

EKSPERIMENTALNA ANALIZA BETONSKE MEŠANICE Z DODATKOM ODPADNE PLASTIKE IN ELEKTROFILTRSKEGA PEPELA EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONCRETE WITH WASTE PLASTIC AND FLY ASH ADDMIXTURES

Jernej Karničnik, univ. dipl. inž. grad.

jernej.karnicnik@sgdstrdin.si
SGD Strdin, d. o. o., Spodnji trg 53,
2344 Lovrenc na Pohorju

izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si

izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

andrej.ivanic@um.si

asist. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

gregor.kravanja@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo,
Smatanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 539.411:691.32(047.31)

Povzetek | Recikliranje plastike predstavlja v svetu zmeraj večji problem. Prav tako velik problem predstavlja odlaganje elektrofiltrskega pepela. V članku smo preiskali možnost uporabe polipropilenskih mlevcev kot zamenjavo deleža mineralnega agregata in možnost uporabe elektrofiltrskega pepela kot zamenjavo deleža cementa. Cilj je dobiti betonsko mešanico, ki bo primerna za uporabo v nekonstrukcijskih in enostavnih konstrukcijskih elementih. Narejeni so bili preizkusi tlačne in upogibne natezne trdnosti. S preiskavami lastnosti betona v svežem stanju smo kontrolirali izvedene betonske mešanice. Mikrostrukturo in mikrokemijske analize smo proučevali z uporabo vrstične elektronske mikroskopije (SEM) in energijsko disperzivne spektrometrije (EDS). Dobljeni rezultati kažejo, da lahko z dodajanjem polipropilenskih delcev in elektrofiltrskega pepela proizvedemo beton, ki ustreza trdnostnemu razredu C 25/30.

Ključne besede: beton, polipropilen, elektrofiltrski pepel, mehanske preiskave, SEM – SEI, EDS

Summary | Recycling of plastic is a growing problem in the world. Another major problem is the disposal of fly ash. In this paper we investigated the possibility of using polypropylene grinders as a substitute for part of mineral aggregate and the possibility of using fly ash as a substitute for part of cement. The goal is to get a concrete mixture that will be suitable for the use in non-structural and simple construction elements. Compressive and flexural tensile strength were investigated. By examining the fresh state properties, we controlled the executed concrete mixtures. Finally, the microchemical structure of concrete was investigated in detail using scanning electron microscopy (SEM) and electron dispersive spectrometry (EDS). The results show that with the addition of polypropylene grinders and fly ash we can obtain concrete corresponding to strength class C 25/30.

Key words: concrete, polypropylene, fly ash, mechanical tests, SEM – SEI, EDS

1 • UVOD

V zadnjih letih po vsem svetu opazamo znatno rast porabe plastike, kar je povzročilo velike količine odpadkov, povezanih s plastiko. Recikliranje plastičnih odpadkov za pridobivanje novih materialov, kot sta beton ali malta, je zaradi ekonomskih in ekoloških prednosti ena izmed najboljših rešitev za odstranjevanje plastičnih odpadkov (Saikia, 2012). Vsakodnevna poraba plastike je ogromna. Polimera, ki se kot surovini pri proizvodnji plastike v Evropi največ uporabljata, sta polietilen (PE) in polipropilen (PP). Prvi v različnih oblikah (PE nizke gostote, PE srednje gostote, PE visoke gostote) predstavlja 29,7-% delež, drugi pa 19,3-% delež v proizvodnji (Plastics – the facts, 2019). Skoraj 91 % proizvedene plastike do sedaj ni bilo reciklirane (Meys, 2020). Če se bo sedanji trend proizvodnje in odlaganja plastike nadaljeval, bo leta 2050 kumulativno proizvedenih več kot 25.000 milijonov ton plastike, od tega bo v naravo odvržene kumulativno cca 12.000 milijonov ton plastike (Geyer, 2017).

Poleg nujne razbremenitve okolja z odpadnim materialom raste tudi potreba po zamenjavi kamenega mineralnega agregata, saj je nahajališč, predvsem fistih s kvalitativnim agregatom, vse manj. Potreba po materialih, ki bi lahko delno nadomestili kameni mineralni agregat v betonu, je zelo velika. V članku smo proučevali možnost uporabe odpadnih plastičnih mlevcev za zamenjavo deleža finega agregata. Cement je najdražja in ključna komponenta betona ter najpogostejše uporabljen gradbeni material na svetu, ki pomembno prispeva k podnebnim spremembam. Proizvodni proces pridobivanja cementa predstavlja

zelo velik vir emisij ogljikovega dioksida (CO_2). Vsako leto se proizvede več kot 4 milijarde ton cementa, kar predstavlja približno 8 % celotne svetovne emisije CO_2 (Lehne, 2018). Delež cementa v betonu smo zamenjali z elektrofiltrskim pepelom (EFP). V zadnjih desetletjih se pri proizvodnji betonov povečuje uporaba EFP kot delno nadomestilo za cement. Razlogi za to so številne ekonomske, okoljske in tehnične prednosti. EFP je bistveno cenejši od cementa in v proizvodnji betonov predstavlja vsaj dve okoljski prednosti, ki sta: več EFP, kot se porabi pri proizvodnji betonov, manj EFP je na odlagališčih, kar predstavlja polucijo, hkrati pa še manjšo porabo cementa, kar pomeni manjšo proizvodnjo cementa in manj emisij CO_2 (Case, 2012). EFP se lahko v betonski mešanici uporabi kot delna zamenjava cementa, ki znaša od 15 % do 25 % na maso veziva (Herath, 2020). Tehnične prednosti dodajanja EFP v betonske mešanice so predvsem to, da dodajanje ugodno vpliva na povečanje trajnosti betona in izboljšuje trdnostne lastnosti (Jelušič, 2013). Timu in Barbuta (Timu, 2018) sta preučevala možnost uporabe sekancev iz PE v betonih, ki je bil pridobljen pri recikliranju plastenk (PET) kot zamenjava deleža kamenega mineralnega agregata frakcije 0–4 mm. Ugotovljeno je bilo, da 10 % zamenjava mineralnega agregata s plastičnimi delci betonu zmanjša tlačno trdnost. Avtorja sta takšen beton uvrstila med konstrukcijske betone. V znanstvenem članku avtorja Ersana in sodelavcev (Ersan, 2020) je prikazana raziskava možnosti uporabe delcev PE kot zamenjavo deleža mineralnega agregata in EFP razreda F po ASTM C 618, ki izvira

iz atrancita kot zamenjava deleža cementa. Uporabili so delce PE velikosti 4–8 mm, s katerimi so nadomestili 30 % mineralnega agregata iste frakcije. Delež cementa, ki je bil zamenjan z EFP, je znašal 20 %.

V svetovni literaturi najdemo kar nekaj raziskav o uporabi odpadne plastike v betonu ((Zhang, 2012), (Karahan, 2010), (Wang, 2020)). V njih so raziskane lastnosti betona z dodanimi delci plastike v svežem in strjenem stanju. Raziskav, ki bi obravnavale hkratno zamenjavo deleža mineralnega agregata s plastičnimi delci in zamenjavo deleža cementa z EFP, je v svetovnem merilu zelo malo. V Sloveniji pa takšne raziskave ne najdemo.

V sklopu raziskav betonske mešanice z dodatki odpadne plastike (PP) in EFP so predstavljene meritve betonskih mešanic v svežem stanju, 28-dnevne vrednosti tlačne in upogibne natezne trdnosti ter podrobna mikrokemijska analiza stičnega območja med cementno matrico in PP-delci. Uporabljeni PP-delci so pridobljeni s postopkom reciklaže v obliki mlevcev. Delež mineralnega agregata frakcije 4–8 mm je nadomeščen z 2 vol. % PP-mlevcev. V obravnavani betonski mešanici, kjer smo s PP-mlevci nadomestili kameni mineralni agregat, smo zamenjali tudi delež veziva iz čistega cementa s 30 vol. % deležem dveh različnih tipov EFP, ki sta bila pridobljena iz lignita in antracita.

Namen tega dela je raziskati možnosti uporabe odpadne plastike ob souporabi EFP pri proizvodnji betonov, s čimer želimo zmanjšati obremenitev okolja z odpadki in zmanjšati odvisnost zaradi proizvodnje cementa. Cilj raziskave je, da se pripravi optimalna betonska receptura, ki bo zadostila pogojem uporabe betona za vgradnjo v nekonstrukcijske in enostavne konstrukcijske elemente.

pridobljen iz lignita (EFP 1), in drugi, pridobljen iz antracita (EFP 2). Preiskave komponent obeh vrst EFP so poznane iz predhodnih raziskav in so podane v preglednici 1 (Ivanovski, 2016).

2.1.3 Voda in kemijski dodatki

Za pripravo betonskih mešanic smo uporabili pitno vodo iz mariborskega vodovoda. Za izboljšanje vgradljivosti smo dodali hiperplastifikator proizvajalca Ha-Be z oznako Pantarhit RC277 v količini 3,60 kg/m³. V mešanico smo dodali tudi aerant z oznako Pantapor 66 v količini 0,36 kg/m³. Ta dodatek smo dodali z namenom, da zmanjšamo možnost čezmerne krvavenja in segregacije svežega betona.

2 • EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Uporabljeni materiali

2.1.1 Agregat

Pri izdelavi vzorcev betonskih mešanic smo uporabili naravni mineralni agregat rečnega izvora iz reke Drave, ki ga pridobivajo v separaciji Podlesnik v Mariboru. Gre za mineralno najbolj raznolik rečni prod v Sloveniji, prevladujoča je silikatna sestava (do 75 %), manj je karbonatov (do 30 %) in klastitov (do 20 %) (Kavčič, 2018). Skupna sejalna krivulja agregata, ki je bila uporabljena v preizkusnih mešanicah, je v največji možni meri sledila

krivulji B16 standarda SIST 1026:2016 (SIST, 2016).

2.1.2 Cement in EPF

Za pripravo mešanic betona smo uporabili cement CEM I 42,5 R proizvajalca Lafarge. Z oznako CEM I označimo čisti portlandski cement. Takšen cement vsebuje minimalno 95 % portlandskega klinkerja in maksimalno 5 % dodatkov – polnil in sadre. 30 vol. % delež cementa smo nadomestili z EFP. Uporabljena sta bila dva po sestavi različna tipa EPF, prvi,

	EFF tip 1 % (m/m)	EFF tip 2 % (m/m)
Žarilna izguba pri 950 °C	2,59	1,79
CaO, reaktivni	11,73	4,38
SiO ₂ , reaktivni	34,68	40,93
CaO, prosti	1,46	0,34
SiO ₂	44,34	49,50
Al ₂ O ₃	19,82	26,99
Fe ₂ O ₃	8,61	9,51
CaO	13,80	5,22
MgO	2,81	2,22
SO ₃	2,96	1,20

Preglednica 1 • Rezultati laboratorijskih analiz EFF v masnih deležih (m/m).

2.1.4 PP-mlevci

Za nadomestilo dela drobnega kamenega mineralnega agregata v betonski mešanici smo uporabili mlevce iz PP, ki jih z reciklažo odpadne embalaže proizvaja družba Interse-
roh Slovenija. Granulometrijska sestava PP-mlevcev je podana v preglednici 2 (Červan, 2019). Gostota PP-mlevcev znaša 1,00 g/cm³.

- etalonska mešanica z EFF tipa 2, ki smo jo označili kot (ETM-EFF-2),
- mešanica s PP mlevci z EFF tipa 1, ki smo jo označili kot (PPM-EFF-1),
- mešanica s PP mlevci z EFF tipa 2, ki smo jo označili kot (PPM-EFF-2).

Sestavine smo mešali v laboratorijskem mešalcu z oznako UTEST UTC-0750 z močjo

Odprtina sita (m/m)	0	2	4	8	16
Prvo sejanje (g)	6,00	81,00	778,00	135,00	0,00
% frakcije	0,60	8,10	77,80	13,50	0,00
Drugo sejanje (g)	3,00	68,00	760,00	167,00	0,00
% frakcije	0,30	6,80	76,00	16,70	0,00
Povprečje (%)	0,45	7,45	76,90	15,10	0,00

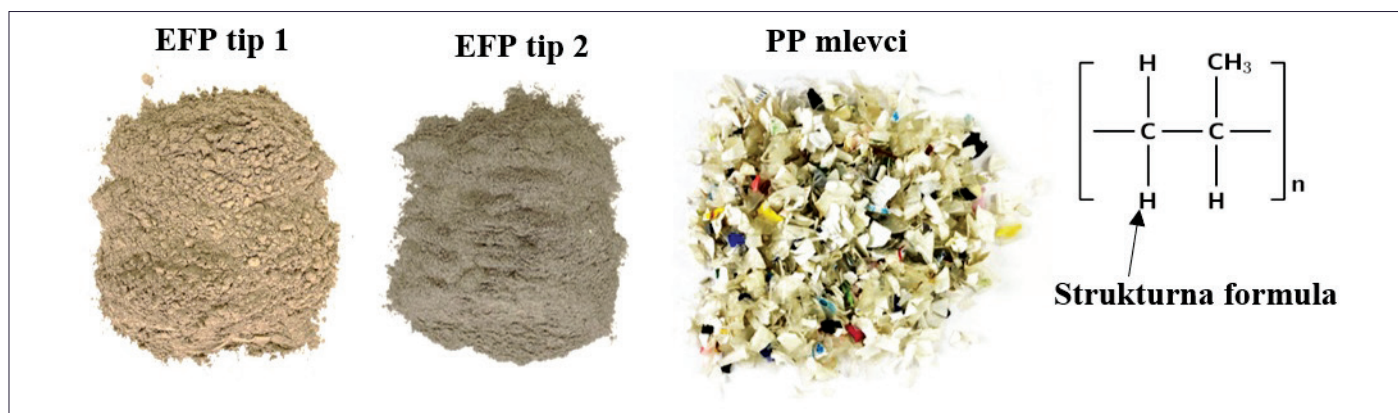
Preglednica 2 • Rezultati sejalnih analiz PP-mlevcev.

cement, EFF in PP-mlevce. Vse skupaj smo pokrili z drobnim agregatom. Suho mešano smo pri 36 obratih na minuto mešali 60 sekund. Suhi mešanici smo nato dodali vodo, aerant in hiperplastifikator. Vse sestavine smo pri 36 obratih na minuto mešali še nadaljnjih 90 sekund. Sestava svežega betona posameznih mešanic je podana v preglednici 3. Sveži beton smo nato vgradili v standardne kalupe dimenzij 150 x 150 x 150 mm (za merjenje tlačnih trdnosti) in kalupe dimenzij 100 x 100 x 400 mm (za merjenje upogibne natezne trdnosti). Pri vgradnji v kalupe smo beton zgostili na vibracijski mizi s frekvenco 50 Hz. Beton smo vgradili v dveh slojih, pri čemer smo vsak sloj posebej zgoščevali 10 sekund. 24 ur po vgradnji smo vzorce betona vzeli iz kalupov in jih 28 dni negovali v kadi z vodo pri temperaturi 20 °C ± 1 °C. Po 28 dneh smo betonske vzorce vzeli iz vode in na njih opravili standardni tlačni in upogibni test. Vzorce smo pripravili v skladu s standardi SIST EN 12390-1 in SIST EN 12390-2 ((SIST, 2001), (SIST, 2009d)).

2.3 Karakterizacijske metode

2.3.1 Karakterizacija sveže betonske mešanice

Konsistenco betona smo izmerili z metodo poseda v skladu s standardom SIST EN 12350-2 (SIST, 2009a). Rezultat te meritve je konsistenčni razred. Vsebnost zračnih por smo izmerili v skladu s standardom SIST EN 12350-7 (SIST, 2009c). Za meritev smo uporabili 8-litrski porozimeter z oznako Testing 5900. Beton smo v porozimeter vgradili v treh



Slika 1 • Normirana uklonska in tlačna nosilnost prečnega prereza lesenega stebra pri $t = 0, 5, 15, 30$ in 60 minut za različne vitkosti lesenega stebra in različne začetne vlažnosti lesa, to je $W_0 = 0, 12$ in 20°M .

2.2 Priprava betonskih mešanic

Pripravili smo štiri različne mešanice betona:

- etalonska mešanica z EFF tipa 1, ki smo jo označili kot (ETM-EFF-1),

3800 W. Notranjost bobna mešalca smo navlažili in tako minimalizirali absorpcijo vode, ki smo jo dodali mešanici. Najprej smo v mešalec dodali grobi agregat, nato

slojih, da smo dosegli dovolj dobro zgoščenost. Meritev gostote svežega betona smo izvajali v skladu s standardom SIST EN 12350-6 (SIST, 2009b). Izmerili smo maso vzorca

Mešanica	Material (kg/m ³)									
	Voda	Cement	EFP1	EFP2	H	A	A/0-4	A/4-8	A/8-16	PPM
ETM-EFP-1	180,00	252,00	108,00	0,00	3,60	0,36	858,58	171,08	681,78	0,00
ETM-EFP-2	180,00	252,00	0,00	108,00	3,60	0,36	858,58	171,08	681,78	0,00
PPM-EFP-1	180,00	252,00	108,00	0,00	3,60	0,36	858,58	167,66	681,78	1,27
PPM-EFP-2	180,00	252,00	0,00	108,00	3,60	0,36	858,58	167,66	681,78	1,27

Legenda: H – hiperplastifikator, A – aerant, A/0-4, A/4-8, A/8-16 – frakcije kamenega mineralnega agregata, PPM – polipropilenski mlevci.

Preglednica 3 • Sestava posameznih betonskih mešanic.

svežega betona, ki smo jo delili z znanim volumnom vzorca:

$$\rho_{bs} = \frac{M_{bs}}{V_{bs}} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (1)$$

pri čemer je ρ_{bs} gostota svežega betona (kg/m³);

M_{bs} masa vzorca svežega betona (kg);

V_{bs} volumen vzorca svežega betona (m³).

Meritev vodocementnega razmerja (v/c) smo opravili v skladu s standardom SIST 1026:2016, dodatek NC (SIST, 2016). Vodocementno razmerje svežega betona se določi kot količnik mase celotne količine vode in mase celotne količine veziva v 1 m³ svežega betona.

Z meritvijo izgube mase med sušenjem svežega betona v mikrovalovni pečici smo določili količino vode v vzorcu svežega betona. Masni delež celotne količine vode v svežem betonu smo izračunali po naslednji enačbi:

$$v = \frac{M_{bs} - M_{bp}}{M_{bs}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

pri čemer je:

v masni delež celotne vode v svežem betonu (m/m %);

M_{bs} masa vzorca svežega betona (kg);

M_{bp} masa vzorca posušenega betona (kg).

Celotna količina vode v 1 m³ svežega betona V se izračuna po naslednji enačbi:

$$V = \rho_{bs} \cdot v \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (3)$$

pri čemer je:

V celotna količina vode v 1 m³ svežega betona (kg/m³);

ρ_{bs} gostota svežega betona (kg/m³);

v masni delež celotne vode v svežem betonu (m/m %).

2.3.2 Karakterizacija otrdele betonske mešanice

Tlačno trdnost betona smo izmerili v skladu s standardom SIST EN 12390-3 (SIST, 2009e). Vzorce smo obremenjevali do porušitve s konstantno obremenitvijo 0,6 MPa/s. Preskus tlačne trdnosti smo izvedli s stiskalnico UTEST UTC-4331. Tlačna trdnost betona se izračuna z izrazom (SIST, 2009e):

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (4)$$

pri čemer je:

f_c tlačna trdnost betona (MPa);

F maksimalna sila pri lomu materiala (N);

A_c del prereza vzorca, na katerem deluje tlačna sila (mm²).

Upogibno natezno trdnost betona smo izmerili v skladu s standardom SIST EN 12390-5 (SIST, 2009f). Vzorce smo obremenjevali do porušitve s konstantno obremenitvijo 0,5 MPa/s. Upogibno natezno trdnost smo izračunali z izrazom (SIST, 2009f):

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}, \quad (5)$$

pri čemer je:

$f_{ct,fl}$ upogibna natezna trdnost betona (MPa);

F maksimalna sila pri lomu materiala (N);

l razdalja med valjastima podporama (mm);

d_1, d_2 bočne dimenzije vzorca (mm).

2.3.3 Določitev mikrostrukture in mikrokemijske analize betona

Za določitev mikrostrukture stične površine med cementnim kamnom in PP-mlevcem v otrdelem betonu je bil uporabljen elektronski

vrstični mikroskop FEI QUANTA 200 3D, ki je okoljski vrstični mikroskop z volframovo katodo kot izvorom elektronov. Oznaka »okoljski« pomeni ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope), kar omogoča delo pri različnih tlakih in vlažnosti. Rezultati dela s tem mikroskopom so SEM – SEI (Scanning Electron Microscope – Secondary Electron Image) fotografije. Fotografije SEM – SEI so bile izdelane pri visokem vakuumu, ki omogoča opazovanje prevodnih ali neprevodnih vzorcev, ki so prevlečeni s prevodno plastjo, ki je iz zlata.

FEI SIRION NC je visokoločljivi vrstični elektronski mikroskop s poljsko emisijo elektronov, ki omogoča izredno velike povečave (do milijonkrat) in visoko ločljivost (1 nm). Opremljen je z analizatorjem za mikrokemične analize EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), Oxford Instruments. ima Schottkyjev izvor elektronov, kjer s poljsko emisijo dobimo curek elektronov z majhnim premerom in veliko gostoto. Rezultat je visoka ločljivost tudi pri majhnih napetostih: 1,0 nm pri 15 kV ali 2,0 nm pri 1 kV.

Mikroskop je opremljen za mikrokemično analizo z energijsko disperzijskim spektrometrom EDS Oxford INCA 350. Omogoča kvalitativno in kvantitativno mikrokemično analizo v točki in na ploskvi ter kvalitativno linijsko analizo in ploskovno porazdelitev elementov (analiza XRM mapping). Ločljivost EDS-detektorja je 129 pri Mn Ka. Vzorčenje smo opravili iz vsake gredice za upogibni preizkus po tri vzorce, ki so vsebovali vpete delce PP-mlevcev.

rali na 5 %. S takšnim deležem zračnih por že lahko dosežemo zmrzlinsko odporne betone. Seveda moramo v skladu s standardom SIST EN 206:2013 (SIST, 2013) za zagotavljanje zmrzlinke odpornosti zagotoviti tudi dovolj nizko vodocementno razmerje in dovolj veliko tlačno trdnost betona. Tako kot konsistenco smo pri vsaki mešanici preverili tudi vsebnost

3 • REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Meritve svežega betona

Konsistenco smo fiksirali v konsistenčni razred S3 s posedom med 100 in 150 mm. S tem konsistenčnim razredom smo zagoto-

vili dobro vgradnjo betona v kalupe, dobro zgoščenost, simulirali pa smo tudi najbolj uporabljen konsistenčni razred na slovenskih betonarnah. Vsebnost zračnih por smo fiksi-

zračnih por. Z izbranim aerantom lahko zelo dobro kontroliramo delež in tako smo dobili rezultate med 4,9 % in 5,2 % zračnih por.

Ob upoštevanju koncepta k-vrednosti za mineralne dodatke v skladu z standardom SIST EN 206:2013 (SIST, 2013) je bila določena vrednost računskega vodocementnega razmerja 0,61. Če upoštevamo deklarirano vpojnost agregata, je vrednost računskega efektivnega vodocementnega razmerja 0,58. Določili smo tudi gostoto v svežem stanju. Vrednosti vodocementnega razmerja in gostote, ki smo jih dobili z našimi meritvami, so predstavljene v preglednici 4.

Mešanica	v/c	v/ceff	Gostota (kg/m ³)
ETM-EFP-1	0,62	0,59	2.261,23
ETM-EFP-2	0,61	0,58	2.258,41
PPM-EFP-1	0,60	0,57	2.251,58
PPM-EFP-2	0,61	0,58	2.250,13

Preglednica 4 • Vrednosti izmerjenega vodocementnega razmerja in pripadajoče gostote.

Pri vsaki vrsti mešanice smo za preiskavo lastnosti betona v svežem stanju naredili po en preizkušane. S preiskavami svežega betona smo želeli kontrolirati, da je beton res zamešan tako, kot je bilo določeno z recepturami.

Podobne raziskave kažejo, da se konsistenca betona oz. njegov posed, s čimer določimo obdelavnost betona, z dodajanjem plastičnih delcev navadno zmanjša. To je posledica nepravilne oblike in večje specifične površine plastičnih delcev ((Sharma, 2016), (Mahmood, 2020)). V primeru uporabe okroglih delcev plastike pa se obdelavnost lahko tudi izboljša ((Saikia, 2012), (Gu, 2016), (Gholampour, 2019)). Padec konsistence je manjši ob uporabi gladkih delcev plastike (Bahij, 2020). Gostota betona se z večanjem vsebnosti plastičnih delcev manjša. To je posledica manjše gostote plastike v primerjavi z gostoto ostalih komponent betona ((Almehsh, 2020), (Li, 2020)). Poroznost betona se zaradi nepravilne oblike plastičnih delcev, ki vodijo v slabo zgoščenost, šibko prehodno območje in pojav mikrorazpok, zelo poveča (Babafemi, 2018). Z dodajanjem EFP betonu izboljšamo obdelovalnost (Thomas, 2007). Za to obstaja več razlogov. Zaradi nižje gostote EFP v primerjavi s cementom se poveča prostornina razpoložljive paste. EFP prav tako zmanjša flokulacijo cementnih delcev. Ker EFP počasneje reagira z vodo, je stopnja hidratacije v začetnem obdobju nižja, s tem pa beton dlje drži začetno konsistenco.

Največ pa k dobri obdelovalnosti betona z EFP pripomore njihova sferična oblika (Hemalatha, 2017).

3.2 Meritve betonske mešanice v trdnem stanju

3.2.1 Tlačne trdnosti

Rezultati 28-dnevne tlačne trdnosti so zbrani v preglednici 5, povprečne vrednosti pa so prikazane na sliki 2. Po pregledu rezultatov opazimo 16-% znižanje tlačne trdnosti z dodajanjem PP-mlevcev v primerjavi z etalonskima mešanicama. Do dodatnega znižanja tlačne trdnosti pride z uporabo EFP 2, pridobljenega iz antracita, ki ima nižjo specifično površino

(3288 cm²/g) v primerjavi z EFP1 iz lignita (5.025 cm²/g). To pomeni, da so delci EFP tipa 1 manjši, da jih je več in da imajo večjo kapaciteto za potrebno reakcijo s stranskimi produkti hidratacije cementa. Gre za reakcijo, pri kateri se tvori dodatni kalcijev-silikat-hidrat (C-S-H), ki je primaren produkt hidratacije cementa in glavna sestavina, ki vpliva na trdnost betona.

Napravljene betonske mešanice smo v skladu s standardom SIST EN 206:2013, dodatek B, (SIST, 2013) razvrstili v trdnostne razrede. Postopek je podan v nadaljevanju in preglednici 6.

S pomočjo preglednice B.1, standarda SIST EN 206:2013 (SIST, 2013), določimo merilo istovetnosti za tlačno trdnost z naslednjimi enačbami:

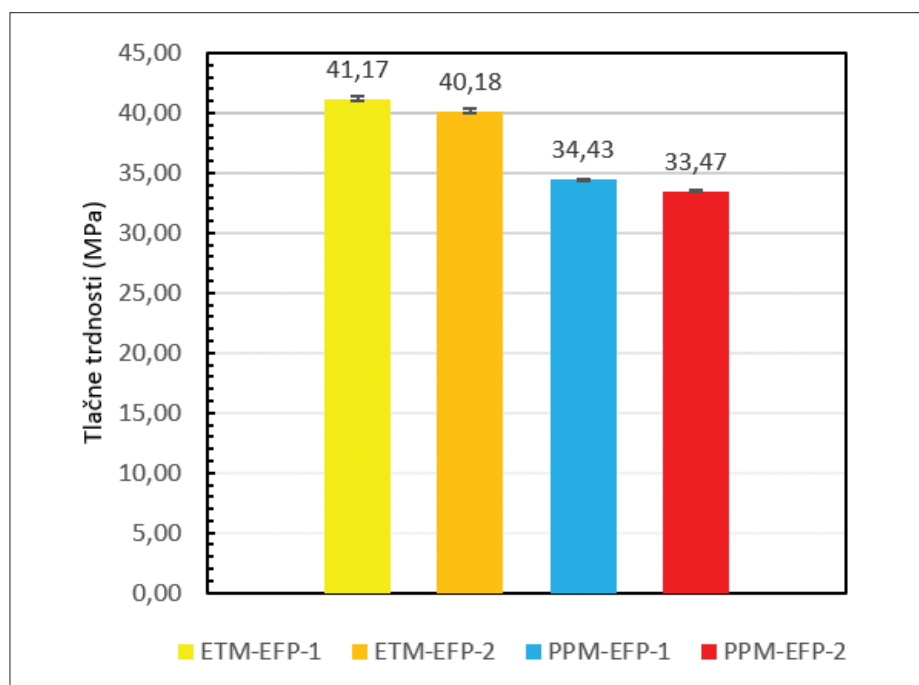
$$- \text{prvo merilo: } f_{cm} \geq f_{ck} + 1, \quad (6)$$

$$- \text{drugo merilo: } f_{ci} \geq f_{ck} - 4, \quad (7)$$

Prvo in drugo merilo določata potrebno minimalno povprečno vrednost tlačne trdnosti in minimalno vrednost posamezne tlačne trdnosti.

Tlačna trdnost (MPa)	ETM-EFP-1	ETM-EFP-2	PPM-EFP-1	PPM-EFP-2
Preizkušane 1	40,97	40,32	34,34	33,52
Preizkušane 2	41,37	40,03	34,52	33,42
Povprečna vrednost	41,17	40,18	34,43	33,47
Standardni odklon	0,20	0,15	0,09	0,05

Preglednica 5 • Rezultati tlačne trdnosti posamezne mešanice s povprečno vrednostjo in standardnim odklonom.



Slika 2 • Povprečne tlačne trdnosti betonskih mešanic.

Mešanica	Povprečna vrednost (MPa)	Minimalna vrednost (MPa)	Prvo merilo (MPa)	Drugo merilo (MPa)
ETM-EFP-1	41,17	40,97	38,00	33,00
ETM-EFP-2	40,18	40,03	38,00	33,00
PPM-EFP-1	34,43	34,34	31,00	26,00
PPM-EFP-2	33,47	33,42	31,00	26,00

Preglednica 6 • Vrednotenje rezultatov tlačne trdnosti.

Na podlagi vrednotenja rezultatov tlačne trdnosti vidimo, da etalonski mešanici spadata v trdnostni razred C 30/37, mešanice s PP-mlevci pa v trdnostni razred C 25/30. To pomeni, da bi lahko, če pogledamo samo tlačno trdnost, etalonski mešanici ter mešanice s PP-mlevci uporabili tudi v primeru konstrukcijskih betonskih elementov. Seveda bi bilo za takšne zaključke treba narediti še preizkus trajnosti in reoloških lastnosti. Trajnost betona določajo lastnosti, kot so prodor vode, prepustnost zraka in vode, migracija kloridov, karbonizacija, krčenje ter odpornost proti zmrzovanju in tajanju.

Z dodajanjem plastičnih delcev kot zamenjava za mineralni agregat se poveča prodor vode v betonski element, saj mešanica mineralnega agregata in plastike vodi do bolj poroznega betona (Coppola, 2018). Z dodajanjem odpadne plastike v beton se povečata tudi prepustnost zraka in vode. Večje število praznin v betonski matrici vodi do večje penetracije ionov klorida in višje karbonizacije (Silva, 2013). Med procesom karbonizacije kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagira z ogljikovim dioksidom (CO_2) iz ozračja, kar ima negativen vpliv na mehanske lastnosti betona.

Pri betonu, ki vsebuje odpadno plastiko, opazimo večje krčenje zaradi sušenja kot pri običajnih betonih. V splošnem se napetost zaradi krčenja v cementnih pastah, ki vsebujejo plastične delce, zmanjša (Bendimerad, 2016). Odpornost proti zmrzovanju in tajanju betona, ki vsebuje odpadno plastiko, ustreza vsem standardom za varno uporabo. V določenih primerih s povečanjem deleža odpadne plastike v betonu opazimo celo boljšo odpornost proti zmrzovanju in daljši trajnosti betonskega elementa (Kan, 2009).

Razlogov za padec tlačne trdnosti je več: hidratacija cementa na površini plastičnih delcev se zaustavi zaradi pomanjkanja vode zaradi hidrofobnosti narave plastičnih delcev; vzpostavi se zelo slaba vez med cementno pasto in plastičnimi delci; velika poroznost

in vsebnost zraka v betonu; nizki modul elastičnosti plastičnih delcev; možen razpad plastičnih delcev zaradi izpostavljenosti alkaličnemu okolju ((Almeshal, 2020), (Sharma, 2016), (Gholampour, 2019), (Babafemi,

se lahko doseže višjo tlačno trdnost, kot jo dosežemo z uporabo večjih plastičnih delcev (Li, 2020). Nižja hidratacija betona z EFP vodi do počasnejšega pridobivanja trdnosti oz. nižjih začetnih trdnosti (Garcia, 2015). To je lahko v določenih primerih prednost, lahko pa tudi velika slabost. Kljub temu da so začetne tlačne trdnosti betona z EFP nižje od tlačnih trdnosti navadnega betona, so lahko končne tlačne trdnosti betona z EFP tudi višje. Zaradi ponavljajoče se pucolanske reakcije EFP s stranskimi produkti hidratacije se vez med pasto in mineralnim agregatom izboljšuje, kar dolgoročno izboljša trdnost betona (Thomas, 2007).

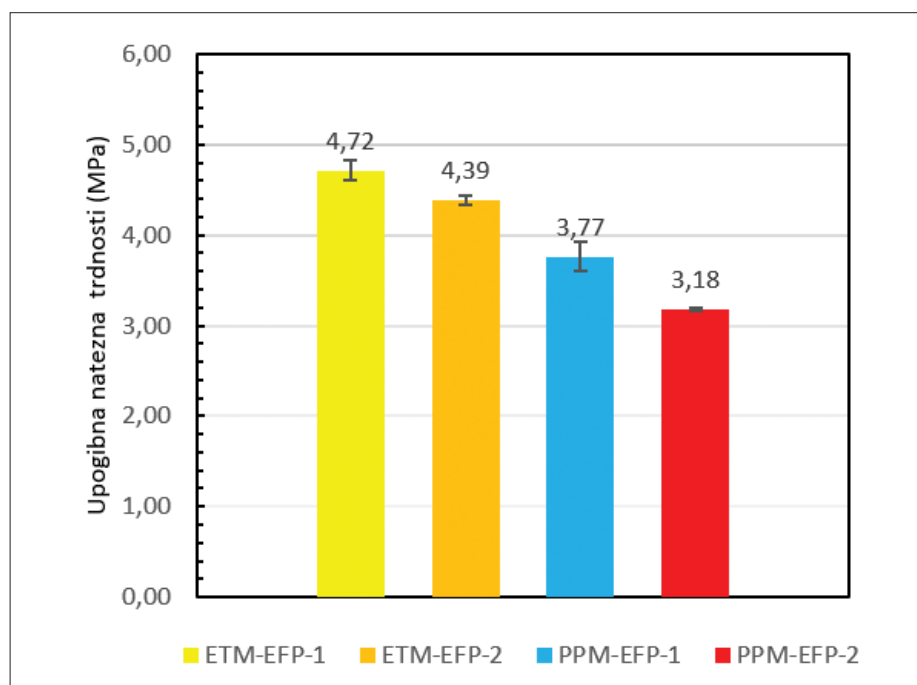
Upogibna natezna trdnost (MPa)	ETM-EFP-1	ETM-EFP-2	PPM-EFP-1	PPM-EFP-2
Preizkušane 1	4,82	4,34	3,93	3,17
Preizkušane 2	4,61	4,43	3,60	3,19
Povprečna vrednost	4,72	4,39	3,77	3,18
Standardni odklon	0,11	0,04	0,17	0,01

Preglednica 7 • Rezultati upogibne natezne trdnosti posamezne mešanice s povprečno vrednostjo in standardnim odklonom.

2018)). V primeru nepravilne oblike plastičnih delcev je padec tlačne trdnosti večji kot v primeru pravilne oblike plastičnih delcev ((Gu, 2016), (Bahij, 2020), (Mahmood, 2020)). Z zmanjšanjem velikosti plastičnih delcev za zamenjavo mineralnega agregata

3.2.2 Upogibne natezne trdnosti

Rezultati 28-dnevne upogibne natezne trdnosti so zbrani v preglednici 7, povprečne vrednosti pa so prikazane na sliki 3. Tako kot pri tlačni trdnosti, tudi pri upogibni natezni trdnosti, opazimo znižanje vrednosti z dodajanjem PP-



Slika 3 • Povprečne upogibne natezne trdnosti betonskih mešanic.

-mlevcev. V primerjavi z etalonskimi mešanica-
mi se je najmanj znižala upogibna natezna
trdnost mešanice z EFP tipa 1. Opazimo 20-%
znižanje upogibne natezne trdnosti. Znižanje
trdnosti z EFP tipa 2 in dodanimi PP-mlevci
v primerjavi z etalonsko mešanico z EFP tipa
2 je 28 %. Takoj opazimo razlike v dobljenih
rezultatih med različnima tipoma EFP. Večja
specifična površina EFP tipa 1 pride tukaj
še do večjega izraza kot pri tlačni trdnosti.
Upogibna natezna trdnost je namreč še bolj
odvisna od prehodnega območja med PP-delci
in cementnim kamnom.

Razlogi za znižanje upogibne natezne trd-
nosti so enaki kot pri padcu tlačne trdnosti.
Medtem ko smo v naši raziskavi opazili večje
znižanje upogibne natezne trdnosti v primer-
javi tlačni trdnosti, sta Saika in de Brito (Sai-
kia, 2012) opazila, da je zmanjšanje upogib-
ne trdnosti z dodajanjem plastičnih delcev
manjše kot zmanjšanje tlačne trdnosti. To
sta pojasnjevala s spremembo obnašanja
pri porušitvi betonskega elementa, ki je bolj
duktilen kot element iz navadnega betona,
kar ima večji vpliv pri upogibni trdnosti. V
raziskavi, ki sta jo predstavila avtorja, so bili
uporabljeni delci plastike oglete oblike. Glede

na to da so bili v naši raziskavi uporabljeni
delci luskaste oblike, lahko sklenemo, da
delci oglete oblike bolj ugodno vplivajo na
upogibno trdnost kot delci luskaste oblike.
Delci luskaste oblike imajo površino veliko
večjo od prostornine. To neugodno vpliva na
vez z betonsko matrico, kar seveda neugod-
no vpliva tudi na mehanske lastnosti. Dolo-
čene raziskave so pokazale tudi izboljšanje
upogibne trdnosti pri uporabi manjšega
deleža zamenjave agregata s plastičnimi
delci (Babafemi, 2018).

3.3 Mikrokemijska analiza betona

3.3.1 Analiza SEM – SEI

Tako na tlačno trdnost kot tudi na upogibno
natezno trdnost vpliva mikrostruktura betona.
Na sliki 4 je prikazana mikrostruktura be-
tonskih mešanic PPM-EFP-1 in PPM-EFP-2.

S slike je jasno razvidna lega PP-delca in
okoliskega betona. Dobro lahko vidimo pre-
hodno območje med betonom in PP-delcem.
Lastnosti prehodnega območja najbolj vpliva-
jo na trdnost betonskega elementa. Vidimo,
da je vez med betonom in PP-delcem šibka
in porozna. Pravzaprav lahko rečemo, da je
prišlo do ločitve med plastičnim delcem in be-

tonska matrico. To je posledica luskaste oblike
in gladke površine PP-delca. Sama betonska
matrica je veliko bolj zgoščena in kompaktna.
Iz prehodnega območja se v beton vidno
širijo mikrorazpoke. Te se pri obremenjeva-
nju elementa med seboj združijo in tvorijo
razpoke večjega velikostnega razreda. Večje
razpoke pa vodijo do porušitve elementa. Iz
tega lahko hitro sklepamo, zakaj je tlačna in
upogibna natezna trdnost betona manjša, ko
mu dodamo PP-delce.

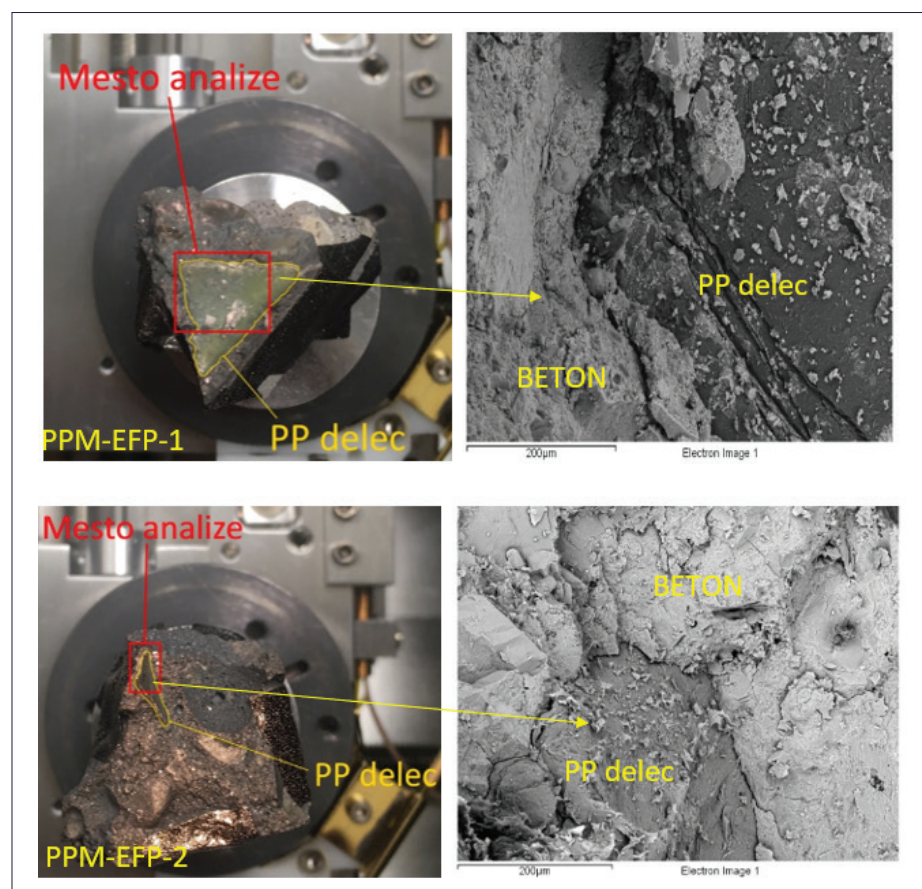
Belmokaddem s sodelavci (Belmokaddem,
2020) je odkril šibko vez med plastičnimi delci
in cementno pasto. Odkrili so, da je prehodno
območje širše od tistega med cementno pasto
in mineralnim agregatom. Opazili so slabšo
adhezijo med cementno matrico in PP-delci.
Prav tako so opazili pojav večjih zračnih
mehurčkov v betonu z dodanimi PP-delci.
Zaradi teh pojav je bila izmerjena manjša
tlačna trdnost pri betonu z dodanimi PP-delci.
Raziskava Zaleska in sodelavcev (Zaleska,
2018) pravi, da pri nižji volumenski zamenja-
vi PP-delcev z agregatom ni opaziti slabše
formacije trdne strukture cementne matrice.
Pri večji volumenski zamenjavi pa je prišlo
do bolj porozne strukture. Opaziti je ostro
mejo med PP-delci in hidratizirano cementno
matrico. Raziskave na ostalih tipih plastičnih
delcev kažejo enake rezultate ((Basha, 2020),
(Safi, 2013)).

3.3.2 EDS-analiza

Preglednica 8 prikazuje rezultate EDS-anali-
ze betonske mešanice PPM-EFP-1. Lokacije
odvzetih spektrov so razvidne na sliki 5.
Vidimo, da prisotnost elementov variira od-
visno od tega, kje je bil posnet spekter. Na
PP-delcu imamo prisotnega največ ogljika (C),
povprečno 53 %. Dobrih 29 % je kisika (O). V
betonu najbolj zastopana elementa sta O in
kalcij (Ca), povprečno okrog 61 % ter 31 %.
Na prehodnem območju (spekter 5) je najbolj
zastopan element O.

V preglednici 9 so podatki EDS-analize be-
tonske mešanice PPM-EFP-2. Vidimo, da je
zastopnost kemijskih elementov na PP-delcu
podobna kot v primeru betonske mešanice
PPM-EFP-1. V betonu pa so opazne večje
razlike predvsem v zastopnosti elementov
Ca in silicija (Si). Opazimo, da je v primeru
uporabe EFP tipa 1 prisotnega več Ca in Si.
Na prehodnem območju mešanice PPM-EFP-2
(spekter 3) je največ C.

S pomočjo EDS-analize smo želeli tudi ugotov-
iti, kakšno je razmerje Ca/Si. Glavni produkt



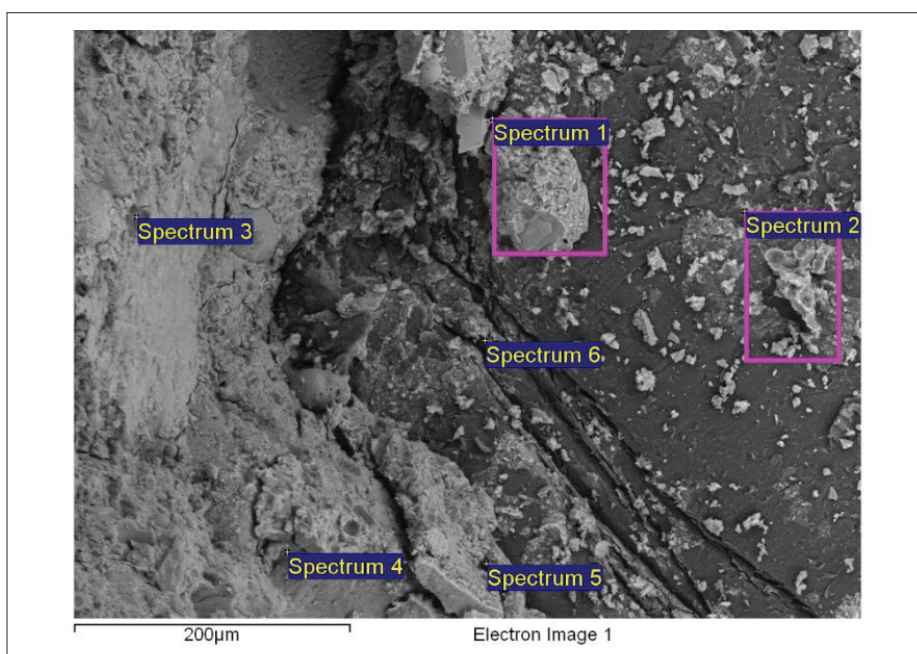
Slika 4 • Analiza SEM – SEI betonske mešanice PPM-EFP-1 in PPM-EFP-2.

Kemijski element	C	O	Al	Si	Ca	Fe
Spectrum 1	30,84	39,80	1,49	8,20	17,74	0,94
Spectrum 2	44,37	34,23	0,77	4,12	16,50	
Spectrum 3	1,96	48,55	2,54	13,29	30,39	
Spectrum 4	4,69	33,73	1,62	8,25	43,56	5,39
Spectrum 5	2,12	43,92	6,30	17,61	27,66	
Spectrum 6	62,46	25,12	0,60	2,50	8,99	

Preglednica 8 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-1.

hidracije cementa in glavna sestavina, ki prispeva k trdnosti betonskega elementa, je kalcijev-silikat-hidrat (C-S-H). Sestavljena je iz različnih komponent, večkrat pa se izrazi kot

2017). Višja vrednost razmerja pove, da je na določenem mestu višja prisotnost krhkih kristalov kalcijevega hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ki seveda neugodno vplivajo na trdnost (Ivanič,



Slika 5 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-1.

povprečno razmerje Ca/Si. Trdnost betona je tako odvisna od tega razmerja. Nižje ko je to razmerje, višja bo trdnost betona (Kunther,

2011). Z dodajanjem EFP vrednost razmerja Ca/Si pada. To je posledica reakcije EFP s stranskimi produkti hidracije, npr. $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Kemijski element	C	O	Al	Si	Ca	Fe
Spectrum 1	75,19	18,79		1,83	4,19	
Spectrum 2	77,66	17,24		1,64	3,45	
Spectrum 3	86,97	10,65		0,53	2,38	
Spectrum 4	14,71	45,43	2,90	8,39	28,57	
Spectrum 5	33,29	44,56		18,53	3,62	
Spectrum 6	14,31	57,00	1,32	5,52	21,85	
Spectrum 7					70,62	29,38

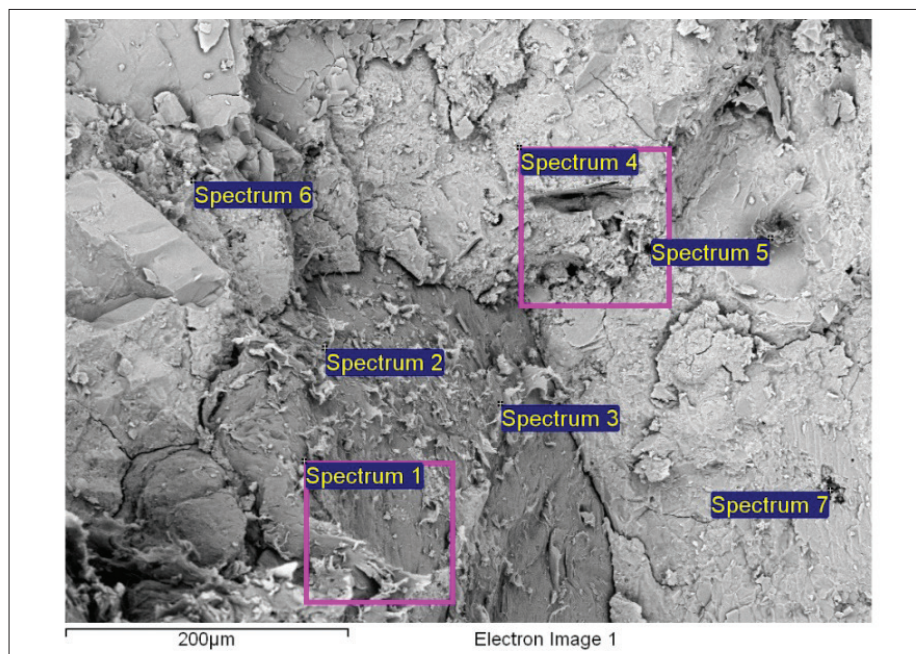
Preglednica 9 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-2.

(Shehata, 1999). Tako lahko EFP dolgoročno pozitivno vpliva na trdnost betona.

V preglednici 10 so prikazane vrednosti Ca/Si razmerja različnih mešanic. Zgoraj smo omenili, da je prehodno območje tisto, ki najbolj vpliva na trdnost betona. Zato je smiselno primerjati med seboj Ca/Si-razmerja spektrov, ki so posneti na prehodnem območju. V preglednici sta ta dva rezultata označena z zvezdo. Vidimo, da je razmerje Ca/Si v mešanici PPM-EFP-1 (spekter 5) manjše od tistega v mešanici PPM-EFP-2 (spekter 3). Tako se naši rezultati, pridobljeni s preizkusom tlačne trdnosti, povsem sklada-jo tudi z vrednostmi Ca/Si-razmerja. Če se osredotočimo na Ca/Si-razmerje posamezne mešanice opazimo, da je pri mešanici PPM-EFP-1 to razmerje nižje v betonu. Zanimivo je, da smo pri mešanici PPM-EFP-2 dobili drugačen rezultat, in sicer je razmerje Ca/Si v betonu višje od tistega na PP-delcu, razen na mestu spektra 5. To je lahko posledica uporabljenega drugega tipa EFP.

Mešanica/spekter	PPM-EFP-1	PPM-EFP-2
	Ca/Si	Ca/Si
Spectrum 1	2,16	2,29
Spectrum 2	4,00	2,10
Spectrum 3	2,29	4,49*
Spectrum 4	5,28	3,41
Spectrum 5	1,57*	0,20
Spectrum 6	3,60	3,96

Preglednica 10 • Vrednosti Ca/Si-razmerja različnih mešanic.



Slika 5 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-1.

4 • SKLEP

Na osnovi opravljenih raziskav možnosti zamenjave mineralnega agregata z odpadno plastiko, pri čemer so bili kot odpadna plastika uporabljeni PP-mlevci, lahko pridemo do naslednjih sklepov:

1. Tlačna in upogibna natezna trdnost betona se z dodajanjem PP-mlevcev znižata.
2. Z dodajanjem PP-mlevcev je možno pripraviti beton trdnostnega razreda C 25/30. Tak beton se lahko uporabi v enostavnih betonskih konstrukcijskih elementih.
3. Vez med betonom in PP-delci je šibka, saj luskasta in gladka površina plastičnega delca ne omogoča dobre adhezije med PP-delci in cementno matrico.
4. Na podlagi analize SEM-SEI je na prehodnem območju med PP-delci in cement-

no matrico opaziti številne mikrorazpoke. Te mikrorazpoke se širijo v cementno matrico, kjer se med seboj združujejo v razpoke večjega velikostnega razreda. Večje razpoke vodijo do hitrejše porušitve betonskega elementa in s tem do nižjih tlačnih ter upogibnih nateznih trdnosti.

5. S pomočjo analize SEM-EDS smo pridobili Ca/Si-razmerja. Razvidno je, da vrsta EFP vpliva na vrednosti Ca/Si-razmerja in posledično na mehanske lastnosti. V mešanici PPM-EFP-1 je Ca/Si-razmerje manjše od tistega v mešanici PPM-EFP-2. V primeru zamenjave deleža cementa z EFP je pomembno izbrati tak pepel, ki ima dovolj veliko specifično površino in reaktivnost s stranskimi produkti hidratacije cementa.

Največja prednost uporabe odpadne plastike in EPF v betonski mešanici je zmanjševanje odpada v naravi. Proizvodnja plastike in EFP se vsako leto večja, s tem pa je vedno več odlagališč. Zato je zelo pomembno, da se vsaj del plastike in EFP reciklira. Videli smo, da lahko delež mineralnega agregata v betonski mešanici nadomestimo s plastičnimi delci, s tem pa dobimo beton, katerega tlačna trdnost je še vedno dovolj dobra za uporabo v enostavnih betonskih konstrukcijskih elementih. Prednost uporabe plastike proti drugim recikliranim materialom, na primer z recikliranim naravnim agregatom, pa je tudi, da v primeru plastike v beton ne dodajamo različnih primesi, ki bi lahko dodatno negativno vplivale na lastnosti betona. Postopek recikliranja plastike je namreč veliko bolj kontroliran. Da bo gradbena industrija širše sprejela uporabo recikliranih plastičnih odpadkov v betonu, bo potrebnih še precej preiskav z vidika ekonomije, družbene sprejemljivosti, reologije in trajnosti.

5 • LITERATURA

- Almeshal I., Tayeh B., Alyousef R., Alabduljabbar H., Mohamed A. M., Alaskar A., Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review, *Construction and Building Materials*, 253, 2020.
- Babafemi A. J., Šavija B., Paul S. C., Anggraini V., Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A review, *Sustainability*, 10, 2018.
- Bahij S., Omary S., Feugeas F., Faqiri A., Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review, *Waste Management*, 113, 157-175, 2020.
- Basha S. I., Ali M. R., Al-Dulaijan S. U., Maslehuddin M., Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete, *Journal of Building Engineering*, 32, 2020.

- Belmokaddem M., Mahi A., Senhadji Y., Pekmezci B. Y., Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate, *Construction and Building materials*, 257, 2020.
- Bendimerad, A.Z., Rozi re, E., Loukili, A., Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete, *Construction and Building Materials* 121, 733-745, 2016.
- Case R. J., Duan K., Suntharavadevel T. G., On Effects of Fly Ash as a Partial Replacement of Cement on Concrete Strenght, *Applied Mechanics and Materials*, 2012.
- Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Scarfato, P., Di Maio, L., Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates, *Construction and Building Materials* 170, 200-206, 2018.
- Červan U., Določitev optimalne mešanice betona z uporabo PP mlevcev kot nadomestilo mineralnega agregata, 2019.
- Ersan Y. C., Gulcimen S., Imis T. N., Saygin O., Uzal N., Life cycle assessment of lightweight concrete containing recycled plastics and fly ash, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020.
- Garcia N. M., Zapata L. E., Suarez O. M., Cabrera-Rios M., Effect of fly ash and nanosilica on compressive strenght of concrete at early age, *Advances in Applied Ceramics*, 114 (2), 99-106, 2015.
- Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L., Production, use and fate of all plastics ever made, *Science advances*, 3, 2017.
- Gholampour A., Ozbakkaloglu T., Recycled plastic, *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, 59-85, 2019.
- Gu L., Ozbakkaloglu T., Use of recycled plastics in concrete: A critical review, *Waste Management*, 51, 19-42, 2016.
- Hemalatha T., Ramaswamy A., A review on fly ash characteristics- Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete, *Journal of Cleaner Production*, 147, 546-559, 2017.
- Herath C., Gunasekara C., Law D. W., Setunge S., Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review, *Construction and Building Materials*, 258, 2020.
- Ivanič A., Lubej S., Rudolf R., Anžel I., Bond behaviour of carbon-fiber yarn embedded in cement mortar, *Science and Engineering of Composite Materials*, 18, 181-186, 2011.
- Ivanovski M., Kontrola elastičnih lastnosti betona z dodatkom gumenih sekancev, 2016.
- Jelušič P., Lubej S., Ivanič A., Odpornost betona z dodatkom reciklirane gume proti zmrzovanju in tajanju, *Gradbeni vestnik*, 62, 124-130, 2013.
- Kan, A., Demirboğa, R., A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates, *Journal of materials processing technology* 209(6), 2994-3000, 2009.
- Karahan O., Atis C. D., The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Materials and Design*, 32, 1044-1049, 2010.
- Kavčič F., Cotič Z., Prebil D., Ipavec A., Jereb V., Bokan Boksiljkov V., Priročnik za beton, Načrtovanje in proizvodnja betona, Združenje za beton Slovenije, 2018.
- Kunther W., Ferreira S., Skibsted J., Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium-silicate-hydrate binders, *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 17401-17412, 2017.
- Li X., Ling T-C., Mo K. H., Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 240, 2020.
- Lehne J., Presto F., Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cemen and Concrete, Chatahn House Report, Energy, Environment and Resources Department, London, 2018.
- Mahmood R. A., Kockal N. U., Cementitious materials incorporating waste plastics: a review, *SN Applied Sciences*, 2:2072, 2020.
- Meys R., Frick F., Westhues S., Sternberg A., Klankermayer J., Bardow A., Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling, *Resources, Conservation & Recycling*, 162, 2020.
- Plastics – the Facts, spletna stran združenja proizvajalcev plastike, https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf, Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers, datum vpogleda 8.9.2020, 2019.
- Safi B., Saidi M., Aboutaleb D., Maallem M., The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 43, 436-442, 2013.
- Saikia N., de Brito J., Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials*, 34, 2012.
- Sharma R., Bansal P. P., Use of different forms of waste plastic in concrete – a review, *Journal of Cleaner Production*, 112, 2016.
- Shehata M. H., Thomas M. D. A., Bleszynski R. F., The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 29, 1915-1920, 1999.
- Silva, R.V., de Brito, J., Saikia, N., Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates, *Cement and Concrete Composites* 35(1), 23-31, 2013.

SIST, SIST EN 12390-1:2001, Preskušanje strjenega betona – 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2001.

SIST, SIST EN 12350-2:2009, Preskušanje svežega betona - 2. del: Preskus s posedom stožca – Preskušanje svežega betona, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009a.

SIST, SIST EN 12350-6:2009, Preskušanje svežega betona – 6. del: Gostota, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009b.

SIST, SIST EN 12350-7:2009, Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka – Metode s pritiskom, 2009c.

SIST, SIST EN 12390-2:2009, Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009d.

SIST, SIST EN 12390-3:2009, Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009e.

SIST, SIST EN 12390-5:2009, Preskušanje strjenega betona – 5. del: Upogibna trdnost preskušancev, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009f.

SIST, SIST EN 206:2013, Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2013.

SIST, SIST 1026:2016, Beton-Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

Thomas M., Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, Portland Cement Association, 2007.

Timu A., Barbuta M., Green concrete with fly ash and plastic waste, Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi, 64 (3), 2018.

Wang Y., Zheng T., Zheng X., Liu Y., Darkwa J., Zhou G., Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers, Construction and Building Materials, 251, 2020.

Zaleska M., Pavlikova M., Pokorný J., Jankovský O., Pavlík Z., Černý R., Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics, Construction and Building Materials, 180, 1-11, 2018.

Zhang P., Li Q., Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume, Composites: Part B, 45, 1587-1594, 2012.