

PILOT PROJEKT – RECIKLIRANJE MULJA S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U BETONSKIM PROIZVODIMA S PRIMJENOM U VODNOM GOSPODARSTVU

dr. sc. Domagoj Nakić, mag. ing. aedif.

WYG savjetovanje d.o.o.

Ulica grada Vukovara 269 G, 10000, Zagreb

domagoj.nakic@wyg-c.eu

doc. dr. sc. Dražen Vouk, dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet

Sveučilišta u Zagrebu

Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Suzana Hozmec, dipl. ing. građ.

Beton Lučko d.o.o.

10250, Lučko, Zagreb

prof. dr. sc. Nina Štirmer, dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet

Sveučilišta u Zagrebu

Kačićeva 26, 10000 Zagreb

S obzirom na pozitivne rezultate laboratorijskih ispitivanja mogućnosti korištenja pepela dobivenog spaljivanjem mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) kao zamjene za cement, javila se potreba za daljnjim ispitivanjima u proizvodnji betonskih proizvoda u stvarnoj veličini. Pilot projekt rezultat je suradnje Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i tvrtke Beton Lučko d.o.o. Pepeo dobiven spaljivanjem mulja u kontroliranim laboratorijskim uvjetima korišten je kao zamjena za 10 % cementa u šesterokutnim prizmama s direktnom primjenom u području vodnog gospodarstva. Na ovaj se način direktno zatvara krug u ostvarenju temeljnih postavki cirkularne ekonomije, budući da se pepeo koji nastaje kao nusproizvod spaljivanjem mulja generiranog pročišćavanjem otpadnih voda primjenjuje u betonskim proizvodima korištenim, između ostalog, i u izgradnji objekata vodnog gospodarstva. U radu su dani kemijski sastavi dobivenih pepela, potencijalni utjecaji na okoliš ispitivani kroz izluživanje, iz pepela i iz betona s ugrađenim pepelom te rezultati ispitivanja tehničkih zahtjeva za gotove betonske proizvode prema normama definiranim zahtjevima i ustaljenoj praksi u partnerskoj tvrtki.

Ključne riječi: uređaj za pročišćavanje otpadnih voda, mulj, pepeo, vodno gospodarstvo, beton

1. UVOD

Problematika vezana uz pročišćavanje otpadnih voda postala je izrazito aktualna na svjetskoj razini u posljednjih 20 – 30 godina, a posebice u zemljama u razvoju kakva je i Hrvatska. Navedeno je, u prvom redu, posljedica preuzimanja strožih zakonskih obveza s ciljem ispunjavanja zahtjeva Europske unije. Iako pročišćavanje otpadnih voda predstavlja povoljno djelovanje na okoliš, kroz razne fizikalne (taloženje), kemijske (koagulacija, flokulacija) i biološke (mikrobiološka aktivnost) procese generiraju se značajne količine mulja koji zahtijeva daljnje zbrinjavanje u skladu sa strogom zakonskom regulativom. Mulj je složenog sastava i predstavlja disperziju organskih i anorganskih tvari u vodi, a može sadržavati

i patogene mikroorganizme, parazite, viruse te brojne potencijalno toksične elemente i spojeve (teške metale i dr.). S obzirom na dosadašnju svjetsku praksu, može se izdvojiti veći broj različitih, a tehnički ispravnih i mogućih rješenja problema zbrinjavanja mulja: u poljoprivredi, na nepoljoprivrednim površinama (krajbrazje, hortikultura), odlaganje na odlagalištima, korištenje u funkciji poboljšanja tla, zapunjavanje rovova i rudarskih okana, razni postupci termičke obrade uz daljnje odlaganje i/ili korištenje generiranog pepela i dr. Prema nekim procjenama godišnje se na razini EU generira više od 11.5 Mt suhe tvari (ST) mulja, a očekuje se da će ova brojka narasti do razine iznad 13 Mt ST do 2020. godine (Millieu Ltd., 2010.). U Hrvatskoj se, nažalost, mulj još uvijek

najvećim dijelom odlaže na odlagalištima krutog otpada i na druge, često neodgovarajuće i nedopuštene načine. Intenzivnom izgradnjom UPOV-a u Hrvatskoj, sukladno obvezama prema EU, do 2021. godine u pogonu bi trebali biti UPOV-i s ukupnim kapacitetom oko 4.300.000 ES (Plan upravljanja vodnim područjima 2016. – 2021.), što će rezultirati generiranjem ukupne količine mulja oko 86.000 t ST godišnje. Navedene količine mulja rast će i nakon 2021. godine s daljnjom izgradnjom UPOV-a manjih od 10.000 ES.

Spaljivanjem mulja, kao jednim od potencijalnih rješenja zbrinjavanja mulja, u značajnoj se mjeri smanjuju njegova masa (do 85 %) i volumen (do 90 %) (Lynn et al., 2015.). Nadalje, spaljivanjem se uništava opasna organska komponenta mulja te se minimiziraju problemi vezani uz emisije neugodnih mirisa (Tantawy et al., 2012.). Iako u Hrvatskoj do danas ne postoji niti jedno postrojenje za termičku obradu mulja s UPOV-a, neke prethodno izrađene studijske analize upućivale su na zaključak o izgradnji 4 – 5 regionalnih spalionica mulja. Iako se u novodonesenom Planu gospodarenja otpadom prvenstvo u postupcima zbrinjavanja mulja daje materijalnoj uporabi i primjeni na „površinama pogodnima za primjenu mulja“, u praksi se nije ni započelo s rješavanjem navedenog problema.

U slučaju odabira nekog od postupaka termičke obrade mulja (primjerice spaljivanja u monospalionicama) i dalje će se generirati značajne količine pepela koji je potrebno zbrinuti. Budući da Europska direktiva 91/271/EEC zahtjeva da se postupci zbrinjavanja mulja provode u skladu sa zahtjevima za recikliranjem potencijalnih resursa bez narušavanja zdravlja ljudi i stanja okoliša uslijed zagađenja štetnim i opasnim tvarima i spojevima, odlaganje pepela na odlagališta ne smatra se održivim rješenjem, te se, na temelju brojnih istraživanja na svjetskoj razini, javlja mogućnost njegova korištenja u proizvodnji građevnih proizvoda, posebice u betonskoj industriji.

Proizvodnja običnog portlandskog cementa rezultira generiranjem u prosjeku 842 kg CO₂/t proizvedenog klinkera, što posebice dobiva na važnosti ako se u obzir uzme činjenica da oko 6 % ukupnih globalnih emisija stakleničkih plinova otpada na proizvodnju cementa, a sve usprkos činjenici o značajnim naporima koji se na svjetskoj razini ulažu u poboljšanje učinkovitosti (Scrivener et al., 2016.). S obzirom na svojstva i kemijski sastav, dobiveni pepeo se u betonu može koristiti dvostruko, kao inertno punilo zamjenjujući dio pijeska i/ili finog agregata ili kao pucolanski aktivan materijal zamjenjujući određeni udio cementa (Chen i Poon, 2017.; Cyr et al., 2007; Donatello i Cheeseman, 2013; Jamshidi et al., 2011., Lynn et al., 2015., Naamane et al., 2015; Vouk et al., 2016 a., Vouk et al., 2016 b.).

S obzirom na pozitivna iskustva u ispitivanju mogućnosti primjene pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV-a u Hrvatskoj u cementnom mortu i betonu kroz laboratorijska ispitivanja u okviru projekta RESCUE (Nakić et al., 2017; Vouk et al., 2015; Vouk et al., 2016

a; Vouk et al., 2016 b) u ovom će se radu dati prikaz prvih rezultata dobivenih ispitivanjima na elementima proizvedenima u stvarnoj veličini i uvjetima. Osnovni je cilj provođenja pilot projekta ispitati mogućnosti korištenja pepela u betonskoj industriji u stvarnoj proizvodnji („*real scale*“), čime se cjelokupnom prethodno opisanom eksperimentalnom dijelu istraživanja daje nova dimenzija. Pozitivni rezultati provođenja pilot projekta svakako mogu poslužiti kao dodatni motiv svim zainteresiranim dionicima u eventualnoj kasnijoj primjeni pepela u proizvodnji betonskih proizvoda u praksi.

2. KORIŠTENI MATERIJALI I METODOLOGIJA

Za potrebe ovog istraživanja prikupljen je stabiliziran i dehidriran mulj s UPOV-a u Zagrebu s oko 30 – 35 % ST te solidificirani mulj (neutral, odnosno produkt obrade mulja posebnom patentiranom MID-MIX[®] tehnologijom) s UPOV-a u Koprivnici s udjelom ST iznad 90 %. Mulj s UPOV-a Zagreb sušen je u laboratorijskom uvjetima do razine iznad 90 % ST na temperaturi od 105 °C. Oba mulja su potom podvrgnuta termičkoj obradi u električnoj laboratorijskoj peći u trajanju 2.5 h pri temperaturi 850 °C. Potreba za termičkom obradom neutrala (mulja s UPOV-a u Koprivnici), koji u realnim uvjetima vjerojatno ne bi bilo ekonomično spaljivati, prvenstveno uslijed njegove znatno niže kalorijske vrijednosti, leži u činjenici da prethodno provedenim laboratorijskim ispitivanjima, kada je korišten sam neutral (bez termičke obrade), nisu postignuti željeni rezultati. Drugim rječima, u konkretnom je slučaju korištenja neutrala primjenjena dodatna termička obrada kako bi se razgradila cjelokupna zaostala organska komponenta za koju se ocjenjuje da predstavlja osnovno ograničenje opisanoj primjeni.

Dodatno su dobivene granule pepela samljevene korištenjem laboratorijskog mlina kako bi se dobio fini praškasti materijal usporediv s pepelom iz spalionica mulja koje koriste tehnologiju s izgaranjem u vrtložnom sloju.

Dobivenim pepelima određena je gustoća prema postupku određivanja gustoće cementa (ASTM C-188) kako bi se osigurali svi potrebni podaci za proračun sastava betona. Kemijski sastav uzoraka pepela određen je korištenjem spektrometrije optičke emisije induktivno spregnutom plazmom (ICP-OES) prema normi HRN EN ISO 11885:2010.

Testovi izluživanja korišteni su kao metoda za utvrđivanje mogućnosti iznošenja pojedinih potencijalno opasnih elemenata i spojeva pri dugogodišnjoj izloženosti materijala (otpada) djelovanju vode, što je posebice važno ukoliko se otpad zbrinjava na odlagalištima ili koristi za proizvodnju novog proizvoda. Testovi izluživanja provedeni su prema normi HRN EN 12457-2 koristeći tzv. šaržni test izluživanja (engl. *batch leaching test*). Na temelju dobivenih rezultata analizirani pepeo klasificiran je prema graničnim vrijednostima pojedinih kategorija

otpada (eng. *waste acceptance criteria* – WAC) propisanih u sklopu EU direktive o odlagalištima otpada (1999/31/EZ) i preuzetim u nacionalnom Pravilniku o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 114/15). Na isti je način ispitano izluživanje i provedena klasifikacija krhotina betona s ugrađenim 10 %-tnim udjelima pepela.

Pri spravljanju betona korišten je miješani portlandski cement CEM II/B-M (S-V) 42.5N, prirodni i drobljeni agregat, aditiv te vodovodna voda. Mješavine su pripravljene u automatiziranoj miješalici uobičajenim postupkom koji se koristi u pogonu tvrtke Beton Lučko d.o.o. u količini od 0.5 m³ (što je bilo dovoljno za proizvodnju 25 šesterokutnih prizmi sa svakim od korištenih pepela). Svaki od pepela korišten je kao zamjena za 10 % cementa (slika 1) u proizvodnji odabranog betonskog elementa – šesterokutne prizme. Beton je, potom, uz vibriranje, hidrauličkom prešom ugrađen u standardne kalupe. Oblikovani betonski elementi ostavljeni su da dozrijevaju u okolišnim uvjetima tijekom 28 dana.



Slika 1: Dodavanje pepela u postupku miješanja betona za izradu šesterokutnih prizmi



Slika 2: Primjeri korištenja šesterokutne prizme u praksi – za oblaganje otvorenih kanala

Odabrani element služi za oblaganje pokosa kanala (slika 2), ali obzirom na svoju izuzetnu čvrstoću i visinu pogoduje i kao element za popločavanje teško opterećenih prometnica, brodskih pristaništa i javnih parkirališta. Uobičajeno se izrađuje u dvije visine (10 i 20 cm), a s obzirom na ograničene količine dostupnog pepela, za provođenje pilot projekta odabrana je prizma s visinom 10 cm, isključivo zbog manjih potrebnih količina pepela.

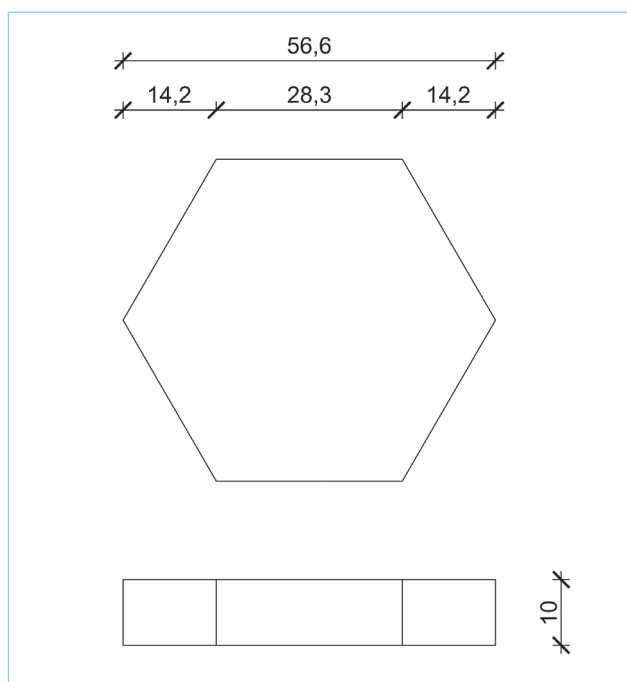
Potrebno je naglasiti da se šesterokutna prizma izrađuje iz dva sloja betona: osnovni ili nosivi sloj u debljini 9 cm i završni sloj u debljini oko 1 cm. Pepeo

Tablica 1: Primjer projektiranog sastava betona s 10 %-tnim udjelom pepela iz mulja s UPOV-a u Zagrebu

Šesterokutna prizma – 10 % pepela iz mulja s UPOV-a u Zagrebu						
Materijal		Masa [kg]	Gustoća [kg/dm ³]	Volumen [dm ³]	Masa za 500 dm ³ [kg]	
Cement CEM II/B-M (S-V) 42.5N		240	3.01	79.73	120	
Pepeo (10 %)		24	2.68	8.96	12	
Voda		84.48	1.00	84.48	42.24	
v/c	0.32	-	-	-	-	
Zrak	0.05	-	-	50	-	
Aditiv 0.6 %		1.58	1.06	1.49	0.79	
Agregat	0 – 4 prir.	30 %	618.72	2.66	232.60	309.36
	0 – 4 drob.	25 %	521.41	2.69	193.83	260.71
	4 – 8 drob.	20 %	435.74	2.81	155.07	217.87
	8 – 16 drob.	25 %	507.85	2.62	193.83	253.92
UKUPNO		2433.78	2.69	1000	1216.89	

je korišten kao zamjena za dio cementa isključivo u osnovnom (nosivom) sloju koji predstavlja veći dio samog elementa. Primjer projektiranog sastava betona, s 10 %-tnim udjelom pepela, za izradu šesterokutne prizme dan je u [tablici 1](#), a detaljni prikazi odabranog elementa dani su na [slici 3](#).

Uzorci za provedbu potrebnih ispitivanja uzeti su iz gotovih proizvoda betonske galanterije metodom slučajnog odabira pri starosti 28 dana. Za potrebe ispitivanja uzorkovano je ukupno osam betonskih opločnika (prizmi) u skladu s normama HRN EN 1339:2004 i HRN EN 1339:2004/AC:2007.



Slika 3: Detaljni nacrt betonske šesterokutne prizme

3. REZULTATI PROVEDENIH ISPITIVANJA

3.1 Karakteristike proizvedenog pepela

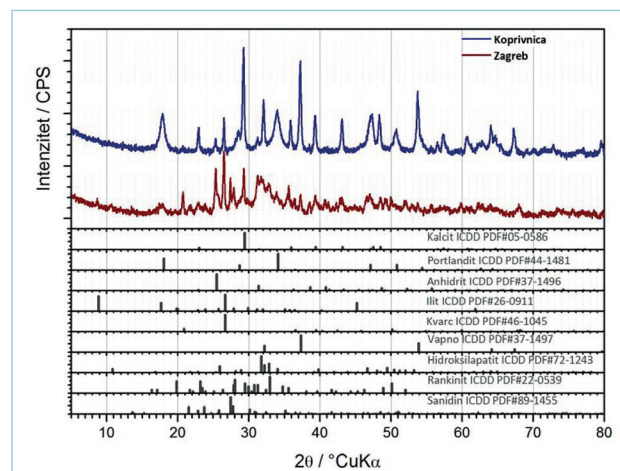
U pilot projektu korišteni su pepeli sljedećih gustoća: za pepeo iz mulja s UPOV-a Koprivnica 2.60 g/cm³ te za pepeo iz mulja s UPOV-a u Zagrebu 2.68 g/cm³. Kemijski sastavi korištenih pepela dani su u [tablici 2](#). S obzirom na značajne udjele silicijevih, kalcijevih i aluminijevih oksida, može se očekivati određeni stupanj reaktivnosti proizvedenih pepela, posebice pepela iz mulja s UPOV-a u Zagrebu.

Metodom rentgenske difrakcijske analize (XRD) određeni su kristalni sastavi proizvedenih pepela ([slika 4](#)). Ispitivanja su pokazala postojanje amorfnе faze u uzorcima obje vrste pepela te kristalni sastav baziran na kalcitu, vapnu i portlanditu uz minorne faze kvarca i anhidrita za pepeo iz mulja s UPOV-a u Koprivnici, odnosno kristalni sastav baziran na kvarcu, kalcitu i anhidritu te minorne faze vapna, portlandita i ilita za pepeo iz mulja s UPOV-a

Tablica 2: Kemijski sastav (% mas.) proizvedenih pepela

Oksid	UPOV Koprivnica	UPOV Zagreb
	850 °C	850 °C
CaO	68.8	26.3
SiO ₂	25.0	45.0
Al ₂ O ₃	1.49	8.62
Fe ₂ O ₃	0.47	5.09
MgO	0.06	2.21
P ₂ O ₅	0.15	5.31
TiO ₂	0.05	0.32
Na ₂ O	0.08	0.38
K ₂ O	0.10	0.53
SO ₃	0.85	4.06
Ostatak	2.95	2.18

*gubitak žarenjem 29.5% mas.



Slika 4: XRD difraktogrami uzoraka korištenog pepela

u Zagrebu. Proizvedeni pepeli trebali bi biti primjereni za ugradnju u beton na osnovi iskazanog kristalnog faznog sastava i strukturnih karakteristika.

Provedenim testovima izluživanja (prema HRN EN 12457-2) proizvedeni pepeli klasificirani su kao neopasan otpad (zbog koncentracija izluživanja pojedinih metala koje prelaze granične vrijednosti kategorije inertnog otpada, a koji su dodatno označeni u [tablici 3](#)).

3.2 Karakteristike gotovih betonskih proizvoda

U skladu s prethodno navedenim normama, izvršena je i provjera vanjskog izgleda osam betonskih elemenata (prizmi). Niti na jednom elementu nisu zabilježena vidljiva oštećenja i pukotine. Također, nije zabilježeno ljuštenje niti odvajanje između slojeva, a tekstura i boja u skladu su s deklariranim svojstvima. Proizvedeni betonski elementi prikazani su na [slici 5](#).

Tablica 3: Rezultati ispitivanja izluživanja iz uzoraka pepela i krhotina betona s 10 %-tnim udjelima istog pepela (L/S=10 l/kg)

Parametar	Jed. mjere	UPOV Koprivnica – 850 °C		UPOV Zagreb – 850 °C	
		pepeo	beton (10 % pepela)	pepeo	beton (10 % pepela)
Cl ⁻	mg/l	5.4	3.4	59.0	4.0
F ⁻	mg/l	0.98	0.60	0.86	0.55
SO ₄ ²⁻	mg/l	300	76.0	440	122
DOC	mg/l	10.5	3.05	6.89	2.64
Cu	mg/l	0.01	< DL	0.01	< DL
Zn	mg/l	0.074	0.002	0.011	0.007
Ba	µg/l	110.0	< DL	216.3	2.28
Pb	µg/l	1.68	< DL	71.32	< DL
Cd	µg/l	0.016	< DL	0.060	< DL
Ni	µg/l	< DL	< DL	< DL	< DL
As	µg/l	6.05	6.18	8.52	10.8
Cr	mg/l	0.081	0.049	1.097	0.047
Se	µg/l	10.9	2.02	27.0	1.42
Mo	µg/l	53.5	< DL	197.1	1.82

*< DL – ispod granice detekcije

Dimenzije ispitivanih elemenata odstupaju maksimalno ± 2 mm od radnih dimenzija deklariranih od strane proizvođača (490 mm x 490 mm x 100 mm), čime je zadovoljen uvjet razreda 2, vezano uz postignute dimenzije izrađenih betonskih elemenata. Istovremeno su maksimalne dimenzije između bilo koje dvije izmjerene dijagonale 2 mm, čime je zadovoljen uvjet razreda 3 po pitanju dijagonala.

Zadovoljeni su i uvjeti maksimalne razlike između bilo koje dvije izmjerene duljine, širine i debljine (≤ 3 mm), uvjet minimalne debljine gornjeg (habajućeg) sloja od 4 mm te maksimalna dopuštena konkavnost (≤ 2.5 mm) i konveksnost (≤ 4.0 mm) gornje površine.

Osnovna fizikalna i mehanička svojstva gotovih betonskih proizvoda i rezultati provedenih ispitivanja dani su u tablici 4. Mehanička svojstva ispitivana kao čvrstoća na savijanje daju zadovoljavajuće rezultate za oba korištena pepela, uz neznatno bolju čvrstoću postignutu korištenjem pepela iz mulja s UPOV-a u Zagrebu (4.7 MPa naspram 4.5 MPa, dok je minimalni uvjet zadovoljenja traženog razreda čvrstoće 4.0 MPa). S druge strane, prizme s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV-a u Koprivnici pokazuju blago niže vrijednosti upijanja vode u odnosu na prizme s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV-a u Zagrebu (3.9 % naspram 4.6 %). Neovisno o tome, obje mješavine zadovoljavaju uvjet odgovarajućeg razreda prema kojem upijanje vode mora biti manje od 6 %.

Preostali zahtjevi koji se odnose na otpornost na smrzavanje/odmrzavanje sa soli te otpornost na habanje vežu se na završni sloj (debljine oko 1 cm) u koji pepeo nije niti ugrađivan, te su stoga i rezultati ovih ispitivanja istovjetni rezultatima na uobičajenim šesterokutnim prizmama iz redovnog proizvodnog programa bez ugradnje pepela.



Slika 5: Betonski elementi (šesterokutna prizma) proizvedeni u sklopu pilot projekta s 10 %-tnim udjelom zamjene cementa pepelom

Na osnovi provedenih ispitivanja može se zaključiti da eksperimentalne šesterokutne prizme s 10 % zamjene cementa pepelom iz mulja s UPOV-a zadovoljavaju sve fizikalne i mehaničke zahtjeve.

Tablica 4: Fizikalna i mehanička svojstva gotovih betonskih elemenata s ugrađenim 10 %-tnim udjelima pepela

Svojstvo	Šesterokutna prizma s pepelom iz mulja s UPOV-a Zagreb	Šesterokutna prizma s pepelom iz mulja s UPOV-a Koprivnica	Uvjet odgovarajućeg razreda
Čvrstoća na savijanje	4.7 MPa	4.5 MPa	≥ 4.0 MPa
Sila loma	20.3 kN	20.1 kN	≥ 14.0 kN
Upijanje vode	4.6 %	3.9 %	≤ 6 %
Otpornost na smrzavanje/odmrzavanje sa soli nakon 28 ciklusa	$L_{\text{srednje}} = 0.29 \text{ kg/m}^2$ $L_{\text{maksimalno}} = 0.38 \text{ kg/m}^2$	$L_{\text{srednje}} = 0.29 \text{ kg/m}^2$ $L_{\text{maksimalno}} = 0.38 \text{ kg/m}^2$	$L_{\text{sr.}} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$ $L_{\text{maks.}} < 1.5 \text{ kg/m}^2$
Otpornost na habanje	16000 mm ³ /5000 mm ²	16000 mm ³ /5000 mm ²	$\leq 18000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$

Dodatno je u sklopu provedenih ispitivanja ekološkog utjecaja eksperimentalnih betonskih elemenata provedeno i ispitivanje izluživanja iz krhotina betona s ugrađenim 10 %-tnim udjelima pepela, a rezultati su prikazani u sklopu [tablice 3](#). Uspoređujući razine izluživanja teških metala iz krhotina betona s ugrađenim pepelom i samog pepela, vidljivo je da je ostvarena značajna imobilizacija teških metala unutar cementne matrice. Dokaz ove tvrdnje leži u značajno smanjenim koncentracijama izluživanja svih analiziranih elemenata iz krhotina betona u odnosu na izluživanje iz samog pepela. Nadalje, krhotine betona s ugrađenim pepelom mogu se kategorizirati kao inertan otpad u slučaju njihova odlaganja na odlagališta otpada nakon završetka životnog vijeka izrađenih betonskih elemenata. Navedeno također omogućava i eventualno korištenje tih istih elemenata u obliku recikliranog agregata po završetku njihova životnog vijeka.

4. ZAKLJUČAK

S naglim porastom broja izgrađenih UPOV-a, problem zbrinjavanja mulja postaje sve aktualniji, a unatoč razmjerno velikom broju različitih tehničko-tehnoloških mogućnosti zbrinjavanja mulja, gotovo svima su svojstveni visoki troškovi. Paralelno s razvojem ove problematike odvija se i značajan broj znanstvenih istraživanja o mogućnostima korištenja mulja i nusprodukata njegove obrade (pepeo) u različitim granama industrije. Značajan udio tih istraživanja baziran je na mogućnostima korištenja pepela dobivenog spaljivanjem mulja kao djelomične zamjene za cement u betonskoj industriji. Navedeno je rezultat očekivanih pucolanskih svojstava pepela na osnovi kemijskog sastava baziranog na oksidima kalcija, aluminijska i silicija, a što je potvrđeno ispitivanjima provedenim i u okviru ovog istraživanja. Provedenim pilot projektom su, dakle, potvrđeni rezultati značajnog broja prethodno provedenih laboratorijskih ispitivanja. Naime, pepeo je korišten kao zamjena za 10 % cementa u stvarnoj („*real scale*“) proizvodnji betonskih elemenata (šesterokutne prizme) koji se između ostalog koriste i za oblaganje otvorenih kanala. Proizvedeni elementi zadovoljavaju sve tehničke zahtjeve propisane

relevantnim normama (dimenzijska stabilnost, mehaničke i fizikalne karakteristike). Dodatno su provedenim testovima izluživanja potvrđeni i ekološki zahtjevi za izrađene elemente, budući da su svi teški metali, koji inicijalno predstavljaju ekološki problem pretjeranim izluživanjem iz samog pepela, u primjeni u betonu uspješno imobilizirani unutar cementne matrice.

Korištenjem pepela u proizvodnji betonskih elemenata s primjenom u vodnom gospodarstvu prema opisanom postupku korak je prema zatvaranju ciklusa pročišćavanja otpadnih voda pri čemu se generiraju gotovo zanemarive količine otpadne tvari, što je i jedna od temeljnih pretpostavki prelaska na cirkularni tip gospodarstva općenito, gdje otpad jedne postaje sirovinom druge industrije. Korištenje pepela dobivenog iz mulja s UPOV-a u betonskoj industriji pokazuje se izvodljivim i opravdanim s tehnološkog aspekta, a uzimajući u obzir rezultate provedenih testova izluživanja, dobiveni betonski proizvodi s ugrađenim pepelom pokazuju se sigurnima za korištenje s aspekta zaštite okoliša i ljudskog zdravlja. Uz realnu pretpostavku da bi pepeo betonarama bio dostupan bez naknade, te da se njegovim korištenjem smanjuje potreba za sirovim materijalima iz prirode, za očekivati je opravdanost ovakvog postupka i s ekonomskog i ekološkog aspekta.

Positivni rezultati ovog istraživanja od posebnog su interesa kako za područje vodnog gospodarstva s ciljem zbrinjavanja mulja, tako i za industriju proizvodnje građevnih proizvoda s ciljem smanjenja emisija CO₂ zamjenom dijela originalnih sirovina (cementa) u proizvodnji betona.

ZAHVALA

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom (7927): "Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products".

Autori se posebno zahvaljuju tvrtki Beton Lučko d.o.o. na iskazanom interesu i suradnji u provedbi pilot projekta te tvrtkama Zagrebačke otpadne vode d.o.o. i Koprivničke vode d.o.o. za ustupanje mulja potrebnog za proizvodnju pepela i provođenje ovog istraživanja. ■

LITERATURA

- Chen, Z.; Poon, C. S. (2017.): Comparing the use of sewage sludge ash and glass powder in cement mortars. *Environmental Technology*, 38(11), 1390-1398.
- Cyr, M.; Coutand, M.; Clastres, P. (2007.): Technological and environmental behaviour of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1278-1289.
- Donatello, S.; Cheeseman, C.R. (2013.): Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): a review. *Waste Management*, 33(11), 2328-2340.
- Jamshidi A; Mehrdadi N; Jamshidi M (2011.): Application of sewage dry sludge as fine aggregate in concrete. *Journal of Environmental Studies*, 37(59), 4-6.
- Lynn, C.J.; Dhir, R.K.; Ghataora, G.S. & West, R.P. (2015.): Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 767-779.
- Milieu Ltd (2010.): Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land, Final Report, Part III: Project Interim Reports, Brussels.
- Naamane, S.; Rais, Z.; Taleb, M. (2015.): The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 112(1), 783-789.
- Nakić, D., Vouk, D.; Donatello, S.; Anić-Vučinić, A. (2017.): Environmental impact of sewage sludge ash assessed through leaching. *Engineering Review*, 37(2), 222-234.
- Scrivener, K.L.; John, V. M.; & Gartner, E. M. (2016.): Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry. United Nations Environment Programme.
- Tantawy, M.A.; El-Roudi, A.M.; Abdalla, E.M.; Abdelzaher, M.A. (2012.): Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash. *Chemical Engineering*, Article ID 487037, 8 stranica.
- Vouk, D.; Nakić, D.; Štirmer, N. (2015.): Reuse of sewage sludge – problems and possibilities. *Proceedings of the International Conference IWWATV 2015*, Athens, Greece. <available on: http://iwwatv.uest.gr/proceedings/pdf/Vouk_et_al.pdf>
- Vouk, D.; Serdar, M.; Nakić, D.; Anić-Vučinić, A. (2016. a): Use of sludge generated at WWTP in the production of cement mortar and concrete. *Gradevinar*. 68(3), 199-210.
- Vouk, D.; Nakić, D.; Štirmer, N.; Baričević, A. (2016. b): Effect of lime addition during sewage sludge treatment on characteristics of resulting SSA when it is used in cementitious materials. *Water Science and Technology* 75(3-4), 856-863.

