

Jelena Dragaš, dipl. inž. građ.¹

Nikola Tošić, dipl. inž. građ.¹

doc. dr Ivan Ignjatović, dipl. inž. grqd.¹

prof. dr Snežana Marinković, dipl. inž. građ.¹

KONSTRUKCIJSKI BETONI SA DELIMIČNOM ILI POTPUNOM ZAMENOM CEMENTA ELEKTROFILTERSKIM PEPELOM

0352-2733,47 (20014), p. 91-130

UDK: 662.613.13 : 662.972.16
PREGLEDNI (NAUČNI) ČLANAK

Rezime

Gr građevinska industrija se suočava sa velikim izazovima prilikom usmeravanja svojih delatnosti na put održivog razvoja. Zaštita životne sredine, korišćenje otpadnih i recikliranih materijala i smanjenje upotrebe prirodnih neobnovljivih resursa postali su fokus aktuelnih istraživanja građevinskih materijala. Beton je danas nesumnjivo najčešće korišćeni veštački materijal u svetu, i stoga je pritisak da se njegov štetni uticaj na okolinu što više smanji. Proizvodnja glavne vezivne komponente betona - cementa, predstavlja jedan od većih zagađivača životne sredine. Imajući ovo u vidu, istraživanja u oblasti

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Rad primljen oktobra 2014.

betona su fokusirana na korišćenje alterantivnih veziva u betonu koja imaju manje štetnih efekata na životnu sredinu. Poslednjih decenija veliku pažnju privlače betoni sa elektrofilterskim pepelom kao delimičnom ili potpunom zamenom cementa. U ovom radu dat je pregled mogućnosti korišćenja elektrofilterskog pepela u betonima i fizičko-mehaničke karakteristike tih betona. Analizirani su betoni sa velikim sadržajem elektrofilterskog pepela koji imaju 50% zamene cementa i geopolimer betoni u kojima je cement potpuno zamenjen alkalno aktiviranim elektrofilterskim pepelom. Dat je pregled istraživanja iz te oblasti u svetu i rezultati sopstvenih eksperimentalnih istraživanja ovih vrsta betona sa elektrofilterskim pepelom iz termoelektrane "Nikola Tesla B" iz Obrenovca.

Ključne reči: beton, elektrofilterski pepeo, zamena cementa, alkalna aktivacija, geopolimeri.

STRUCTURAL CONCRETE WITH PARTIAL OR TOTAL CEMENT REPLACEMENT WITH FLY ASH

Abstract

Building industry is facing with great challenges in directing its activities towards sustainable development. Environmental protection, the use of waste and recycled materials and reduction of the use of non-renewable natural resources has become the focus of current research

in building materials. Concrete is the most widely used man-made material in the world, and hence the pressure to reduce its harmful impact on the environment as much as possible. Production of the main component of concrete - cement, is one of the major polluters of the environment. With this in mind, research in the field of concrete materials has focused on the use of alternative binder in concrete with less harmful effects on the environment. In recent decades, concrete made with fly ash as a partial or total replacement of cement attracted a lot of attention. This paper gives an overview of the use of fly ash in concrete, as well as physical and mechanical properties of this type of concrete. High volume fly ash concrete with 50% replacement of cement and geopolymer concrete with alkali activated fly ash have been analyzed. This paper gives an overview of research done in this field in the world and own experimental results of these types of concrete made with fly ash from power plant "Nikola Tesla B" from Obrenovac.

Key words: Concrete, Fly ash, Cement replacement, Alkali activation, Geopolymers.

1. UVOD

U današnjem društvu proizvodnje prvenstveno zarad ostvarivanja profita dolazi do sve većeg iscrpljivanja prirodnih resursa Zemlje, bez dovoljno brige za prave

potrebe ljudi. Civilizacijski napredak, razvoj industrije, tehnologije i rastuća potreba za što komfornijim načinom života naveo je društvo da zaboravi na princip razmene materije između čoveka i Zemlje. Poslednjih decenija razvija se svest o štetnom uticaju koje razne grane industrije imaju na životnu sredinu i zdravlje ljudi pa je došlo do stvaranja novog razvojnog okvira - održivog razvoja. Analizom uticaja svojih procesa i istraživanjem novih materijala koje koristi i građevinska industrija pokušava da svoje delatnosti uskladi sa principima održivog razvoja. Beton je materijal dobrih fizičko-mehaničkih karakteristika, velike mogućnosti oblikovanja i relativno niske cene. Imajući sve to u vidu, ne iznenađuje činjenica da je beton najčešće korišćeni veštački materijal u svetu sa godišnjom proizvodnjom od 25 milijardi tona [1]. Proizvodnja cementa kao glavne vezivne komponente betona ima štetan efekat na životnu sredinu usled emisije ugljen-dioksida (CO_2) u atmosferu koja se javlja kao neizbežan proces tokom proizvodnje cementa. Priroda ne može da apsorbuje ukupnu količinu CO_2 koja se emituje pa se javlja efekat staklene bašte koji se ogleda u zadržavanju Sunčeve radijacije i dovodi do globalnog zagrevanja. Cementna industrija je odgovorna za oko 5% globalne količine CO_2 koji se emituje u atmosferu [2]. Do ovog procesa dolazi prilikom hemijske reakcije dobijanja oksida kalcijuma iz krečnjaka (oko 60% emitovanog CO_2) i usled visokih temperatura potrebnih za odvijanje tog procesa (oko 40% emitovanog CO_2). Jasno je da se ovaj ne-

gativni uticaj može umanjiti samo smanjenjem količina cementa koje se koriste u proizvodnji betona.

U svetu su istraživanja koja se bave rešavanjem ovog problema usmerena na korišćenje otpadnih sirovina kao zamene dela cementa tim materijalima. U ovom radu dat je prikaz istraživanja mogućnosti primene elektrofilterskog pepela (ep) kao delimične ili potpune zamene cementa u konstrukcijskim betonima. Ova analiza je u skladu sa trenutnim trendovima istraživanja materijala u svetu ali i sa problemom velikih deponija elektrofilterskog pepela sa kojima se suočava Srbija. Glavni izvor električne energije u našoj zemlji je i dalje energija koja se dobija iz termoelektrana. Elektrofilterski pepeo je neorganski materijal koji predstavlja nusprodukt sagorevanja uglja u termoelektranama. U šest termoelektrana se proizvede oko 70% ukupne električne energije u Srbiji [3]. Tokom 2011. godine proizvedeno je oko 40 miliona tona uglja (uglavnom lignita) iz rudarskih basena Kolubara i Kostolac. Godišnje se u Srbiji proizvede oko šest miliona tona elektrofilterskog pepela, koji se najviše proizvodi u termoelektranama “Nikola Tesla A” i “Nikola Tesla B” u Obrenovcu. Pepeo se odlaže na deponijama koje se nalaze u blizini termoelektrana i zauzimaju velike površine obradivog zemljišta. U Srbiji je trenutno deponovano oko 200 miliona tona elektrofilterskog pepela na površini od 1500 hektara. Poslednjih godina elektroprivreda Srbije ulaže sredstva u projekte zaštite životne sredine u okolini termoelektrana i smanjenja štetnog uticaja koji

ima sagorevanje uglja na zdravlje ljudi koji žive u blizini termoelektrana. Tokom remonta izvedenog 2009/2010. godine u termoelektrani “Nikola Tesla B” uspostavljen je novi sistem sakupljanja, transporta i odlaganja pepela. Primenom nove tehnologije omogućeno je sakupljanje suvog pepela u silosima, spremnog za njegovu isporuku za potrebe industrije. Radi lakšeg transporta pepela, prvo se vrši gravitaciono odvajanje peska iz pepela, a ostatak se zatim razdvaja na četiri grupe prema veličini zrna [4]. Ovaj proces je znatno olakšao mogućnost korišćenja pepela kao sirovine u drugim industrijama. I pored toga, u Srbiji se još uvek koriste jako male količine pepela, i to u najvećoj meri u cementnoj industriji koja ga koristi kao dodatak cementu.

Prepreke za veće korišćenje pepela su nedovoljan broj istraživanja materijala sa elektrofilterskim pepelom i briga za potencijalni štetni uticaj koji pepeo može imati usled nivoa radioaktivnosti koja dolazi od prirodne radioaktivnosti uglja. U izveštaju iz februara 2014. godine *United States Environmental Protection Agency* [5] je navela rezultate analiza štetnog uticaja elektrofilterskog pepela u kom se između ostalog navodi da je štetan uticaj koji beton sa pepelom ima na životnu sredinu i zdravlje ljudi isti ili manji nego kod betona koji nemaju elektrofilterski pepeo u sebi. Ovakvi rezultati bi trebali da posluže kao podstrek daljem istraživanju moguće primene elektrofilterskog pepela iz termoelektrana kao komponente u betonima.

2. ELEKTROFILTERSKI PEPEO

Elektrofilterski pepeo je materijal koji se u najvećoj meri sastoji od oksida silicijuma (SiO_2), aluminijuma (Al_2O_3), kalcijuma (CaO) i gvožđa (Fe_2O_3) u različitim procentima. *American Society for Testing and Materials* - ASTM C618 [6] deli elektrofilterski pepeo u dve klase: C i F, u zavisnosti od sadržaja oksida. Klasi C pripadaju pepeli koji imaju $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$ i najčešće su to pepeli koji se dobijaju sagorevanjem drvenog uglja - lignita. Pepeli ove klase imaju sadržaj CaO veći od 12% i poseduju određena cementna svojstva. Klasi F pripadaju pepeli koji imaju $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$, i procenat CaO manji od 12%. Hemijski sastav elektrofilterskog pepela zavisi od vrste uglja koja se koristi i samog procesa sagorevanja uglja u termoelektranama. Elektrofilterski pepeo iz svih termoelektrana u Srbiji odgovara klasi F. Pepeli obe ove klase poseduju dobra pucolanska svojstva, tj. silicijum i aluminijum iz pepela u prisustvu vlage reaguju sa kalcijum hidroksidom (CH) koji je produkt hidratacije cementa i stvaraju C-S-H (kalcijum silikat hidrat) strukturu koja povećava čvrstoću betona [7]. Pucolanska reakcija je sporija nego proces hidratacije cementa pa je i prirast čvrstoće sporiji nego kod običnih cementnih betona bez pepela (CB), a toplota koja se oslobađa tokom ove reakcije je manja nego pri hidrataciji cementa. Veličina zrna elektrofilterskog pepela se kreće u granicama od jednog do 150 mikrona u zavisnosti od procesa sagorevanja uglja u termoelektranama. Još

jedna bitna karakteristika pepela je sadržaj čestica nesagorelog uglja (gubitak pri žarenju). Kvalitet pepela zavisi u mnogome od ovog faktora i poželjno je da je on što manji. Prema ASTM C618 [6] sadržaj nesagorelog uglja treba da je manji od 6% za pepele klase F. Otežavajući faktor prilikom korišćenja pepela u betonima je njegov izrazito heterogeni sastav. Kao svaki otpadni materijal, ni elektrofilterski pepeo nema ujednačen sastav, već on varira u zavisnosti od upotrebljenog uglja i teško je računati na isti sastav pepela, čak i u istoj termoelektrani, za duži vremenski period.

3. DELIMIČNA ZAMENA CEMENTA ELEKTROFILTERSKIM PEPELOM

Zbog velikih količina elektrofilterskog pepela i njegovih pucolanskih karakteristika on se koristi kao dodatak betonu od tridesetih godina prošlog veka. Pepeo se u betonima koristi kao delimična zamena cementa, delimična zamena peska ili kao kombinacija prethodne dve metode. Od sredine prošlog veka elektrofilterski pepeo se koristi kao delimična zamena cementa u betonima. Sa manjim procentima zamene cementa, do 30%, poboljšava se trajnost betona, smanjuje toplota hidratacije uz iste ili veće čvrstoće u odnosu na uporedne betone bez pepela [8,9]. Ovim procentima zamene cementa pepelom, postiže se bolja ugradljivost betona usled efekta koji imaju sferične čestice pepela i bolja upakovanost unutar betona.

Danas postoji trend zamene veće količine cementa elektrofilterskim pepelom i proizvodnje betona sa velikim sadržajem elektrofilterskog pepela (BVSEP). U ovu grupu spadaju betoni koji imaju procenat zamene cementa (ep/c) veći od 30%, ali se termin “veliki sadržaj” najčešće odnosi na betone sa procentom zamene cementa od 50% i više. Kako bi se postigle optimalne karakteristike BVSEP napušta se princip zamene određenog procenta cementa, već se mešavine betona projektuju tako da sadrže minimalne količine cementa i maksimalne količine elektrofilterskog pepela koji menja cement ali i pesak. U okviru ovog principa BVSEP su betoni koji imaju više od 30% elektrofilterskog pepela u odnosu na ukupnu masu vezivnih materijala u betonu (ep/ve). Vezivni materijal u BVSEP čine cement i elektrofilterski pepeo. Danas se BVSEP najčešće prave sa 30% do 80% elektrofilterskog pepela u ukupnoj masi vezivnih materijala. Postoji više razloga zbog kojih se javila tendencija povećanja količine elektrofilterskog pepela u betonu i zamene cementa ovim materijalom. Prvi je svakako ekološki aspekt i težnja da se što više smanji upotreba cementa i tako smanji emisija CO₂ usled njegove proizvodnje. Veće količine elektrofilterskog pepela u betonu utiču takođe i na smanjenje deponija ovog otpadnog materijala. Povećanjem procenta zamene cementa smanjuje se i cena betona obzirom da elektrofilterski pepeo ima i do 50 puta nižu cenu od cementa. Motivacija za povećanje zamene cementa je svakako i veća trajnost BVSEP u odnosu na CB. Deo ele-

ktrofilterskog pepela koji se upotrebi u betonu učestvuje u pucolanskoj reakciji i povećava čvrstoću betona, dok se drugi deo ponaša kao filer koji popunjava šupljine u betonu i na taj način smanjuje poroznost betona i povećava njegovu trajnost. Manja poroznost povećava otpornost na razne destruktivne procese koji se javljaju u betonu usled dejstva atmosferskih uticaja. Dosadašnja istraživanja pokazuju da su BVSEP otporniji na dejstvo mraza, uticaj hlorida i sulfata nego CB sličnih čvrstoća [10]. U poređenju sa CB, BVSEP imaju manji problem sa stepenom karbonizacije betona i alkalno-silikatnom reakcijom [11]. Klasične betonske konstrukcije se načešće projektuju na životni vek od 50 godina. Nažalost, većina betonskih konstrukcija u urbanim sredinama pokazuje manja ili veća oštećenja već nakon 20 do 30 godina, ili čak i ranije [12]. Kako bi smanjili upotrebu prirodnih neobnovljivih resursa koji se koriste u proizvodnji betona, neophodno je produžiti životni vek betonskih konstrukcija. Imajući sve ovo u vidu, ne čudi činjenica da su istraživanja BVSEP poslednjih godina u velikom porastu.

3.1. Fizičko-mehaničke karakteristike betona sa velikim sadržajem elektrofilterskog pepela

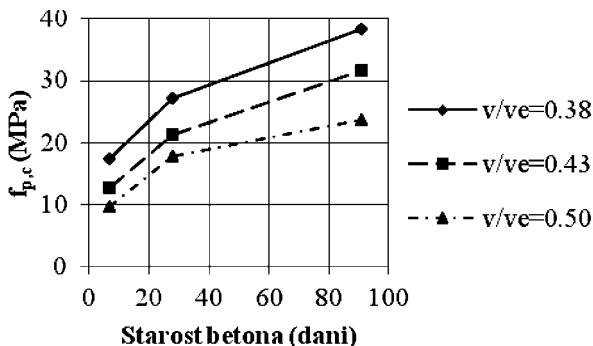
Istraživanja u oblasti BVSEP podrazumevaju različite procenete zamene cementa ili peska i različite količine upotrebljenog pepela. Pravilnim projektovanjem mešavina BVSEP može se uticati na osnovne fizičko-mehaničke karakteristike ovih betona i dobijanje betona uporedivih

ili boljih karakteristika u poređenju sa CB. Istraživanje koje su sprovedi Bilodeau, Malhotra, i Seabrook [13] u *CanMet Materials Technology Laboratory* u Kanadi za potrebe projektovanja mešavina betona za izgradnju *Liu Centra* pokazuju da je moguće napraviti konstrukcijski BVSEP koji ima 58% elektrofilterskog pepela u odnosu na masu vezivnog materijala i vodovezivni faktor 0.32. Za potrebe izgradnje *Liu Centra* napravljeni su BVSEP različitih klasa i količina elektrofilterskog pepela i uspešno su upotrebljeni kako za temelje tako i za konstrukcijske elemente objekta. Ovo je samo jedan od dokaza moguće primene BVSEP u građevinarstvu.

U BVSEP uvodi se pojam vodovezivnog faktora (v/ve) koji predstavlja odnos vode i ukupnog veziva odnosno zbira cementa i elektrofilterskog pepela upotrebljenog u betonu. Ovaj faktor bitno utiče na čvrstoću BVSEP, slično kao što vodocementni faktor ima ključnu ulogu u CB. U BVSEP voda u mešavini se koristi delom za proces hidratacije cementa a delom za pucolansku reakciju elektrofilterskog pepela. Vodovezivni faktor se u literaturi kreće u granicama od 0.19 do 0.60 u većini slučajeva. Kako bi se postigle zadovoljavajuće čvrstoće posebno je da v/ve faktor bude što niži, odnosno manji od 0.40 [14]. Slično kao kod CB, povećanjem v/ve faktora opada čvrstoća pri pritisku. Na *slici 1*. prikazana je zavisnost čvrstoće pri pritisku betona sa 55% zamene cementa elektrofilterskim pepelom klase F tokom vremena [15]. Ukupna masa elektrofilterskog pepela u odnosu na masu

veziva je takođe 55% (ep/ve=55%). Sa *slike 1.* se vidi konstantan pad čvrstoće pri pritisku sa povećanjem v/ve faktora. Imajući u vidu da su potrebni mali v/ve faktori za proizvodnju BVSEP dobrih čvrstoća, često je potrebno dodavanje plastifikatora kako bi se postigla potrebna ugradljivost. Dosadašnja istraživanja su pokazala da se plastifikatori i superplastifikatori na bazi naftalina, sulfonatnih naftalin-formaldehida i polikarboksilata dobro ponašaju u BVSEP [16].

Količine plastifikatora koje su potrebne za zahtevanu ugradljivost zavise od količine i vrste upotrebljenog pepela, i mogu varirati čak i za pepeo iz iste termoelektrane koji je prikupljen u različitim vremenima. Generalno, ko-

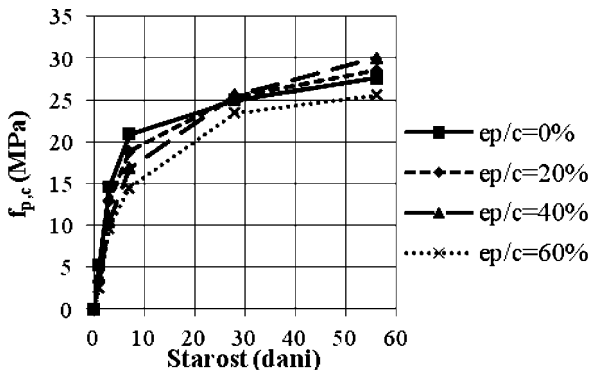


Slika 1. - Zavisnost čvrstoće pri pritisku od v/ve faktora tokom vremena za betone sa 55% zamene cementa elektrofilterskim pepelom [15]

ličine plastifikatora koje se koriste su od 0.5% do 3.0% u odnosu na masu cementa upotrebljenog u mešavini. Upotreba plastifikatora utiče u određenoj meri na cenu BVSEP, ali su količine plastifikatora manje nego kod CB pa se ni cena bitno ne povećava.

Vodovezivni faktor utiče i na vreme vezivanja BVSEP. Istraživanja pokazuju da je vreme vezivanja betona sa elektrofilterskim pepelom duže nego kod CB sa istim v/ve faktorom. Ravena i Mehta [17] su pokazali da je inicijalno vreme vezivanja betona sa različitim procentima zamene cementa elektrofilterskim pepelom duže za 20 minuta do 4 sata i 20 minuta, a krajnje vreme vezivanja za jedan sat do 5 sati i 15 minuta u poređenju sa CB. Pored v/ve faktora na vreme vezivanja utiču i klasa i tip elektrofilterskog pepela, vrsta cementa, temperatura i dodaci betonu [18]. Sa povećanjem količine elektrofilterskog pepela u betonu produžava se vreme vezivanja betona. Kako bi se ubrzalo vreme vezivanja BVSEP, često se koriste dodaci betonu koji ubrzavaju ovaj proces.

Zbog pucolanske reakcije koja se odvija sporije nego hidratacija cementa kod svih betona sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, javljaju se manje početne čvrstoće ali je značajan prirast čvrstoće primetan i nakon starosti od 28 dana. Rezultati iz literature pokazuju da se za manje procenata zamene cementa (od 30% do 40%) mogu postići iste čvrstoće kao kod uporednih CB nakon 28 dana [19,20,21,22].



Slika 2. - Zavisnost čvrstoće pri pritisku BVSEP sa različitim procentima zamene cementa tokom vremena [19]

Na slici 2. prikazan je dijagram zavisnosti čvrstoće pri pritisku betona sa zamenom 0%, 20%, 40% i 60% cementa elektrofilterskim pepelom ($ep/c=ep/ve$) tokom vremena [19]. Sa dijagrama na slici 2. se vidi da je prirast čvrstoće pri pritisku BVSEP sporiji nego kod CB.

Betoni sa procentom zamene od 20% i 40% dostižu iste čvrstoće kao beton bez zamene cementa nakon 28 dana, a kasniji prirast je veći nego kod uporednog CB. Kod BVSEP sa procentom zamene cementa od 60% čvrstoće pri pritisku su u svim vremenima manje nego kod uporednog CB. Čvrstoća pri pritisku BVSEP zavisi od tipa i količine elektrofilterskog pepela, procenta zamene ceme-

nta i peska i v/ve faktora. Za veće procenete zamene (preko 40%) uporedive čvrstoće pri pritisku se mogu dobiti sa niskim v/ve faktorom ili sa dodatkom elektrofilterskog pepela kao delimične zamene peska. Istraživanja pokazuju da je moguće dobiti iste čvrstoće pri pritisku betona sa 55% zamene cementa elektrofilterskim pepelom (ep/ve=55%) i niskim v/ve faktorom od 0.34 [23]. Tokom ovog istraživanja analizirano je osam mešavina betona, referentni CB i sedam mešavina BVSEP sa 55% zamene cementa pepelom različitog hemijskog sastava i granulometrije. BVSEP su imali v/ve faktor između 0.34 do 0.39 kako bi se postiglo slično sleganje svih betona. Analiza je pokazala da je čvrstoća pri pritisku betona sa istim ili sličnim recepturama mešavina ali sa elektrofilterskim pepelom različitog porekla drugačija i varira u opsegu od 30.7 MPa do 55.8 MPa u zavisnosti od vrste pepela. Ovi, ali i mnogi drugi podaci iz literature, pokazuju da različite vrste elektrofilterskog pepela zahtevaju različite količine vode ili plastifikatora za određeno sleganje betona kao i različite količine cementa, elektrofilterskog pepela i vode u mešavini betona kako bi se postigle određene čvrstoće.

3.2. Ispitivanje mogućnosti primene elektrofilterskog pepela iz termoelektrane “Nikola Tesla B” u BVSEP

Kako bi ispitali mogućnosti primene elektrofilterskog pepela iz Srbije u BVSEP prvo su sprovedena ispitiva-

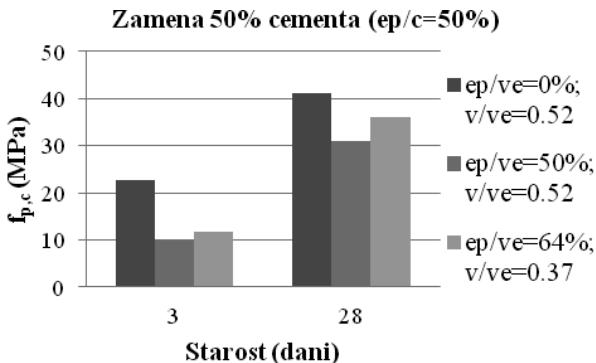
nja hemijskog sastava i granulometrije pepela iz termoelektrane “Nikola Tesla B” iz Obrenovca. Granulometrijska raspodela veličine čestica elektrofilterskog pepela određena je na uređaju *Malvern Instruments Mastersizer 2000* u Institutu tehničkih nauka SANU u Beogradu. Srednje zrno uzorka ispitanog elektrofilterskog pepela je veličine 8.53 mikrona, dok je više od 90% čestica manje od 45 mikrona [24]. Hemijska analiza izvršena je *XRF metodom* u Institutu za ispitivanje materijala IMS u Beogradu. Rezultati hemijske analize (*tabela 1.*) pokazuju da pepeo iz termoelektrane “Nikola Tesla B” pripada klasi F. Kako bi se utvrdila mogućnost korišćenja elektrofilterskog pepela u betonima, sprovedeno je ispitivanje čvrstoće pri pritisku različitih mešavina betona. Cilj ispitivanja je bio napraviti BVSEP koji ima čvrstoće

Tabela 1. - Rezultati hemijske analize uzorka elektrofilterskog pepela iz termoelektrane “Nikola Tesla B” *XRF metodom* (maseni %)

Oksidi	Elektrofilterski pepeo – TENT B
Gubitak pri žarenju, %	1.64
SiO ₂ , %	58.24
Al ₂ O ₃ , %	20.23
Fe ₂ O ₃ , %	5.33
TiO ₂ , %	0.45
CaO, %	7.62

pri pritisku koje odgovaraju čvrstoćama standardnih konstrukcijskih betona.

Analizirana je mogućnost dobijanja istih čvrstoća BVSEP (rane čvrstoće i čvrstoće na 28 dana) i uporednog cementnog betona (UCB), sa dobrom ugradljivošću. Uporedni cementni beton u ovoj fazi ispitivanja je bio beton sa 384 kg/m^3 cementa i v/ve faktorom 0.52 (ep/ve=0%). Analiziran je uticaj zamene 50% cementa (ep/ve=50%) i zamene 50% cementa i dodatnih 30% zamene peska sa ukupnim procentom elektrofilterskog pepela u odnosu na masu veziva od 64% (ep/ve=64%). Dodatnom zamenom 30% peska u mešavini povećava se ukupna ko-



Slika 3. - Čvrstoća pri pritisku betona sa 0%, 50% i 64% elektrofilterskog pepela u masi veziva na tri i 28 dana

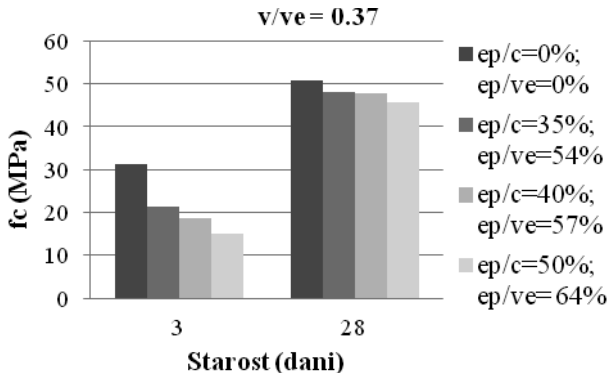
ličina elektrofilterskog pepela i smanjuje v/ve faktor sa 0.52 (prva i druga mešavina) na 0.37 (treća mešavina).

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku pri starosti od tri i 28 dana prikazani su na *slici 3.* i pokazuju da zamena mase cementa od 50% dovodi do smanjenja čvrstoće BVSEP u odnosu na UCB. Dodatnom zamenom 30% peska javlja se povećanje čvrstoće pri pritisku koja je na 28 dana samo za 12% manja od čvrstoće UCB. Nakon prve faze zaključeno je da je neophodno zameniti i određenu količinu peska elektrofilterskim pepelom kako bi se povećala čvrstoća BVSEP.

Za dalja ispitivanja je usvojena zamena 30% peska koja predstavlja maksimalnu količinu peska koja se može zameniti kako bi ostatak agregata zadovoljavao granulometrijsku raspodelu mešavine datu u standardu.

Dalja analiza obuhvata zamenu cementa (ep/c) u procentima od 35% (ep/ve=54%), 40% (ep/ve=57%) i 50% (ep/ve=64%) uz dodatnu zamenu peska od 30%. Svi betoni ove serije napravljeni su sa v/ve faktorom 0.37.

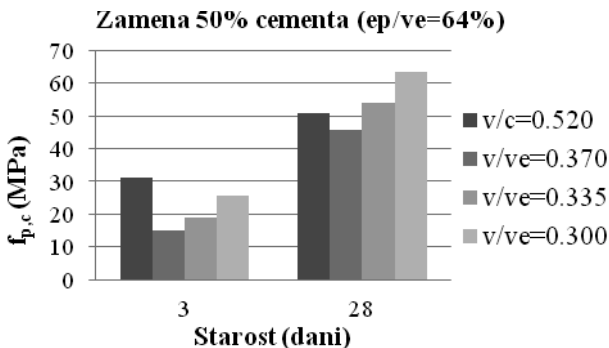
Rezultati čvrstoće pri pritisku dati su na *slici 4.* pokazuju da ni sa zamenom 35% cementa (ep/ve=54%) nije moguće dobiti iste čvrstoće pri pritisku na 28 dana kao UCB sa elektrofilterskim pepelom iz termoelektrane "Nikola Tesla B". Kako bi se upotrebila maksimalna količina elektrofilterskog pepela u betonu, sledeća faza obuhvata analizu uticaja v/ve faktora na čvrstoću pri pritisku BVSEP sa 50% zamene cementa i 30% zamene peska (ep/ve=64%). Napravljene su četiri mešavine betona, je-



Slika 4. - Čvrstoće pri pritisku betona sa 54%, 57%, i 64% elektrofilterskog pepela u masi veziva na tri i 28 dana

dan UCB ($v/c=0.52$) i tri BVSEP sa različitim v/ve faktorima od 0.37, 0.335 i 0.30.

Rezultati čvrstoće pri pritisku na tri i 28 dana prikazani na slici 5. pokazuju da je moguće dobiti iste ili veće čvrstoće pri pritisku BVSEP kao UCB na 28 dana i odgovarajuće početne čvrstoće na tri dana sa 50% zamene cementa, 30% zamene peska ($ep/ve=64\%$) i niskim v/ve faktorom. Važno je napomenuti da su ovi BVSEP napravljeni sa 345.6 kg/m^3 pepela i samo 192 kg/m^3 cementa klase 42.5R. Maksimalna čvrstoća pri pritisku na 28 dana iznosi 63.33 MPa i postignuta je sa najmanjim v/ve faktorom od 0.30. Kako bi se postigla odgovarajuća



Slika 5. - Čvrstoće pri pritisku betona sa 64% elektrofilterskog pepela u masi veziva i različitim vodovezivnim faktorima na tri i 28 dana

ugradljivost BVSEP tokom za sve tri mešavine korišćen je superplastifikator na bazi polikarboksilata (Glenim Sky 690) u procentima od 0.13 do 0.25 u odnosu na masu upotrebljenog cementa u mešavinama.

4. BETONI SA ALKALNO AKTIVIRANIM ELEKTROFILTERSKIM PEPELOM - GEOPOLIMER BETONI

Korak dalje ka smanjenju štetnih uticaja betona, odnosno proizvodnje cementa, je potpuna zamena cementa alternativnim vezivom. Ova težnja je otvorila novo

polje istraživanja u oblasti betona sa alkalno aktiviranim vezivima, odnosno geopolimer betona. Betoni sa alkalno aktiviranim vezivom privlače veliku pažnju u akademskoj i industrijskoj sferi tokom poslednje decenije. Istraživanja koja su do sada sprovedena iz ove oblasti pokazuju veliki potencijal i mogućnost široke primene u građevinskoj industriji. Jedna od glavnih prednosti betona sa alkalno aktiviranim vezivom je jako dobra trajnost. Stepenn kabronizacije i ekspanzije tokom alkalno-agregatne reakcije je manji nego kod CB [25]. Otpornost na dejstvo hlorida i sulfata je takođe jako visoka a ovi betoni su značajno trajniji od CB zbog male količine CaO u vezivnom materijalu [26, 27]. Betoni sa alkalno aktiviranim elektrofilterskim pepelom (BAAEP) su najčešće korišćeni materijali iz ove grupe. Pored elektrofilterskog pepela kao vezivni materijal koriste se i drugi materijali bogati silicijumom i aluminijumom, kao što su zgura visokih peći, metakaolin i crveni mulj. Alkalnom aktivacijom elektrofilterskog pepela dobija se vezivni materijal koji u potpunosti može zameniti cement. Ovaj proces sinteze veziva alkalnom aktivacijom naziva se polimerizacija i podrazumeva rastvaranje aluminatno-silikatne strukture (Si-O-Al) elektrofilterskog pepela u jakoj alkalnoj sredini visoke pH vrednosti (oko 14). Nakon rastvaranja tokom veoma brze hemijske reakcije nastaju dugački lanci Si-O-Al-O [28]. Kako bi se povećao intenzitet aktiviranja pepela potrebna je nega BAAEP na povišenoj temperaturi, najčešće od 30oC do 90oC. Slično kao kod CB, viša temperatura nege dovodi do većeg prirasta ranih čvrsto-

ća. Jedna od karakteristika BAAEP je vrlo mali prirast čvrstoće nakon završetka nege na povišenim temperaturama [28]. Naime, početne čvrstoće nakon završetka nege se vrlo malo razlikuju od čvrstoća nakon 28 dana. Pored povišene temperature dužina trajanja nege BAAEP je takođe faktor koji bitno utiču na čvrstoću pri pritisku. Trajanje nege na povišenoj temperaturi varira između 6 i 96 sati. Sa povećanjem dužine trajanja nege povećava se čvrstoća, ali je njen prirast mali sa zagrevanjem dužim od 96 sati [29].

Karakteristike BAAEP prvenstveno zavise od vrste i osobina elektrofilterskog pepela, hemijskog sastava i količine alkalnih aktivatora, kao i od njihovog odnosa. Davidovits [28] je dao preporuke za upotrebu geopolimera na osnovu molarnog odnosa reaktivnog silicijuma i aluminijuma u elektrofilterskom pepelu. Prema tim preporukama, za upotrebu u konstrukcijskim betonima, najbolje su se pokazali pepeli koji imaju ovaj odnos $Si/Al=2$. Najčešće korišćeni alkalni aktivatori su natrijum hidroksid (NaOH) ili kalijum hidroksid (KOH) i natrijum silikat – vodeno staklo (Na_2SiO_3). Istraživanja su pokazala da je NaOH pogodniji od KOH za upotrebu u BAAEP zbog veće moći rastvaranja čestica elektrofilterskog pepela [30].

4.1. Fizičko-mehaničke karakteristike betona sa alkalno aktiviranimelektrofilterskim pepelom

Na fizičko-mehaničke karakteristike BAAEP utiče mnogo parametara: granulometrijski i hemijski sastav

elektrofilterskog pepela, procenat nesagorelog uglja u pepelu, tip i koncentracija alkanog aktivatora (sadržaj Na_2O i odnos $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ u aktivatoru), temperatura i dužina trajanja nege [31,32,33,34]. Kako bi se postigle optimalne karakteristike BAAEP potrebno je da elektrofilterski pepeo sadrži više od 80-90% čestica manjih od 45 mikrona i manje od 5% nesagorelog uglja. Sadržaj CaO je takođe bitan parametar koji utiče na karakteristike BAAEP. Njegov uticaj nije u potpunosti određen, odnosno postoje razmimoilaženja u rezultatima različitih istraživača po pitanju njegovog uticaja, prvenstveno na čvrstoću pri pritisku. Većina istraživanja pokazuje da se dobijaju veće čvrstoće pri pritisku kod BAAEP koji imaju manje CaO [35,36], ali ima i rezultata koji govore suprotno [37].

Slično kao što vodocementni faktor bitno utiče na čvrstoću pri pritisku CB, bitan parametar koji utiče na čvrstoću BAAEP je odnos alkalnog aktivatora i elektrofilterskog pepela (AA/EP). Određivanje uticaja ovog parametra na karakteristike BAAEP je dosta komplikovnije usled izrazito heterogenog sastava pepela i velikih razlika u granulometrijskom i hemijskom sastavu različitih tipova pepela. Alkalni aktivator se najčešće sastoji iz NaOH koji rastvara čestice pepela, i vodenog stakla koje učestvuje u stvaranju dugačkih lanaca Si-O-Al-O zbog reaktivnog silicijuma koji sadrži u sebi. Potrebno je analizirati sve ove parametre zajedno kako bi se odredio optimalni odnos AA/EP u BVSEP. Povećanjem ovog odnosa

poboljšava se ugradljivost betona slično kao kod CB, ali ona bitno zavisi i od gustine samog alkalnog aktivatora. Nije dovoljno posmatrati samo maseni odnos AA/EP, već je potrebno posmatrati količinu SiO₂, Na₂O i vode unutar alkalnog aktivatora kao bi se odredio uticaj aktivatora na mehaničke karakteristike BAAEP. Rezultati iz literature pokazuju da se odnos AA/EP najčešće kreće u granicama od 0.25 do 0.50 u zavisnosti od karakteristika elektrofilterskog pepela i alkalnog aktivatora [38,39]. Kako bi se odredio uticaj količine i koncentracije aktivatora na mehaničke karakteristike potrebno je analizirati ukupne količine i odnose SiO₂, Na₂O i vode zajedno u elektrofilterskom pepelu i alkalnom aktivatoru. Rezultati iz literature pokazuju da se veće čvrstoće dobijaju korišćenjem aktivatora koji sadrži veću količinu Na₂O i SiO₂ a manju količinu vode [39]. Obzirom na veći broj parametara koje treba uzeti u obzir prilikom određivanja odnosa AA/EP neophodno je sprovesti ekperimentalna ispitivanja BAAEP za određeni tip i poreklo pepela u zavisnosti od njegovog hemijskog sastava i veličine čestica.

4.2. Ispitivanje mogućnosti primene elektrofilterskog pepela iz termoelektrane “Nikola Tesla B” u BAAEP

Kako bi se analizirala mogućnost primene elektrofilterskog pepela iz termoelektrane “Nikola Tesla B” u Obrenovcu kao veziva u BAAEP sprovedeno je eksperimentalno ispitivanje koje se sastoji iz tri faze:

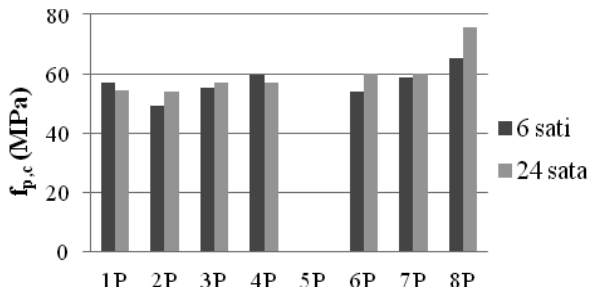
1. Ispitivanje pasti od alkalno aktiviranog elektrofilterskog pepela (PAAEP) radi utvrđivanja uticaja koncentracije alkalnog aktivatora i dužine nege na karakteristike veziva u BAAEP
2. Ispitivanje BAAEP radi utvrđivanja uticaja dodatka vode na ugradljivost i čvrstoću pri pritisku
3. Ispitivanje BAAEP radi utvrđivanja uticaja Na₂O datog kroz maseni odnos Na₂O u aktivatoru i količine elektrofilterskog pepela izraženog u procentima (Na₂O/EP)

Tabela 2. - PAAEP i njihove čvrstoće pri pritisku posle nege na temperaturi od 80oC, šest i 24 sata

	Na ₂ SiO ₃ /NaOH (-)	Na ₂ O/ EP (%)	SiO ₂ / Na ₂ O (-)	f _{p,c,6} (MPa)	f _{p,c,24} (MPa)
1P	2.0	10.72	1.04	57.1	54.3
2P	3.5	10.09	1.30	49.2	53.9
3P	5.0	9.77	1.44	55.3	56.9
4P	10.0	9.34	1.64	59.7	57.0
5P	2.0	12.86	0.87	-	-
6P	3.5	11.51	1.14	53.9	60.2
7P	5.0	10.84	1.30	58.8	59.9
8P	10.0	9.92	1.54	65.4	75.6

Tokom prve faze eksperimenta napravljeno je osam različitih pasti u kojima je variran odnos $\text{Na}_2\text{O}/\text{EP}$ i odnos $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ u aktivatoru (*tabela 2.*). Odnos $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ je variran kombinacijom različitog odnosa vodenog stakla (Na_2SiO_3) i NaOH koncentracije 10M i 16M (M-molarnost rastvora NaOH). Svi uzorci su napravljeni sa odnosom AA/EP od 0.6 i negovani u grejnoj komori na temperaturi od 80°C u trajanju od šest i 24 sata.

Čvrstoće pri pritisku ovih pasti ispitane su na uzorcima 40x40x40mm, 48 sati nakon spravljenja mešavina. Rezultati ispitivanja pokazuju da se najveće čvrstoće pri pritisku dobijaju kod pasti sa najvišim odnosima $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ od 1.54 i 1.64. Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku uzoraka negovanih šest i 24 sata (*sli-*



Slika 6. - Čvrstoća pri pritisku PAAEP sa negom od 6 i 24 sata

i masom elektrofilterskog pepela od 400kg/m^3 . Maksimalna ostvarena čvrstoća pri pritisku je 43.6 MPa pri starosti od 48 sati sa alkalnim aktivatorom koji ima odnos $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=1.64$ i negom od šest sati pri temperaturi od 80°C .

5. UPOREDNA ANALIZA CB, BVSEP I BAAEP

U ovom radu dat je prikaz moguće primene elektrofilterskog pepela kao delimične ili potpune zamene cementa u betonima, sa rezultatima sopstvenih eksperimentalnih istraživanja koja analiziraju moguću primenu pepela iz termoelektrane “Nikola Tesla B” iz Obrenovca u BVSEP i BAAEP. U tabeli 9. dat je uporedni prikaz karakteristika ovih betona sa običnim cementnim betonima uz kvantifikovanje određenih parametara datih u tabeli kao *dobro* (1), *srednje* (2) ili *loše* (3). Kako bi uporedili uticaj na životnu sredinu sve tri vrste betona, analiziran je ekvivalentni CO_2 ($\text{CO}_{2,\text{eq}}$) određen u literaturi [41]. Izvršeno je upoređivanje tri betona sa različitim tipom veziva, i približno istom čvrstoćom pri pritisku i sleganjem: CB (čvrstoće oko 42 MPa) sa 350 kg/m^3 cementa, BVSEP koji ima 192 kg/m^3 cementa i 345.6 kg/m^3 pepela i BAAEP sa 400 kg/m^3 pepela i 240 kg/m^3 alkalnog aktivatora (1C). Za ove betone, $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ respektivno iznose 295.40 kg/m^3 , 162.05 kg/m^3 i 264.01 kg/m^3 . Radi potpunog poređenja određena je i cena vezivnog materijala ove tri vrste betona, i dobijene cene su respektivno 42 €/m^3 ,

21 €m^3 i 30 €m^3 betona. Ako se posmatraju parametri dati u tabeli 9., lako se dolazi do zaključka da su BVSEP u mnogome bolje rešenje nego preostale dve vrste betona. BAAEP su sa aspekta korišćenja otpadnih materijala i nešto manjeg štetnog uticaja na životnu sredinu jedna od alternativa CB, ali veliku prepreku za njihovu širu praktičnu primenu predstavlja neophodno zagrevanje i korišćenje alkalnih aktivatora sa kojima se mora vrlo pažljivo rukovati tokom proizvodnje betona (NaOH je poznatiji kao *živa soda*).

Sa druge strane, tehnologija proizvodnje BVSEP je vrlo slična proizvodnji CB uz iste uslove nege. Uz pra-

Tabela 9. - *Uporedna analiza određenih karakteristika CB, BVSEP i BAAEP*

	CB	BVSEP	BAAEP
Emisija CO ₂	3	1	2
Korišćenje prir. resursa	3	1	2
Ugradljivost betona	1	2	2
Početa čvrstoće ($f_{p,c,3}$)	2	3	1
Konačne čvrstoće ($f_{p,c}$)	1	1	2
Zahtevana nega	1	1	3
Trajnost betona	3	1	1
Moguća primena	1	1	2
Cena	3	1	2
$\Sigma=$	18	12	17

*(1) dobro, (2) srednje, (3) loše

vilno projektovanje BVSEP mogu imati visoke klase čvrstoća i odličnu trajnost, emisija CO₂ je znatno smanjena u odnosu na CB a zamenom najskuplje komponente betona - cementa, jeftinim otpadnim materijalom čijih deponija u Srbiji ima u velikim količinama, cena se znatno smanjuje.

6. ZAKLJUČAK

Sve veća svest i briga za zaštitu životne sredine nameće pravce istraživanja i u oblasti građevinskih materijala. Korišćenje recikliranih i otpadnih materijala, kao i smanjenje korišćenja prirodnih neobnovljivih resursa postali su motivacija za mnoga aktuelna istraživanja. Kako se predviđa sve veća upotreba betona u svetu, sve je veći i pritisak na smanjenje njegovog štetnog uticaja na životnu sredinu. Jedna mogućnost je povećati upotrebu elektrofilterskog pepela i ostalih alternativnih veziva u betonu u budućnosti.

BVSEP pružaju odličnu alternativu CB jer su ekološki prihvatljiviji i sa dobrim fizičko-mehaničkim karakteristikama. BVSEP su primer građevinskog materijala koji je u potpunosti u skladu sa principima održivog razvoja: mali negativan uticaj na životnu sredinu, upotreba otpadnih materijala i velika trajnost. Glavna mana BVSEP su niske početne čvrstoće. Kako bi se ona prevazišla i omogućila nesmetana primena BVSEP u građevinskoj industriji, potrebno je pravilno negovati ove betone i sprečiti

gubitak vode tokom stvaranja početne strukture betona. Obzirom na veliku heterogenost elektrofilterskog pepela i bitno različite karakteristike u zavisnosti od izvora, potrebna su dalja opsežna istraživanja kako bi se ispitala mogućnost primene analitičkih izraza i standarda koji važe za CB. Ovakva istraživanja u Srbiji su od velikog značaja s obzirom na velike količine deponovanog elektrofilterskog pepela koji bi mogao da nađe svoje mesto u betonu. Imajući sve ovo u vidu, ne čudi veliki broj istraživanja koja se trenutno bave BVSEP u cilju prevazilaženja njegovih mana i pravljenja standarda za projektovanje mešavina i konstrukcijskih elemenata od BVSEP. Još jedna potvrda velikog potencijala BVSEP su i mnogi objekti svetu u čijoj izgradnji je korišćen ovaj materijal (*Freedom Tower* u Njujorku, *Burj Khalifa* u Dubaiju, *Cathedral of Christ the Light* u Kaliforniji...).

Istraživanja BAAEP su još uvek na početku a praktična primena konstrukcijskih BAAEP je za sada ograničena na prefabrikovane betonske elemente gde je postupak zagrevanja jedino racionalan. Još uvek nisu u potpunosti jasni svi hemijski i fizički mehanizmi koji se odvijaju prilikom sinteze BAAEP, kao ni veze između karakteristika pepela i alkalnog aktivatora sa fizičko-mehaničkim karakteristikama BAAEP. Potrebno je sprovesti još istraživanja na nivou materijala a posebno na nivou elemenata konstrukcije kako bi se u potpunosti ispitalo ponašanje BAAEP. Zbog velike trajnosti koju ima, očekuje se njegova primena u agresivnim sredinama i kao materijala

za proizvodnju silosa za skladištenje opasnih i toksičnih materijala.

7. ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR 36017 pod nazivom: »Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji«.

8. LITERATURA

- [1] *The cement sustainability initiative*, World Business Council for Sustainable Development, ([http://www.wbcscement.org/pdf/CSIRecycling Concrete-Full Report.pdf](http://www.wbcscement.org/pdf/CSIRecyclingConcrete-FullReport.pdf)), Pristupljeno 09.09.2014., (2009).
- [2] Boden, T.A., Marland, G., Andres, R.J., *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn (2010).
- [3] *Godišnji izveštaj Elektroprivrede Srbije*, (http://www.eps.rs/GodisnjiIzvestaji/Godisnjak%20EPS%202011_sr_web.pdf), Pristupljeno 29.08.2013. (2011).

- [4] Dragaš, J., Marinković, S., Ignjatović, I., Tošić, N., *Geopolimeri na bazi alkalno aktiviranog elektrofilterskog pepela kao novo vezivo u betonu*, Izgradnja 67 (9–10), 275–284, (2013).
- [5] United States Environmental Protection Agency, *Coal Combustion Residual Beneficial Use Evaluation: Fly Ash Concrete and FGD Gypsum Wallboard-Final report*, Februar 2014.
- [6] ASTM C618-12a: *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, 2012.
- [7] Malhotra, V.M., Ramezaniyanpour, A.A., *Fly Ash in Concrete*, Second Edition, CANMET – Canadian Centre for Mineral and Energy Technology, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, (1994).
- [8] Poon, C.S., Lam, L., Wong, Y.L., *A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash*, Cement and Concrete Research 30 447 - 455, (2000).
- [9] Bouzoubaa, N., Fournier, B., *Optimization of fly ash content in concrete Part I: Non-air-entrained concrete made without superplasticizer*, Cement and Concrete Research 33, 1029 – 1037, (2003).
- [10] Bilodeau A., Malhotra, M., *High-Volume Fly ash System: Concrete Solution for Sustainable Development*, ACI Materials Journal, 97, 41-47, (2000).

- [11] Atis, C.D., *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*, Construction and Building Materials 17, 147–152, (2003).
- [12] Mehta, P. K., *Reducing the Environmental Impact of Concrete*, Concrete International, Vol. 23, No. 10, 61-66, (2001).
- [13] Bilodeau, A., Malhotra, V.M., Seabrook, P.T., *Use of high volume fly ash concrete at the Liu centre*, CANMET Materials Technology Laboratory, Canada, January 2001.
- [14] Malhotra, V.M., *High-Performance high-volume fly ash concrete*, Concrete International, 30-34, (2002).
- [15] Quan, H., Kasami, H., *Experimental Study on Effects of Type and Replacement Ratio of Fly Ash on Strength and Durability of Concrete*, The Open Civil Engineering Journal, 7, 93-100, (2013).
- [16] Malhotra, M., *Superplasticized for Structural*, Concrete for International, 12, 28-31, (1986).
- [17] Ravina, D., Mehta, P.K., *Properties of Fresh Concrete Containing Large Amounts of Fly Ash*, Cement and Concrete Research, Vol. 16, No. 6, 227-238, (1986).
- [18] Mehta, K., P. Monteiro., *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3d. ed. New York: McGraw Hill, 2006.
- [19] Huang C., Lin S., Chang C., Chen H., *Mix proportions and mechanical properties of concrete contain-*

- ning very high-volume of Class F fly ash*, Construction and Building Materials (46), 71–78, (2013).
- [20] Bouzoubaa, N., Lachemi, M., *Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash Preliminary results*, Cement and Concrete Research 31, 413- 420, (2001).
- [21] Tokyay, M., *Strength prediction of fly ash concretes by accelerated testing*, Cement and Concrete Research 29, 1737–1741, (1999).
- [22] Oner, A., Akyuz, T, S., Yildiz, R., *An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete*, Cement and Concrete Research 35, 1165 – 1171, (2005).
- [23] Jiang, L.H., Malhotra, V.M., *Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash*, Cement and Concrete Research 30, 1785 – 1789, (2000).
- [24] EN 450-1: 2012 - Fly ash for concrete – Definition, specifications and conformity criteria, CEN.
- [25] Provis, J.L., van Deventer J.S.J, *Alkali-activated materials: State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM. Springer/RILEM, Berlin, (2013).
- [26] Petermann, J.C.; Saeed, A., Hammond, M.I., *Alkali-activated geopolymers: a literature review*, Applied Research Associates, Panama City, (2010).
- [27] Fernandez-Jimenez A., Garcia-Lodeiro I., Palomo A., *Durability of Alkali-Activated Fly Ash Ce-*

- mentitious Materials*, J. Mater. Sci., 42, 3055-3065, (2007).
- [28] Davidovits, J., *Chemistry of geopolymeric systems, terminology*, Geopolymere, 99: 9-39, (1999).
- [29] Djwantoro H., Wallah S. E., Sumajouw M. J., Rangan B., *On the Development of Fly Ash-Based, Geopolymer Concrete*, ACI Mater. J., V. 101, No. 6, (2004).
- [30] Palomo, A., Grutzeck, M., et al., *Alkali-activated fly ashes: a cement for the future*, Cement and Concrete Research 29(8): 1323-1329, (1999).
- [31] Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Criado M., *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model*, Cement and Concrete Research, 35, 1204–1209, (2005).
- [32] Criado M., Palomo A., Fernandez-Jimenez A., *Alkali activation of fly ashes. Part I: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products*, Fuel, 84: 2048–2054, (2005).
- [33] Kovalchuk G., Fernandez-Jimenez A., Palomo A., *Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II*, Fuel, 86: 315–322, (2007).
- [34] Criado M., Fernandez Jimenez A., Palomo A., *Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description*, Fuel, 89: 3185–319,(2010).
- [35] Malolepszy, J., Deja, J., Brylicki, W.: *Industrial application of slag alkaline concretes*. In: Krivle-

- nko, P.V., (ed) Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine. Vol. 2, pp. 989-1001. VIPOL Stock Company, (1994).
- [36] van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Feng, D. and Duxson, P.: *The role of mineral processing in the development of cement with low carbon emissions*. In: XXV International Mineral Processing Congress (IMPC), Brisbane, Australia. pp. 2771-2781. AusIMM, (2010).
- [37] Ahmed, Y.H., Buenfled, N.R.: *An investigation of ground granulated blast furnace slag as a toxic waste solidification/stabilization reagent*. Environ. Eng. Sci. 14(2), 113-132, (1997).
- [38] A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, *Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator*, Cement and Concrete Research 35, 1984 – 1992, (2005).
- [39] Djwantoro, H., PhD Thesis: *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, (2005).
- [40] Nedeljković, M., *Konstruktivski geopolimer betoni na bazi alkalno aktiviranog elektrofilterskog pepela*, Master rad, Građevinski fakultete Univerziteta u Beogradu, 2014.
- [41] Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J.B., Roussel, N., *An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends*, Journal of Cleaner Production, 19: 1229-1238, (2011).