

Miloš Marjanović¹, Sanja Jocković², Veljko Pujević³, Mirjana Vukićević⁴

MOGUĆNOSTI PRIMENE PEPELA IZ TOPLANA U PUTogradnji

Rezime:

Veliki infrastrukturni projekti zahtevaju upotrebu velike količine prirodnih materijala. U cilju očuvanja prirodnih materijala, smanjenja prostora za deponovanje otpada i održivog razvoja, u ovom radu su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja pepela iz toplane u Kragujevcu za primenu u putogradnji. Izvršeni su sledeći laboratorijski opiti za određivanje fizičkih i mehaničkih svojstava pepela: specifična težina, granulometrijski sastav, parametri zbijenosti, pritisna čvrstoća (UCS), opit direktnog smicanja, CBR, edometarski opit. Diskutovana su svojstva pepela sa aspekta primene u putogradnji.

Ključne reči: pepeo toplana, UCS, CBR, održivi razvoj, deponije

USE OF ASH FROM HEATING PLANTS IN ROAD CONSTRUCTION

Summary:

Major infrastructure projects require significant amount of natural materials. With an aim to save natural materials, reduce waste landfill areas and therefore maintain the sustainable development, this paper presents the results of laboratory study of waste ash from heating plant in Kragujevac for earthworks. The following laboratory tests for the determination of the physical and mechanical properties were used: specific gravity, grain size distribution, Proctor compaction test, unconfined compressive strength (UCS), direct shear, CBR and oedometer tests. Engineering properties of ash on the emphasis for the use in road subgrade are discussed.

Key words: heating plant ash, UCS, CBR, sustainable development, landfills

¹ Docent, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Beograd, Srbija, mimarjanovic@grf.bg.ac.rs

² Docent, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Beograd, Srbija, borovina@grf.bg.ac.rs

³ Docent, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Beograd, Srbija, vpujevic@grf.bg.ac.rs

⁴ Redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Beograd, Srbija, mirav@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Leteći pepeo ima raznovrsnu primenu, jer je u pitanju pucolan, odnosno silikatni ili alumino-silikatni materijal koji se u izolovanom obliku i u prisustvu vode kombinuje sa kalcijum-hidroksidom i formira se smesa sa karakteristikama veziva. Upotreba letećeg pepela u građevinarstvu je započela još 50-tih godina prošlog veka, a poslednje tri decenije se intenzivirala, jer se leteći pepeo pokazao kao ekonomičan i efikasan građevinski materijal. Sa druge strane, korišćenjem letećeg pepela znatno se smanjuju troškovi deponovanja istog.

Procentualno se najveća količina letećeg pepela koristi u Sjedinjenim Američkim Državama i Evropskoj Uniji. Najviše letećeg pepela se koristi u proizvodnji betona i betonskih prefabrikata. Takođe se koristi i kao dopunski materijal u proizvodnji portland cementa i kao komponenta u portland - pucolanskom mešanom cementu. Leteći pepeo se godinama koristi kao zamena za kameno brašno u mešavinama za izradu asfaltnog kolovoznog zastora. Zbog pucolanskih svojstava, ili svojstva samovezivanja, leteći pepeo se uspešno koristi kao vezivo ili dopuna vezivu u izradi stabilizovanog gornjeg nosećeg sloja kolovozne konstrukcije. Jedna od najvažnijih primena je za izradu nasipa ili granulisanih ispuna, umesto prirodnih materijala. Na taj način se štedi energija za eksploataciju, drobljenje i mlevenje kamenih materijala standardnog kvaliteta i doprinosi smanjenju remećenja životne sredine.

U Srbiji se elektrofilterski pepeo tretira kao otpad koji mora kontrolisano da se odlaže u deponije. Do sada je u Srbiji odloženo preko 300 miliona tona pepela i šljake. Deponije zauzimaju prostor preko 1600 hektara (Cmiljanić i dr. 2008; Cmiljanić i dr. 2010). S obzirom da su savremene deponije sistemi kojima se na kontrolisani način obezbeđuje zaštita prirodne okoline od otpadnog materijala koji može biti izvor njenog zagađenja, cena njihove izgradnje je značajna. Svako smanjenje deponovanja elektrofilterskog pepela i njegova ponovna upotreba donosi višestruke koristi, od kojih su najvažnije zaštita životne sredine i finansijske uštede, jer je pepeo po pravilu jeftiniji od drugih materijala. Do sada se u Srbiji elektrofilterski pepeo koristi samo u industriji cementa, što iznosi oko 3% od ukupne količine.

Da bi se pepeo iz naših termoelektrana i toplana uveo u praktičnu upotrebu u građevinskoj industriji neophodna su prethodna istraživanja kojima bi se ispitali svi aspekte njegove upotrebe. Za potrebe rekonstrukcije lokalnog puta, deonica Gornje Komarice – Bešnjaja u okolini Kragujevca, u Laboratoriji za mehaniku tla Građevinskog fakulteta u Beogradu izvršeno je ispitivanje podobnosti pepela dobijenog sagorevanjem uglja iz toplane u Kragujevcu kao materijala za izradu nasipa, posteljice i nosećeg sloja kolovozne konstrukcije predmetne saobraćajnice i rezultati ispitivanja su prikazani u ovom radu.

2. KARAKTERISTIKE PEPELA

Prema standardu ASTM C618, leteći pepeo se, u zavisnosti od hemijskog sastava, klasifikuje na pepeo klase C i pepeo klase F. Ova klasifikacija se u najvećoj meri zasniva na sadržaju (%) oksida silicijuma, aluminijuma i gvožđa - sadržaj $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ za pepeo klase F je min 70%, a za pepeo klase C min 50%. Procenat sumportrioksida (SO_3) je max 5% i gubitak žarenjem je ograničen na 6% za obe klase pepela. Sadržaj CaO je veći kod pepela klase C i iznosi preko 18%.

Pepeo klase F nastaje sagorevanjem antracita i kamenog uglja. Ovaj pepeo ima pucolanske karakteristike, a zbog niskog sadržaja kalcijuma nema samovezujuća svojstva. Pepeo klase C

uglavnom nastaje sagorevanjem lignita i mrkog uglja. Mrki ugalj ima veću koncentraciju kalcijuma (više od 20% CaO), što pepelu daje samovezujuća svojstva.

Leteći pepeo korišćen u ovom istraživanju uzorkovan je sa deponije toplane grada Kragujevca. Hemijski sastav pepela određen je u Institutu za ispitivanje materijala IMS iz Beograda i to prvi put 2015. godine i drugi put 2019. godine (Tabela 1). Rezultati ispitivanja iz 2015. godine pokazuju da je sadržaj $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ iznad 70%, sadržaj CaO manji od 18%, sadržaj SO_3 manji od 5% i gubitak žarenjem 1.71%, što ispitivani pepeo svrstava u klasu F. Prema rezultatima iz 2019. godine, sadržaj $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ je manji od 50%, sadržaj CaO veći od 18%, sadržaj SO_3 veći od 5% i gubitak žarenjem iznosi 14.72%. što ga ne svrstava ni u jednu od navedenih kategorija prema ASTM C618. Pepeo je sive boje, ima pucolanska i samovezujuća svojstva.

Tabela 1 - Hemijski sastav letećeg pepela [%]

Godina	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S	SO ₃	M _n O
2015.	52.91	19.15	6.65	13.93	2.36	0.69	0.43	0.02	1.98	0.006
2019.	29.61	14.61	4.31	25.98	2.18	1.31	0.41	0.00	6.29	0.05

Napomena: Tokom vremena hemijski sastav uglja u toplani je podložan promenama

3. LABORATORIJSKI OPITI

Za ispitivanje je uzorkovano oko 60 kg pepela sa deponije sa tri različita mesta, imajući u vidu da je toplana u toku eksploatacije koristila ugalj sa različitim ugljenokopa. Ispitani su uzorci pepela sa tri lokacije iznačeni kao U1, U2 i U3 i četvrta mešavina M formirana od prethodna tri uzorka, mešanjem u suvom stanju u jednakim masenim odnosima.

Program laboratorijskih ispitivanja sastojao se iz sledećih faza: Određivanje osnovnih fizičkih i identifikaciono-klasifikacionih svojstava pepela; Određivanje optimalne vlažnosti pepela; Priprema probnih tela za ispitivanje mehaničkih karakteristika; Određivanje mehaničkih karakteristika pepela. Sva ispitivanja izvršena su prema važećim standardima. Ispitna tela za određivanje mehaničkih karakteristika pepela su dobijena zbijanjem pri optimalnoj vlažnosti po standardnom Proktorovom opitu. Prethodno osušenom pepelu dodata je odgovarajuća količina vode, a zatim je izvršeno zbijanje bez odlaganja.

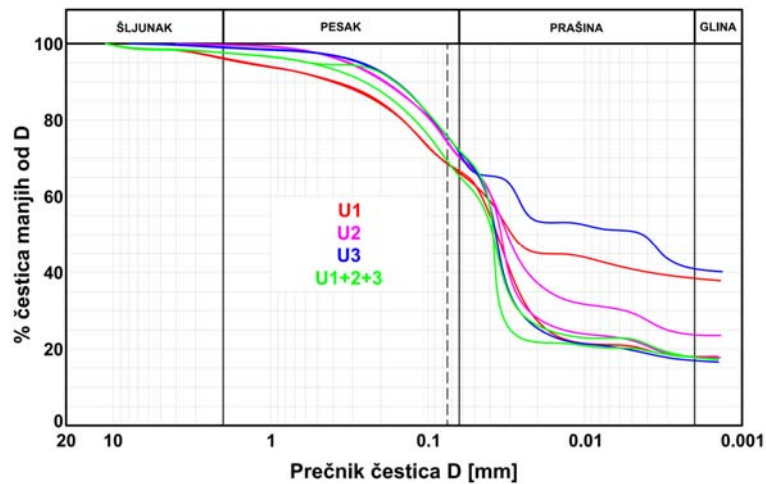
4. REZULTATI ISPITIVANJA

4.1 FIZIČKA SVOJSTVA

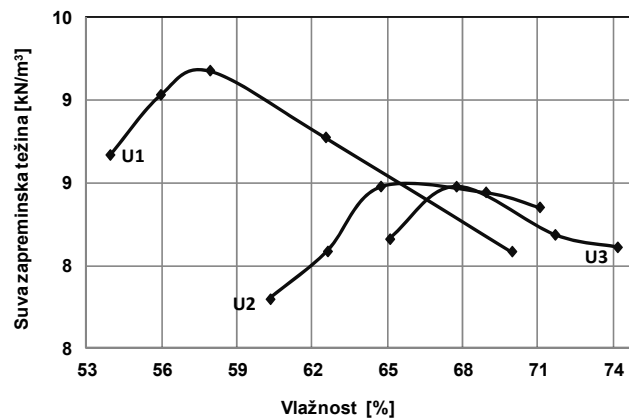
Od fizičkih svojstava određeni su specifična težina $G_s=2.52-2.68$, sadržaj karbonata koji iznosi 35-52% i granulometrijski sastav (Slika 1). Prema granulometrijskom sastavu, ispitani pepeo spada u prašinsto peskovite neplastične materijale.

4.2 ZBIJENOST

Za određivanje odnosa suve zapremine težine i vlažnosti, za uzorke U1-U3 urađeni su standardni Proktorovi opiti. Dobijena optimalna vlažnost je poslužila za dobijanje svih ispitnih tela za opite kojima su određivane mehaničke osobine pepela. Optimalna vlažnost je u granicama $w_{opt}=58.1-67.8\%$, a maksimalna suva zapreminska težina $\gamma_{d,max}=8.5-9.15 \text{ kN/m}^3$ (Slika 2).



Slika 1 - Granulometrijske krive ispitanih uzoraka pepela



Slika 2 - Zavisnost vlažnosti i suve zapremine težine

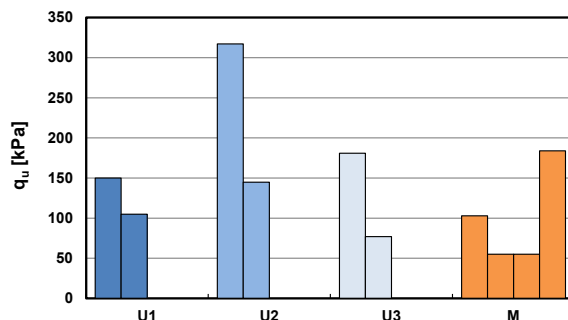
4.3 MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Od mehaničkih svojstava pepela ispitani su jednoaksijalna čvrstoća, parametri smičuće čvrstoće i parametri deformabilnosti. Ispitivanja mehaničkih parametara su vršena sa jednom do četiri probe.

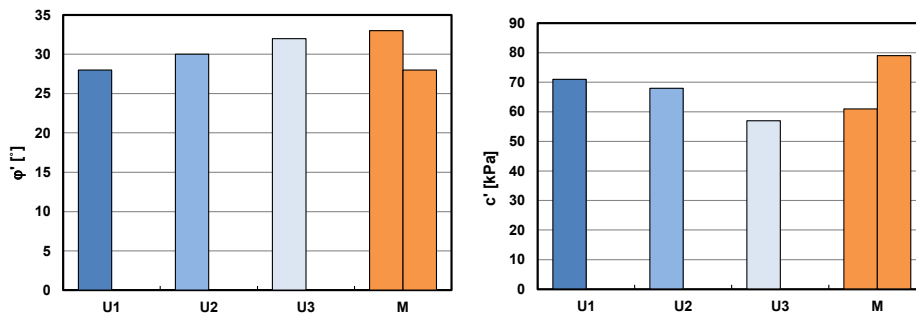
Rezultati opita jednoaksijalne čvrstoće (Slika 3) pokazuju prilično rasipanje rezultata, u zavisnosti od formiranih mešavina, čak i između ispitanih probnih tela iz iste mešavine, i nalaze se u rasponu od $q_u=55-185$ kPa, što je slično ponašanju pepela iz termoelektrana u Srbiji i karakteristično za pepeo tipa V (prema standardu EN 14227-4) koji imaju male vrednosti jednoaksijalne čvrstoće.

Efektivni parametri smičuće čvrstoće određeni su dreniranim opitom direktnog smicanja na pet uzoraka - tri na uzorcima mešavina U1-U3 i dva na mešavini M (homogenizovana

mešavina U1, U2 i U3). Ugao unutrašnjeg trenja za efektivne napone je u granicama $\varphi'=28-33^\circ$, a kohezija $c'=57-79$ kPa, Slika 4.

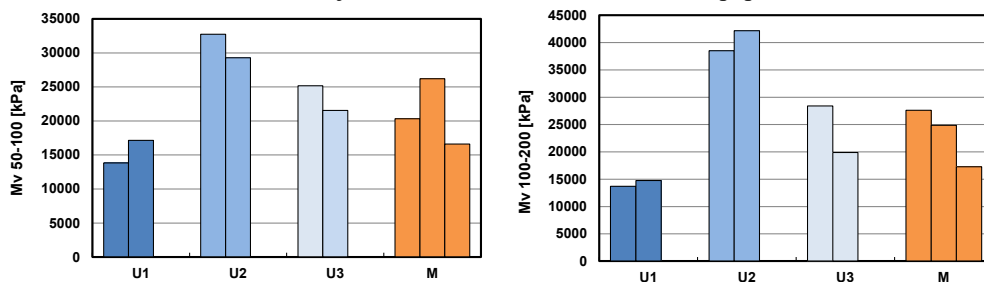


Slika 3 - Jednoaksijalna čvrstoća ispitanih uzoraka



Slika 4 - Zavisnost vlažnosti i suve zapreminske težine

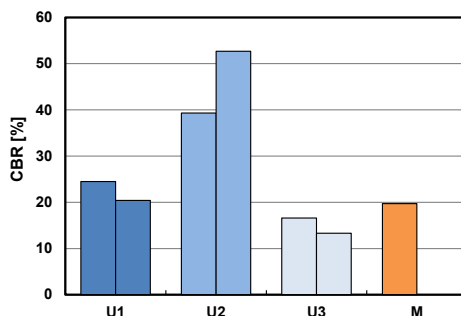
Parametri deformabilnosti, dobijeni edometarskim opitom, su sledeći: modul stišljivosti za nivo napona od 50-100 kPa je $M_v=15500-31000$ kPa, a za napone od 100-200 kPa je $M_v=14000-40000$ kPa, što ukazuje na nisku deformabilnost uzoraka pepela, Slika 5.



Slika 5 - Moduli stišljivosti uzoraka

4.4 KALIFORNIJSKI INDEKS NOSIVOSTI

Veličina CBR vrednosti bitno utiče na upotrebljivost materijala u izgradnji donjeg stroja saobraćajnica, kao i na dimenzionisanje slojeva gornjeg stroja saobraćajnica. Ispitivanja pokazuju rasipanje rezultata. CBR vrednosti su u granicama $CBR_{min}=15$ (za uzorak U3), dok su za ostala dva uzorka i mešavinu vrednosti $CBR=20-50\%$, Slika 6.



Slika 6 – CBR vrednosti uzoraka

5. ZAKLJUČCI

Sprovedena istraživanja su pokazala da ispitivani pepeo iz toplane grada Kragujevca bez dodatka veziva ima veoma dobre mehaničke karakteristike, koje odgovaraju krupnozrnim vrstama tla kao što su pesak ili šljunak. Dodatno, za razliku od peska i šljunka, pepeo ima značajnu koheziju. Za stabilnost nasipa, parametri smičuće čvrstoće zadovoljavaju projektantske uslove vezane za nagibe kosina. Prema parametrima deformabilnosti izraženih preko modula stišljivosti, pepeo se može svrstati u kategoriju tla male stišljivosti. Prema CBR vrednostima ispitivani pepeo se svrstava u dobar do odličan materijal za izradu posteljice saobraćajnica.

Laboratorijska ispitivanja pokazala su da ispitani materijal predstavlja pogodan građevinski materijal za primenu u izgradnji saobraćajne infrastrukture. Može se koristiti za izradu nasipa sa jezgrom od pepela i izradu nasipa od pepela. Iako prikazani rezultati pokazuju jasan trend pozitivnih efekata, neophodno je u svakoj konkretnoj primeni izvršiti dodatna laboratorijska ispitivanja kojim će se utvrditi svojstva odabranih materijala i definisati optimalna tehnologija izvođenja radova.

LITERATURA

- [1] ASTM C618-15: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete; ASTM International, 2015
- [2] Cmiljanić S, Jotić S, Tošović S.: Prethodni rezultati istraživačko-razvojnog programa - primena elektrofilterskog pepela u putogradnji, Simpozijum o istraživanju i primeni savremenih dostignuća u našem građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, 2008, 3-13.
- [3] Cmiljanić S., Vujanić V., Rosić B., Vuksanović B., Tošović S., Jotić S.: Physical-mechanical properties of fly-ash originating from thermo-electric power plants of Serbia, Proc. of XIVth Danube-European Conference on Geotechnical Engineering: From Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic, 2010.
- [4] SRPS EN 14227-4: Hydraulically Bound Mixtures—Specifications—Part 4: Fly Ash for Hydraulically Bound Mixtures; Institute for Standardization of Serbia, 2014