zakasnelog "buđenja" pucolanskih svojstava pepela, može se konstatovati da sasvim solidna svojstva pokazuje i beton sa dodatkom 30% elektrofilterskog pepela (B-OPT1/30) što ga čini takođe pogodnim za napred navedene namene.

7. LITERATURA

- [1] Brzaković. P.: *Priručnik za proizvodnju i primenu građevinskih materijala nemetalnog porekla – knjiga 1*, Beograd, 2000.
- [2] Grdić Z., Petković D., Marković M.: *Građevinski sistem u visokogradnji čija je osnova pepeo iz TE Kostolac*, Savetovanje: Energetski kompleks Kostolac i životna sredina, Kostolac, 2002.
- [3] Muravljov M.: *Građevinski materijali*, Gros knjiga, Beograd, 1995.