

**TRAJNOST BETONSKIH KOMPOZITA SA VISOKIM UDELOM POLJOPRIVREDNOG
OTPADA****DURABILITY OF CONCRETE COMPOSITES WITH A HIGH PROPORTION OF
AGRICULTURAL WASTE**Filip Sajdl, Slobodan Šupić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAĐEVINARSTVO**

Kratak sadržaj – U okviru rada urađeno je sopstveno eksperimentalno istraživanje mogućnosti primene pepela kukuruznog oklaska kao zamenjujućeg cementnog materijala pri projektovanju i spravljanju zelenih betona. Rad se sastoji od istraživačkog i od praktičnog dela. U okviru istraživačkog dela su obuhvaćena svojstva koja utiču na trajnost betona, projektovanje trajnosti prema normama za beton EN 206 kao i zahtevi za trajnost betona. U praktičnom delu se govori o potrebi za održivom gradnjom, kao i o mogućnostima primere raznih otpadnih materijala. Posebno je posvećena pažnja na primenu pepela kukuruznog oklaska kao zamene za cement u betonu, što je i glavna tema ovog rada. Urađena je karakterizacija materijala, kao i ispitivanje svojstava svežeg i očvrstlog betona.

Gljučne reči: Beton, trajnost, otpadni materijali, karakterizacija, čvrstoća, habanje, poljoprivredni otpad.

Abstract – As part of the paper, an own experimental research on the possibility of using corn cob ash as a replacing cement material in the design and production of green concrete was conducted. This thesis consists of a research and a practical part. The research part includes the properties that affect the durability of concrete, the design of durability according to the EN 206 concrete standards, as well as the requirements for the durability of concrete. The practical part refers to the need for sustainable construction, as well as the possibilities of using various waste materials. Special attention was paid to the use of corn cob ash as a substitute for cement in concrete, which is the main topic of this paper. The characterization of the material was carried out, as well as the testing of the properties of fresh and hardened concrete.

Keywords: Concrete, durability, waste materials, characterization, strength, wear resistance, agricultural waste.

1. TRAJNOST BETONA

Projektovanje trajnosti je bazirano na evropskoj normi EN206 u kojoj su definisane klase izloženosti za opisivanje delovanja okoline. Elementi AB konstrukcija se, za planirani životni vek, svrstavaju u odgovarajuće klase izloženosti.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Slobodan Šupić, docent.

Na osnovu definisanih klasa izloženosti, postavljaju se zahtevi za projektovanje sastava betona: najmanja količina cementa, najveći vodocementni faktor, najmanja klasa čvrstoće betona pri pritisku, najmanja debljina zaštitnog sloja betona a zatim i vrstom komponentnih materijala i ostalih parametara (količina uvučenog vazduha itd.).

Da bi se trajnost konstrukcije i pojedinih njenih elemenata obezbedila, pored definisanja klasa izloženosti i, spram njih, graničnih vrednosti za: najveći vodocementni faktor, najmanju količinu cementa, najmanju klasu čvrstoće pri pritisku i najmanju vrednost zaštitnog sloja betona, potrebno je specificirati i proveriti i određeni broj svojstava betona, koja su direktno povezana sa trajnošću.

To su:

- ❖ Otpornost na prodiranje vode
- ❖ Otpornost na dejstvo mraza
- ❖ Otpornost na kombinovano dejstvo mraza i soli
- ❖ Otpornost na prodiranje hlor jona u beton
- ❖ Otpornost na habanje.

**2 PEPEO ŽETVENIH OSTATAKA KAO
NUSPRODUKT POLJOPRIVREDNE
PROIZVODNJE**

Danas se u svetu upotrebljavaju različiti nus-proizvodi generisani iz industrijskih, post-potrošačkih, kao i poljoprivrednih izvora. Biomasa, kao najčešći oblik obnovljive energije, je u širokoj upotrebi u nerazvijenim zemljama, ali značajno manje nego u razvijenom delu svetu. Pod terminom „biomasa“ se podrazumevaju proizvodi, otpadne materije i ostaci organskog porekla (biljnog i životinjskog), koji su biorazgradljivi i predstavljaju sporedni proizvod iz poljoprivredne proizvodnje, procesa prerade drveta ili su otpadni materijali iz industrije ili predstavljaju gradski otpad. Najvažniji ostaci poljoprivredne proizvodnje u svetu su: šećerna trska, ljuska od pirinča, jutana vlakna, kokosove ljuske, pamuk, pšenična slama, sojina slama, ljuska od suncokreta itd. Biomasa je najveći obnovljivi izvor energije, a Srbija se nalazi pri vrhu rang liste evropskih zemalja po količini raspoložive, ali neiskorištene biomase.

2.1 Pepeo kukuruznog oklaska

Prethodna istraživanja su pokazala da pepeo kukuruznog oklaska (PKO) sadrži više od 65% SiO₂, a kumulativno sa Al₂O₃ više od 70%, tako da se može koristiti kao materijal sa pucolanskim svojstvima.

Pepeo od kukuruznog oklaska se u građevinarstvu koristi kao sastojak nekih građevinskih materijala. Neki od primera su:

1.Beton: može se dodati u smesu betona kako bi se smanjila proizvodnja cementa potrebnog za njegovo spravljanje.

2.Malter: može se dodati u malter kako bi se poboljšala njegova sposobnost zadržavanja vode i smanjila potreba za dodatnim vezivima.

3.Keramika: koristi se u proizvodnji keremike jer može smanjiti količinu gline potrebne za proizvodnju i smanjiti emisije CO₂ tokom proizvodnje.

4.Staklo: koristi se u proizvodnji stakla kako bi se smanjila temperatura potrebna za proizvodnju.



Slika 1 - Izgled samlevenog biopepeo

3 KARAKTERIZACIJA MATERIJALA

3.1 Podaci o komponentnim materijalima

Cement

Za eksperimentalno istraživanje odabran je Portland cement oznake PC 42,5R (CEM I 42,5R), porekla – fabrika cementa "Lafarge", Beočinska fabrika cementa. Cement ispunjava uslove kvaliteta prema Pravilniku o kvalitetu cementa. U Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala proverena su osnovna fizička i mehanička svojstva cementa prema standardima SRPS EN 196-1, SRPS EN 196-3 i SRPS EN 196-6.

Agregat

Pri projektovanju sastava malterskih mešavina korišćen je standardni kvarcni pesak (CEN) – tip agregata 1. Granulometrijski sastav određen je metodom prosejavanja, u skladu sa SRPS EN 933-2.

Mineralni dodaci (biopepeo)

Nakon pripreme uzoraka biopepeo, ispitana su njihova fizička svojstva: specifična masa, specifična površina po Blenu, te mehanička i pucolanska svojstva: klasa pucolanske aktivnosti i indeks aktivnosti, prema relevantnim standardima. Ispitivanje indeksa aktivnosti je prikazano na Slici 2.

Vrednosti indeksa aktivnosti, pri starostima 28 i 90 dana iznose: 113% i 115%, respektivno. Može se primetiti da je čvrstoća maltera u kojem je 25% cementa supstituisano sa biopepelom prešla čvrstoću referentnog cementnog maltera, što je rezultat filer efekta (pakovanje sitnih čestica pepela u strukturi maltera) i pucolanske aktivnosti samog materijala tokom vremena.

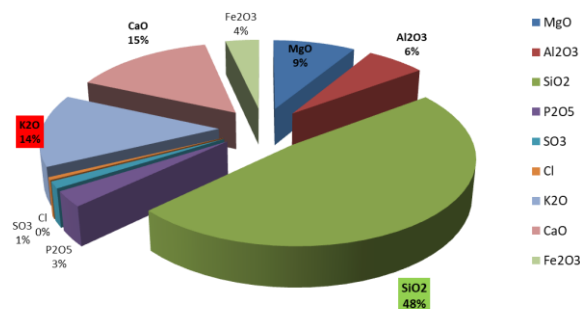


Slika 2 - Ispitivanje indeksa aktivnosti biopepeo

Finoća materijala je određena kao procentualni ostatak biopepeo na situ 0,045mm. U ovom postupku ispitivanja – „Air Jet“ metodom prosejavanja (prosejavanje vazдушnim putem pod pritiskom) u skladu sa procedurom datom u standardu EN 933-10 – 50g materijala, prethodno osušenog na 110 °C, se prosejava na situ, počevši od sita sa najmanjim otvorom (0,045mm), te se određuje procentualni ostatak na situ.

Imajući u vidu jako mali procentualni ostatak na situ otvora 45mm, ovim je potvrđena jako velika finoća mliva materijala.

Ispitivanje hemijskog sastava biopepeo, određivanje sadržaja reaktivnog SiO₂, slobodnog CaO, rastvorljivih fosfata, hlorida i elemenata u tragovima, urađeno je u skladu sa standardima: EN 196-2 i ISO 29581-2. Rezultati su dati na Slici 3.



Slika 3 - Hemijski sastav biopepeo

4 PROJEKTOVANJE SASTAVA, SPRAVLJANJE I ISPITIVANJE SVOJSTAVA EKOLOŠKIH CEMENTNIH BETONA

4.1 Projektovanje sastava

Za potrebe ispitivanja projektovane su 4 betonske mešavine:

1. C – referentna betonska mešavina sa 0% udela biopepeo
2. B10 – betonska mešavina u kojoj je 10% cementa supstituisano biopepelom
3. B30 – betonska mešavina u kojoj je 30% cementa supstituisano biopepelom
4. B50 – betonska mešavina u kojoj je 50% cementa supstituisano biopepelom

Kao sitni agregat korišćen je rečni agregat, dok je za krupni korišćen reciklirani agregat od starog betona; frakcije 4/8mm i 8/16mm.

Korišćen je tip cementa: CEM I 42,5R, $Y_{s,c}=3100 \text{ kg/m}^3$ i voda iz gradskog vodovoda.

Za sve betonske mešavine je usvojen vodocementni faktor u vrednosti $w=0,45$.

4.2 Spravljanje

Spravljanje betonskih mešavina izvršeno je u laboratorijskoj mešalici za beton. Kod svih receptura sa recikliranim agregatom, 24h pre spravljanja betona, izvršeno je kvašenje agregata količinom vode (dodatna voda) koju agregat može da upije u periodu od 24h.



Slika 4 - Dodavanje komponenti u mešalicu

4.3 Ispitivanje svojstava betona

4.3.1 Konzistencija

Nakon merenja temperature svežeg betona, određivana je konzistencija (metodom sleganja), a zatim je beton ugrađivan u metalne kalupe (oblika kocke). Ugrađivanje je za uzorke oblika kocki rađeno vibriranjem na vibrostolu u trajanju od 30 sekundi.

4.3.2 Zapreminska masa

Zapreminska masa svežeg betona ispitana je prema standardu SRPS ISO 6276 za svaku vrstu betona.

Dobijeni su sledeći rezultati: **C** –2240kg/m³; **B10** –2255kg/m³; **B30** –2243kg/m³; **B50** –2239kg/m³

Sa povećanjem udela pepela, kao zamene dela cementa, sveža betonska mešavina je bila kruća (teže pokretljiva), sa manjom vrednošću sleganja. U cilju dobijanja betona iste konzistencije, povećan je udeo superplastifikatora kod mešavina sa 30 i 50% nivoima supstitucije.

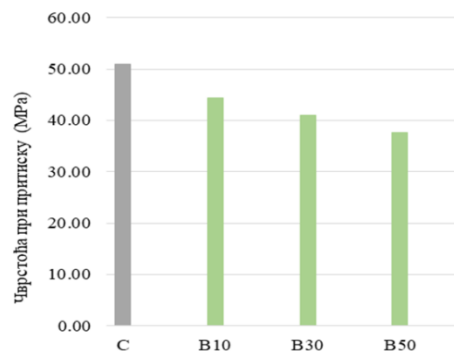
Zamena cementa sa biopepelom nije imala značajan uticaj na zapreminsku masu betona, bez obzira na nivo supstitucije cementa. Razlike u zapreminskoj masi su manje od 5%.

4.3.3 Čvrstoća betona pri pritisku

Ispitivanje čvrstoće betona pri pritisku je obavljeno prema standardu SRPS EN 12390-3 na uzorcima oblika kocke ivice 15cm pri starostima 28 dana, a reprezentativna čvrstoća je određena kao srednja vrednost čvrstoća dobijenih na tri uzorka, za svaku vrstu betona.

Kako se sadržaj biopepela povećavao, pritisna čvrstoća betona je postepeno opadala do nivoa zamene od 50%, što bi se moglo pripisati "dilution" efektu, posebno na višim nivoima zamene (manje čestica cementa dostupnih za

hidrataciju, smanjen broj proizvoda hidratacije i povećana poroznost i propustljivost mešavine).

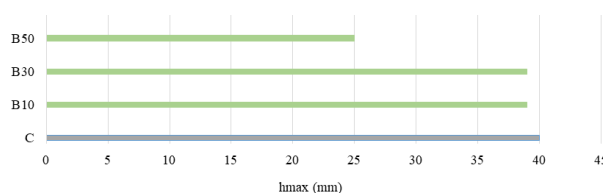


Slika 5 - Čvrstoća pri pritisku

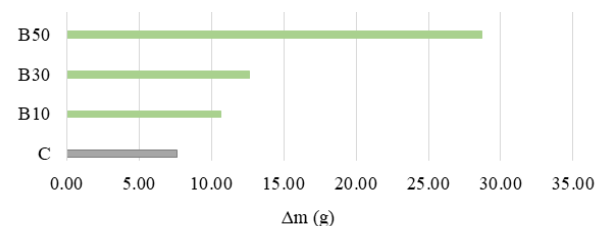
S obzirom na to da su sve vrste betona postigla klasu čvrstoće jednaku ili veću od C30/37, koja se pretežno koristi u savremenom građevinarstvu u Srbiji, može se konstatovati da se konstrukcijski beton može proizvesti korišćenjem velike količine biopepela kao zamene za cement. Pored toga, pucolanska reaktivnost biopepela može značajno doprineti postizanju čvrstoće pri pritisku u kasnijem periodu.

4.3.4 Vodonepropustljivost

Ispitivanje vodonepropustljivosti betona je sprovedeno prema EN 12390-8. Za ispitivanje su korišteni uzorci oblika kocke ivice 150mm. Starost betona na dan ispitivanja je bila 60 dana.



Slika 6 - Dubine prodora vode



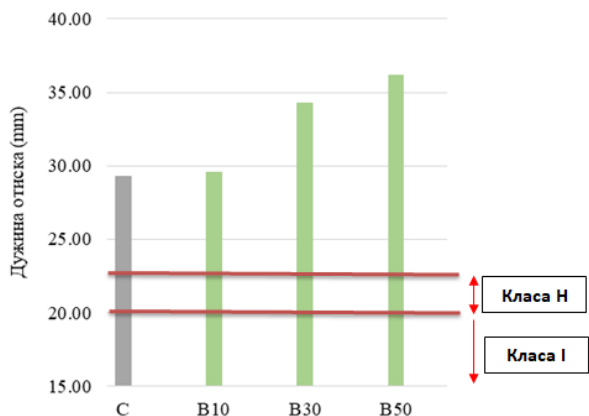
Slika 7 - Srednje vrednosti mase upijene vode

Rezultati ukazuju na kontinuirano opadajući trend dubine prodiranja vode pod pritiskom mešanog betona sa biopepelom i, istovremeno, na veću brzinu upijanja vode. Takav trend se može objasniti efektom punila i pucolanskim svojstvima ugrađenih alternativnih cementnih materijala. Imajući u vidu efekat punila, fine čestice biopepela deluju kao mikro agregati, ispunjavajući praznine u vezivnoj matrici i povećavajući kompaktnost betonske strukture, što dovodi do sporijeg prodiranja vode – Slika 6. S druge strane, usled "dilution" efekta i produžene pucolanske reakcije, do starosti od 28 dana stvara se manja količina produkata hidratacije. Kao rezultat toga, beton karakteriše veća kapilarna poroznost, što dovodi do veće apsorpcije vode kod betona sa

biopepelom – Slika 7. U kasnijem periodu, dodatni C-S-H gel koji nastaje kao rezultat pucolanske reakcije mogao bi da pomogne u popunjavanju pora, smanjujući propustljivost i na taj način smanjujući upijanje vode.

4.3.5 Otpornost na habanje

Otpornost betona na habanje je ispitana na uzorcima oblika kvadra, dužine 150mm, dimenzija poprečnog preseka 50x50mm. Ispitivanje je izvršeno pri starosti betona od 60 dana, prema metodi 'širokog točka', standard: EN1338. Test se zasniva na izlaganju podužne spoljašnje strane elementa abrazivnom dejstvu materijala (kvarcnog peska).



Slika 8 - Dužine otisaka svih betona

Što se tiče uticaja biopepela na otpornost betona na habanje, sa povećanjem sadržaja pepela biomase povećava se širina otiska točka. Ovo je verovatno zbog još ranog stadijuma pucolanske aktivnosti ovog tipa biopepela u vremenu ispitivanja, odnosno poroznije i nedovoljno zbijene betonske strukture.

S obzirom na postignute klase otpornosti na habanje, u skladu sa EN 1338, može se konstatovati da svi ispitivani betoni ne ispunjavaju kriterijume za deklarisanu klasu sa performansama, već prevaizlaze gornju granicu za klasu H. Budući da se i referentni beton i betoni sa biopepelom kategoriju u klasu F, može se zaključiti da PKO ne utiče u velikoj meri na otpornost betona na habanje.

5 ZAKLJUČAK

Predmet rada jeste istraživanje mogućnosti primene pepela kukuruznog oklaska kao zamenjujućeg cementnog materijala pri projektovanju i spravljanju održivijih, zelenih betona 21. veka. Prema rezultatima sopstvenog eksperimentalnog istraživanja, izvedeni su sledeći zaključci:

- ❖ Ispitivan pepeo kukuruznog oklaska je obećavajući pucolanski materijal, zbog visokog sadržaja amorfnog silicijum dioksida i zadovoljavajućeg nivoa finoće.
- ❖ Kao rezultat visokog sadržaja amorfnog silicijum dioksida, pepeo ispunjava uslove za pozitivnu klasu pucolanske aktivnosti. Dodatno, kao posledica efikasnog mlevenja materijala i povećanja finoće mliva, pospešuje se i filer efekat: čestice biopepela su sutnije (finije) od cementa, što dovodi do optimiziranog pakovanja u strukturi maltera i betona. Ovo je potvrđeno i ispitivanjem indeksa aktivnosti.
- ❖ Usled "dilution" efekta i rane faze pucolanske reakcije nakon 28 dana, pritiska čvrstoća betona koji sadrže

biopepeo postepeno se smanjivala u odnosu na referentni beton. Međutim, 50% biopepela je obezbedilo zadovoljavajuće performanse, ispunjavajući klasu betona za konstrukcijske primene.

- ❖ Zamena cementa sa biopepelom je doprinela manjoj dubini prodiranja vode pod pritiskom, posebno pri višim nivoima supstitucije. Ovo se može pripisati većoj kompaktnosti betona koji sadrže veliki udeo finih čestica i većoj sposobnosti zadržavanja vode.
- ❖ S obzirom da svi betoni pripadaju istoj klasi otpornosti na habanje, može se primetiti da biopepeo nema značajan uticaj na ovo svojstvo betona.

Fino mleveni biopepeo može se koristiti kao zamena cementa u proizvodnji betona, do 50% zamenskog nivoa, bez većeg ugrožavanja njegovih fizičko-mehaničkih svojstava. Ovim se postižu sledeći benefiti:

- ✓ Manji utrošak cementa, kao najskuplje komponente betona, tj. ekonomski benefiti,
- ✓ Manja emisija polutanata koji potiču od procesa proizvodnje portland-cementnog klinkera, naročito CO₂,
- ✓ Održivo korišćenje otpada, tj. oslobađanje vrednog građevinskog i/ili poljoprivrednog zemljišta od deponovanog materijala.

6 LITERATURA

- [1] SRPS EN 196-1: Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2008.
- [2] SRPS EN 196-6: Metode ispitivanja cementa — Deo 6: Određivanje finoće mliva. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2011.
- [3] SRPS EN 197-1: Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cimente. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
- [4] EN 196-2:2013: Method of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement.
- [5] EN 450-1: Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria.
- [6] SRPS EN 12350-2:2010: Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja.
- [7] SRPS ISO 6276:1997: Beton - Zbijeni sveži beton - Određivanje zapreminske mase.

Kratka biografija:



Filip Sajdl rođen je u Novom Sadu 30.01.1999. god. Od 2023. po završetku osnovnih studija, radi kao nadzor za konstrukcijske objekte u »Utiber« u Novom Sadu.

Kontakt: filipsajdl51@gmail.com



Slobodan Šupić rođen je 1989. godine u Trebinju. Od 2020. radi kao docent na Departmanu za građevinarstvo i geodeziju, uža naučna oblast: Građevinski materijali, procjena stanja i sanacija konstrukcija.