

# ZBRINJAVANJE NEMETALNE KOMPONENTE TISKANIH PLOČICA

## DISPOSAL OF NON-METALIC COMPONENTS OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

Aleksandra Anić Vučinić<sup>1</sup>, Dinko Vujević<sup>1</sup>, Vitomir Premur<sup>1</sup>, Ivana Melnjak<sup>1</sup>, Dario Canjuga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA, aav@gfv.hr, dinko.vujevic@gfv.hr, vitomir.premur@gfv.hr, ivana.melnjak@gfv.hr; dario.canjuga282@gmail.com

**Sažetak:** Tiskane pločice (TP) predstavljaju 3 do 5% mase EE otpada, ali su ujedno njegov najsloženiji dio, s najvrijednijim ali i najopasnijim komponentama. Tehnologija recikliranja TP-a s ciljem iskorištavanja vrijednih metala je usvojena, no zbog složenosti procesa, ograničeno se primjenjuje. Približno 70% mase TP-a predstavlja nemetalna komponenta (NMF) odnosno plastika, keramika, staklo i slično bez tržišne vrijednosti. Procjenjuje se da u RH godišnje nastane između 350 i 600 t NMF-e. Zbog sastava i sadržaja štetnih spojeva i elemenata opasni je otpad, koji se u nerazvijenim zemljama uglavnom odlaže, dok ga razvijene spaljuju uz znatne troškove.

Rad se bavi ispitivanjem postupka, koji koriste NMF kao sirovinu u proizvodnji betona. Uz kratki pregled zbrinjavanja TP-a i NMF-e, u radu se daje i pregled dosadašnjih svjetskih iskustva u zbrinjavanju NMF inkapsuliranjem u beton ili cement. U radu su prikazani i dobiveni rezultati istraživanja - laboratorijska ispitivanja čvrstoće betona s NMF-om kao punilom. U ispitivanjima se 5% mineralnog agregata supstituiralo NMF-om različite granulacije te se ispitala tlačna čvrstoća kocki starih 7 odnosno 28 dana. Temeljem dobivenih rezultata dane su smjernice za nastavak ispitivanja s ciljem korištenja NMF-a kao repromaterijala.

Učinkovitost inkapsuliranja štetnih tvari određena je ispitivanjem eluata u standardnim uvjetima.

**Ključne riječi:** tiskane pločice, nemetalna komponenta, beton

**Abstract:** Printed circuit boards (PCB) represent 3 to 5% by weight of WEEE and are also its most complex part with the most valuable and the most dangerous components at the same time. Recycling technology of PCBs is adopted in order to exploit valuable materials, but due to the process complexity, technology is limited in application. Approximately 70% by weight of PCBs is non-metal fraction (NMF) which includes plastic, ceramics, glass and similar materials without market value. It is estimated that in Republic of Croatia arises between 350 and 600 tons of NMF on annual basis. Due to its composition and content of hazardous components NMF is hazardous waste that is mostly disposed in undeveloped countries, while developed countries incinerate it at significant costs.

This paper deals with investigation of procedures which use NMF as raw material in concrete production. With a brief overview on disposal of PCBs and NMF, in this paper also is given overview on current experiences in disposal of NMF by encapsulation in concrete or cement. The paper presents the results of laboratory studies on strength of concrete with NMF as filler. In the studies 5% of mineral aggregate was substituted with NMF of different granulation and was tested on compressive strength of cubes aged 7 and 28 days. Based on the obtained results, guidance for continuation of studies with the aim of using NMF as raw material is given.

Encapsulation efficiency of the harmful substances was determined by testing the leachate in the standard conditions.

**Keywords:** printed circuit boards, non-metal fraction, concrete

Zaprimljeno/Received: 30.10.2014 / Prihvaćeno/Accepted: 04.11.2014

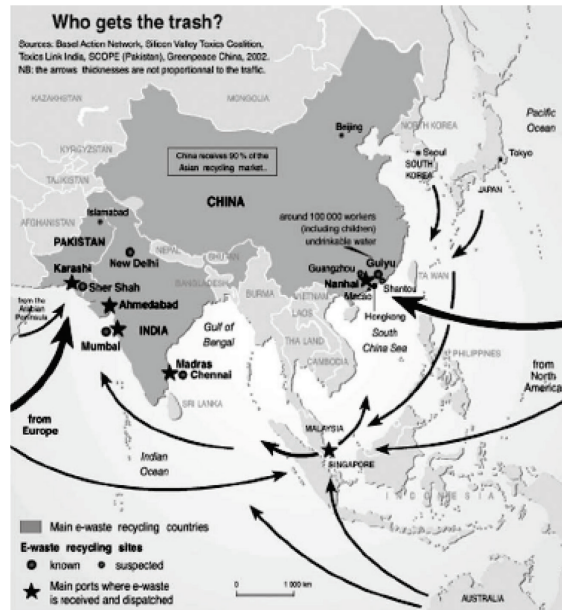
Znanstveni rad / Scientific paper

### 1. UVOD

Procjenjuje se da diljem svijeta godišnje nastaje od 20 do 50 milijuna tona EE otpada, što predstavlja od 1 do 2% mase komunalnog otpada s od 2 do 3 puta bržim trendom rasta (Luda, 2011). U Europi nastaje od 6,5 mil.t do 12 mil.t EE otpada, odnosno cca 8% mase komunalnog otpada s godišnjim trendom rasta od 4% do 5% (Moltó et al., 2011). Na tržište Republike Hrvatske u 2012. godini stavljeno je 39.663,17 t EE opreme, a sakupljeno 16.186,83 t EE otpada (Agencija za zaštitu okoliša, 2013). Načini zbrinjavanja EE otpada, kako u svijetu, tako i u Europi nisu na zadovoljavajućoj razini. Najveće količine EE otpada zbrinjavaju se u Kini, Indiji, Istočnoj Africi (Slika 1.) na vrlo niskoj tehnološkoj razini (Slika 2.), uz ogromna zagađenja okoliša (Sthiannopkao et al., 2013) (Slike 1. i 2.).

TP-e su neizbježni dio EE opreme i čine od oko 3% do 6% njene mase (Wang et al., 2012). Služe kao nosač svih pasivnih i aktivnih komponenti te ih povezuju u cjeloviti elektronički sklop s tankim slojem bakrenog vodiča (Slika 3.). Heterogenog su sastava (sadrže metale, organski materijal, staklena vlakna i dr.) što otežava proces recikliranja. Sadržaj vrijednih metala trenutno je glavni motiv njihove obrade. Sadržaj korisne frakcije (uglavnom metalne frakcije, MF) izrazito varira ovisno o autorima i uzorkovanju (Chao et al., 2011; Oguchi et al., 2011; Yadong et al., 2006; Bizzo et al., 2014) i glavni je motiv njihove obrade.

Uz Au i Pd, najveću vrijednost predstavlja Cu koji čini od 16% do 27% mase TP (Goosey et al., 2002; Wang et al., 2012), odnosno koncentracija mu je i do 30 puta veća nego u rudama gore.



Slika 1. Tokovi EE otpada (Gupta, 2012)



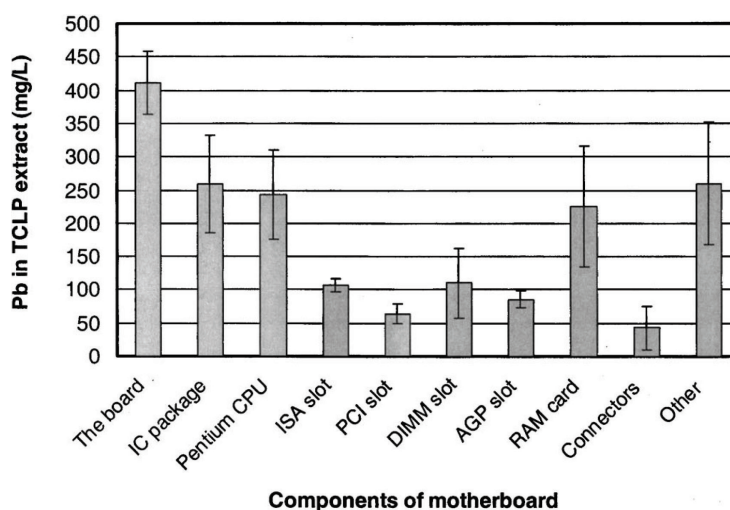
Slika 2. Zbrinjavanje EE otpada u nerazvijenim zemljama (Gupta, 2012)



Slika 3. Očišćena i kompletna TP

Tablica 1. Neki podaci o izvorima, odlaganju, uporabi i raspodjeli EE otpada u svijetu za 2005. / 2010. god., (Zoeteman et al., 2010)

Država, regija	God. proizvodnja <u>mil.t</u>	Zbrinjavanje <u>mil.t</u>	Recikliranje <u>mil.t</u>	Izvoz <u>mil.t</u>	Uvoz <u>mil.t</u>
SAD	8,4	5,7	0,42	2,3	-
EU25	8,9	1,4	5,9	1,6	-
Japan	4,0	0,6	2,8	0,59	-
Kina	5,7	4,1	4,2	-	2,6
Indija	0,66	0,95	0,68	-	0,97
Zapadna Afrika	0,07	0,47	0,21	-	0,61



Slika 4. Ličing test. olova (Yadong et al., 2006): The Board-matična ploča, IC package –Integrirani sklop, pentium CPU –procesor, ISA slot- Standardizirani slotovi, PCI slot-slot za periferne komponente, DIMM slot- slot za memoriju, AGP slot- Slot video kartice, RAM card – radna memorije, Connectors-konektori, Other-ostalo

TP obrađuju se predtretmanom, najčešće rastavljanjem, mehaničkom obradom, usitnjavanjem i koncentracijom u el. polju. Na kaju metalne komponente tretiraju se pirometalurškim, hidrometalurškim, ili biotehnoškim procesima.

Nakon standardnih postupaka obrade TP-a, ostaje približno 70% otpadne nemetalne frakcije (NMF) (Guo et al., 2009) koja predstavlja opasni otpad (Ban et al., 2005; Niu et al., 2007; Jovičić et al., 2012; Blažić, 2011) i neophodno ju je adekvatno zbrinuti. Nui et al. (2007), ispitali su topljivost teških metala sa TP i različitih komponenti i ustanovili da je Pb nositelj ekotoksičnosti TP, neovisno da li se radi o kompletnim ili očišćenim TP. Izluživanjem se može osloboditi i do 50% Pb koje sadrže, a koncentracije u eluatu veće su od 30 do 100 puta od dozvoljenih granica (Slika 4.). Oslobođenje ostalih teških metala izluživanjem zabilježeno je u po okoliš neškodljivim količinama.

U najvećoj mjeri radi se o kompozitnom materijalu vitroplastu, pertinaksu i njima sličnim materijalima koji se sastoje od termostabilnih epoksidnih ili poliesterskih smola i armature od staklenog ili pamučnog pletiva (Tablica 2.).

Iskorištavanje NMF-e uglavnom je samo djelomično riješeno. Najčešće se zbrinjava spaljivanjem ili odlaga-

njem (Wang et al., 2012; Goosey et al., 2002). Spaljivanjem se oslobađaju i vrlo toksični polimerizirani dibenzodioxini i dibenzofurani, dok se njihovim odlaganjem podzemne vode i tlo ugrožavaju teškim metalima i usporivačima gorenja na bazi broma (Wang et al., 2012). Iz navedenih razloga nužno je razvijanje ekonomski opravdanih i za okoliš prihvatljivih procesa recikliranja NMF.

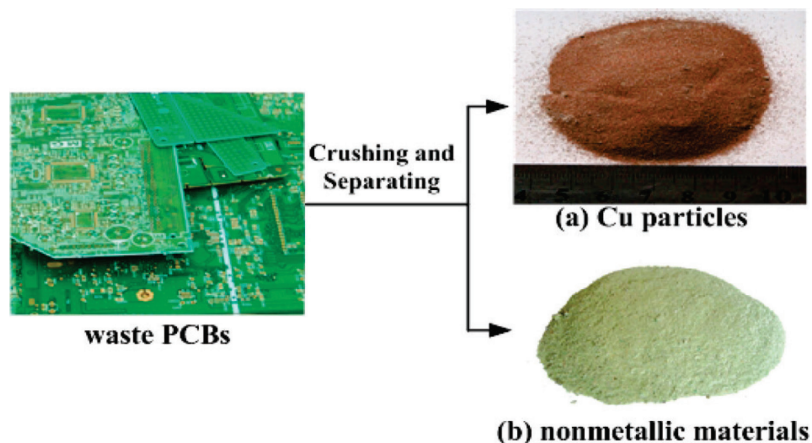
Na očišćenim TP s kojih su odstranjene elektroničke komponente još uvijek se nalazi više od 20% metala. Iako dominiraju Cu, Al Sn, Pb i Ni, značajne su i količine plemenitih metala koje možemo naći u očišćenim TP. Stoga se i očišćene TP podvrgavaju procesima odvajanja metalne frakcije, nakon čega preostane NMF u obliku praha (Slika 5.). Sastav praha NMF nakon obrade prikazan je u Tablici 5.

Tablica 2. Sastav NMF tiskanih pločica (Sohaili et al., 2011)

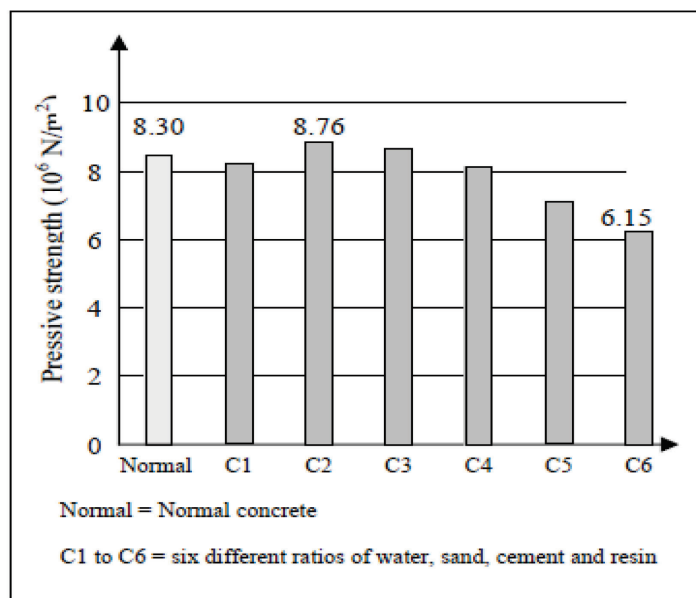
Komponenta	Udio komponente (% mase)
Stakleni prepreg	30-45
Epoksidne smole	35-40
Punilo	5
Razni nemetali	15-30

Tablica 3. Sastav praha NMF nakon obrade (Zheng et al., 2009)

Uzorak	Nemetali	Udio Cu (%)	Udio staklenih vlakana, (%)	Udio smola i ostalog (%)
1	Sitno	1,64	71,50	26,86
2	Srednje	1,05	55,50	43,45
3	Krupno	0,48	46,00	53,52



Slika 5. (a) metalna frakcija, (b) NMF (Guo et al., 2009)



Slika 6. Tlačne čvrstoće betona spravljenog sa NMF-om TP (Canjuga, 2014)

U prošlosti NMF zbrinjavala se odlaganjem ili spaljivanjem. Oba postupka imaju prouzrokuju onečišćenja okoliša, spaljivanjem emisijom polibromiranih dibenzodioxina, i dibenzofurana, dok se odlaganjem onečišćuju podzemne vode teškim metalima i retardantima gorenja na bazi broma (tetrabrombysphenol).

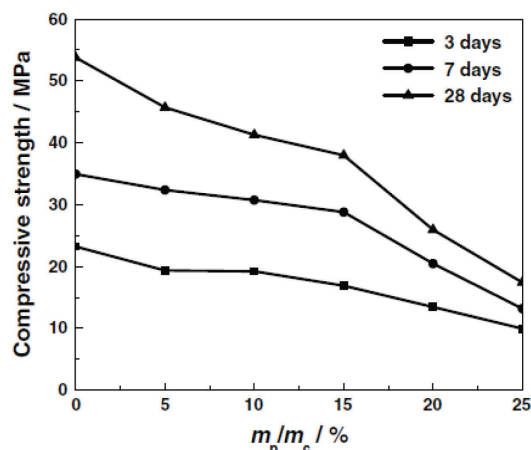
Provedena su brojna ispitivanja mogućnosti uporabe, no uglavnom na znanstvenoj i eksperimentalnoj razini. Ispituje se i mogućnost obrade NMF-a pirolitičkim procesima (Yang et al., 2013), procesima rasplinjavanja, depolimerizacije u superkritičnim uvjetima te korištenjem

kao adsorbensa u procesu pročišćavanja otpadnih voda (Anić Vučinić et al., 2012; Mikić, 2012), kao punila u termostabilnim i termoplastičnim masama (Mou et al., 2004), modifikatora za viskoelastične materijale te kao punila u proizvodnji betona (Batayneh et al., 2007).

Ispitivanja utjecaja raznih vrsta otpadnih plastičnih na svojstva svježeg i očvrstnalog betona istraživali su Sidique i dr. (2008). Ustanovili su da se ugradnjom plastičnih masa mogu i poboljšati neka svojstva svježeg te parametri čvrstoće očvrstnalog betona. Niu i Li (2007) ugrađivali su izrezane komade NMF-e TP u betonska

probna tijela te uspjeli dobiti beton vrlo dobrih mehaničkih svojstava, uz gotovo potpuno inkapsuliranje teških metala. Mou et al. (2007) potvrdili su da se umješavanjem NMF-e TP može spraviti beton dobrih mehaničkih svojstava uz adekvatan omjer bitnih sastojaka (Slika 6.).

Wang et al. (2012) izradili su probna tijela u obliku prizmi dimenzija 4x4x16 cm umješavanjem praha od NMF-e TP. Izrađivao je probna tijela s približno 22,5% cementa i variranjem udjela NMF-e u punilu u rasponu od 0% do 4,68%. Ispitivanjima je došao do saznanja da se s povećanjem udjela NMF-e smanjuju zapreminska težina te tlačna i vlačna čvrstoća ispitnih tijela (Slika 7.).



Slika 7. Tlačna čvrstoća betona spravljenog uz dodatak NMF-e TP (Wang et al., 2012)

Anić-Vučinić et al. (2012) ispitili su također tlačnu čvrstoću betona na kockama dimenzija 10x10x10cm uz supstituciju punila NMF-om TP u udjelu od 0%; 5% i 10%, te dobili rezultate koji potvrđuju smanjenje tlačne čvrstoće i zapremske težine. Ujedno je provedbom postupka izluživanja utvrđeno da se u betonu inkapsulira znatni udio teških metala.

## 2. MATERIJAL I POSTUPAK

U pripremi uzoraka, a radi lakše usporedbe rezultata, korištena su punila, vezivo te dodatak, istovjetni onima koji se koriste u komercijalnoj proizvodnji opločnika. Omjerima sastojaka betona pokušalo se u najvećoj mjeri približiti omjerima koji se koriste u industrijskoj proizvodnji opločnika.

Kao mineralno punilo korišteni su slijedeći agregati:

- Prirodni pijesak klase -4 mm šljunčare Hrastovljan
- Prirodni pijesak klase 8/4 mm šljunčare Hrastovljan

Vezivo:

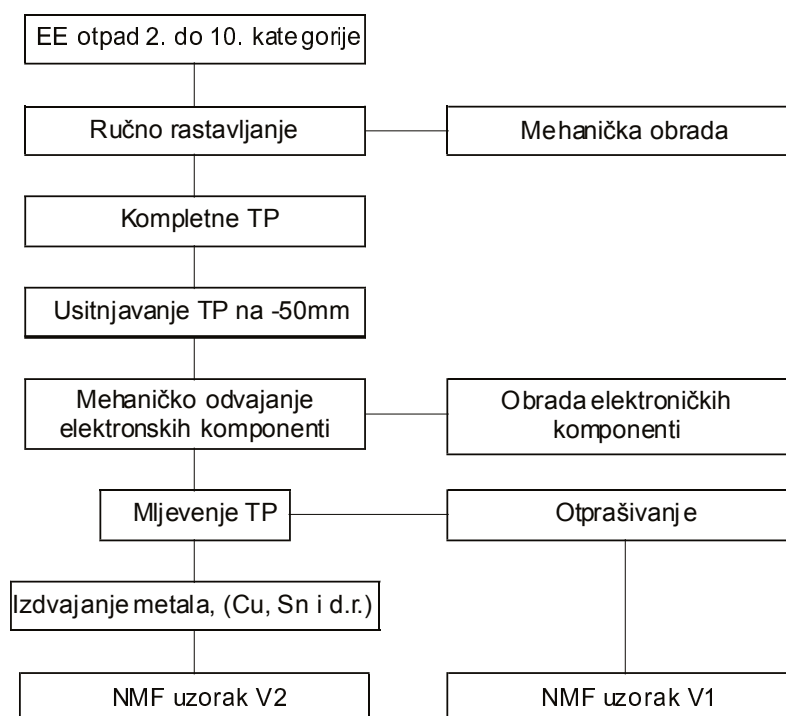
- Cement 42,5 N Nexce – Našicecement d.d.

Dodatak:

- Dodatak za hidrofobnost komercijalnog naziva Wetmix

Uzorci NMF V1 i V2 predstavljaju cjelokupnu proizvodnju jedne šarže obrade TP u pilot postrojenju tvrtke SPECTRA-MEDIA d.o.o. u Bistri (Slika 8.). Uzorak V1 predstavlja sitniju NMF-u izdvojenu otprašivanjem prilikom usitnjavanja, a uzorak V2 usitnjenu NMF-u oslobođenu metalne komponente i nakon odvajanja metala (Slika 9.).

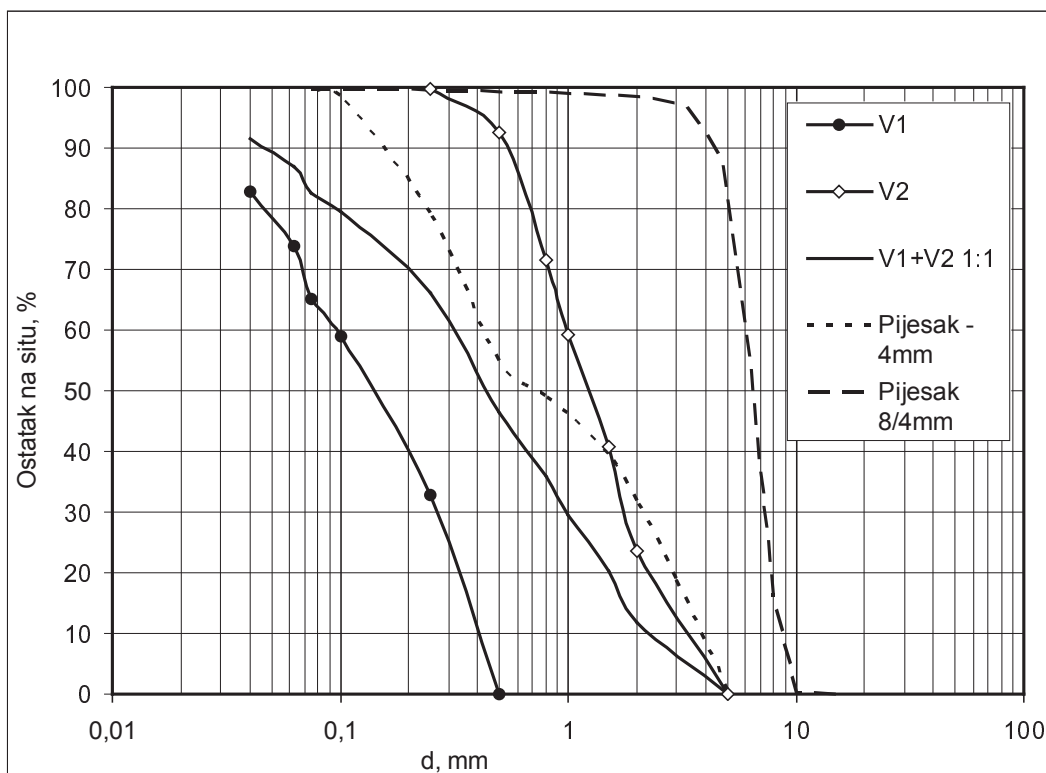
Na uzorcima V1 i V2 određen je gubitak žarenjem na 815°C u trajanju od 2 sata (Tablica 4.). Granulometrijski sastav uzoraka NMF-e i punila (Slika 10.) određen je suhim sijanjem na sitima s pletenom prosječnom površinom, kvadratnih otvora (Canjuga, 2014).



Slika 8. Tehnološka shema dobivanja uzoraka V1 i V2



Slika 9 Uzorci NMF-e V1 i V2



Slika 10. Granulometrijski sastav uzoraka NMF

Tablica 4. Rezultati određivanja sagorivog u uzorcima NMF

Uzorak	*g.ž., %	Sred. g.ž., %
V1	29,31	29,99
	30,67	
V2	83,14	82,98
	82,81	

### 3. POSTUPAK

Utjecaj granulometrijskog sastava na čvrstoću betona spravljenog s usitnjenom NMF-om TP određen je ispitivanjem tlačne čvrstoće kocki brida 10,0 cm. Beton je spravljen prema recepturi kojom se oponaša receptura za izradu opločnika (Tablica 5.) s tim da je 5% mineralnog punila supstituirano NMF-om TP. U uzorku A korištena je sitnija klasa NMF označena sa V1, a u uzorku B, krupnija klasa NMF oznake V2 (Slika 11.). Probna tijela izrađena su i ispitana u Laboratoriju za oplemenjivanje i ispitivanje mineralnih sirovina Geotehničkog fakulteta u Varaždinu.

#### Izrada probnih tijela:

Probna tijela izrađena su u skladu s EN 12390-2:2009: Ispitivanje očvrstnuloa betona – 2.dio: Izrada i

njega ispitnih uzoraka za ispitivanje čvrstoća. U skladu s točkom 5. Norme sabijanje je obavljeno na vibrostolu frekvencije 50 Hz i amplitude 0,3 mm u trajanju od 60 s. Uzorci su njegovani na zraku zasićenom vodenom parom pri temperaturi od 20°C.

Od recepture koja se primjenjuje za za industrijsku proizvodnju pločnika odstupilo se jedino u odnosu vode i cementa (vodocementni faktor w/c). Zbog laboratorijskih uvjeta nije se mogla postići ugradiva smjesa uz vodocementni faktor 0,35 te je u laboratorijskim uvjetima korišten vodocementni faktor w/c =0,6.

Načinjena su probna tijela bez NMF-e da bi se dobio referentni uzorak, tijela u kojima se 5% mineralnog punila zamjenilo sa sitnijom NMF-om (V1), tijela s 5% NMF-e u punilu i probna tijela u kojima se 5% punila sastojalo od mješavine NMF V1 i V2 u odnosu 1:1.

Tablica 5. Receptura za laboratorijsku pripremu ispitnih uzoraka

Udio NMF u punilu, %	0		5	
	%	g	%	g
Komponenta				
NMF	0,0	0,0	4,3	102,0
-4 – miješano	39,0	936,0	37,1	889,2
8/4 – miješano –	46,0	1104,0	43,7	1048,8
Cement 42,5 N Nexe	15,0	360,0	15,0	360,0
UKUPNO ČVRSTO	100,0	2400,0	100,0	2400,0
W/C, voda	0,6	216,0	0,6	216,0
Wetmix – (1% cementa)		3,6		3,6
UKUPNA MASA		2619,6		2619,6



Slika 11. Sirovine korištene za izradu probnih tijela



*Slika 12. Miješanje betonske smjese*



*Slika 13. Ispitivanje tlačne čvrstoće*

#### **Ispitivanje tlačne čvrstoće**

Tlačna čvrstoća probnih tijela određena je nakon 7 odnosno 28 dana stvrdnjavanja u skladu s normom EN 12390-3:2009: Ispitivanje očvrstnuloa betona – 3.dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka. Obavljeno je hidraulič-

kom prešom ZRMK Ljubljana, mjernog područja 400 kN odnosno 150 kN, podatka očitavanja 0,5 kN (Slika 14.). Tlačna čvrstoća označava se kao  $f_{ck,cube}$  i za kocke brida 100 mma iznosi 90% čvrstoće kocki brida 200 mm odnosno 120% čvrstoće valjka,  $f_{ck,cyl}$ , baze 150 mm i visine 300 mm.



#### 4. REZULTATI S DISKUSIJOM

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće kocki prikazani su dijagramom na Slici 14. Referentni uzorak dostiže čvrstoću  $f_{ck,cube}$  od 27,04 kN/m<sup>2</sup> odnosno 36,12 kN/m<sup>2</sup> nakon 7 odnosno 28 dana.

Vidimo da uzorci s 5% NMF koja se sastoji od mješavine uzorka V1 i V2 dostiže najmanju čvrstoću odnosno 11,97 kN/m<sup>2</sup> nakon 7 dana odnosno 15,53 kN/m<sup>2</sup> nakon 28 dana. Konačna čvrstoća iznosi 44,27% odnosno 44,30% čvrstoće referentnog uzorka.

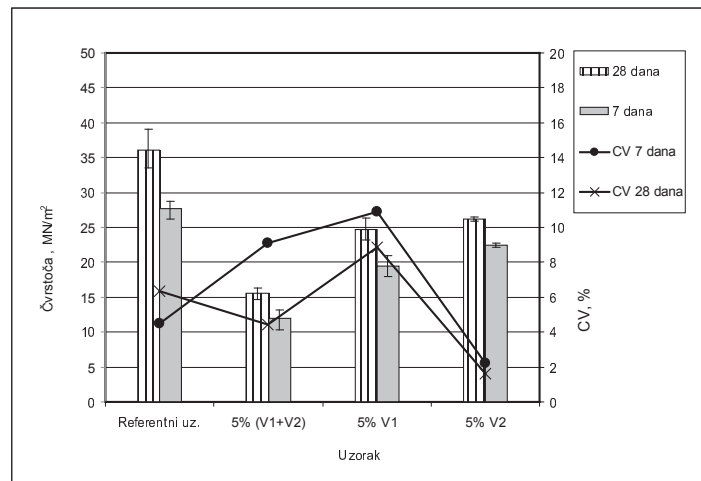
Kocke spravljene s 5% NMF koja se sastoji samo od uzorka V1 ili V2 pokazuju veće čvrstoće nego prethodno opisani uzorci. Uzorak sa sitnijom NMF-om (V1) nakon 7 dana doseže čvrstoću od 19,50 kN/m<sup>2</sup>, a nakon 28 dana 24,75 kN/m<sup>2</sup>. Ukoliko u uzorku zamijenimo 5% punila krupnijom NMF-om (V2) čvrstoće kocki iznose 22,45 odnosno 26,20 kN/m<sup>2</sup>. Čvrstoće kocki, ukoliko se u betonsku smjesu ugrađuje samo sitnija NMF odnosno krupnija NMF nakon 28 dana dosežu 68,52 odnosno 72,53% čvrstoće referentnog uzorka.

Na osnovu dobivenih rezultata može se zaključiti, bez obzira da li u beton umješavamo NMF-u TP ili ne, čvrstoća betona raste s vremenom stvrdnjavanja. Nakon 7 dana probna tijela dosežu 76 do 85% čvrstoće kocki starih 28 dana. Iz rezultata proizlazi da širina klase NMF-e negativno utječe na čvrstoće betoa. Za očekivati je bilo da

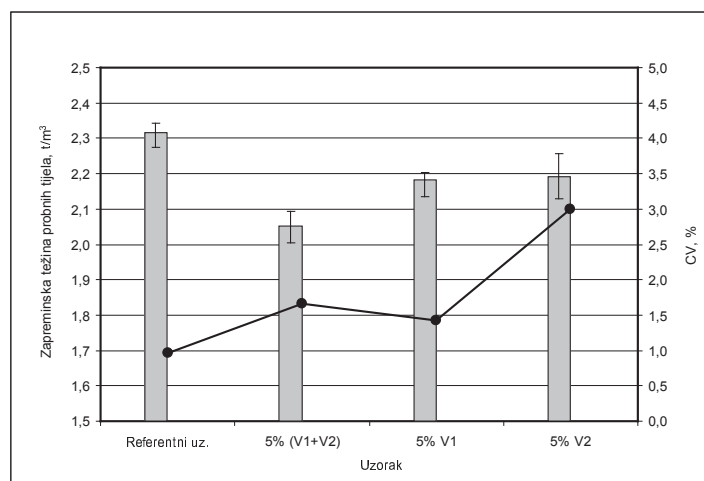
će probna tijela sa sitnijom klasom NMF-e, uzorak V1, zbog najveće specifične površine punila pokazati znatno manju čvrstoću od ostalih probnih tijela. Međutim čvrstoća im je tek nešto manja od čvrstoće s krupnijom NMF-om, ali znatno veća nego s dodatkom mješavine sitnije i krupnije frakcije (V1+V2). Vjerojatno, razlog tomu je sastav punila odnosno veći udio stakla u najsitnijoj frakciji. Na znatno veći udio staklenih vlakana, koja uglavnom povećavaju čvrstoću betona, ukazuju Tablica 3. i rezultati žarenja uzoraka (Tablica 4.). Zapaža se i relativno velika disperzija rezultata mjerenja, odnosno koeficijent varijacije između 1,62 i 10,88%.

Rezultati određivanja zapreminskih težina probnih tijela potvrđuju rezultate drugih autora koji su konstatirali da se dodavanjem plastičnih masa ili NMF-e TP u beton smanjuje njegova zapreminska težina. Očekivano, najveću zapreminsku težinu imaju referentna probna tijela sa 2,315 t/m<sup>3</sup>. Zapreminske težine probnih tijela s 5% NMF-e u punilu iznose između 2,053 t/m<sup>3</sup> i 2,190 t/m<sup>3</sup>. Promatranjem rezultata uviđa se da se može povući korelacija između zapreminskih težina i čvrstoća probnih tijela (Slika 15.).

Ujedno vidi se da su mjerenja zapreminskih težina vrlo pouzdana jer je disperzija izmjerenih vrijednosti vrlo mala, na što ukazuje i koeficijent varijacije CV, koji je manji od 3%.



Slika 14. Tlačne čvrstoće probnih tijela



Slika 15. Zapreminske težine probnih tijela

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanjima je potvrđena mogućnost ugradnje NMF-e u beton. Očito granulometrijski sastav NMF-e kojom se supstituira dio mineralnog punila utječe na dosegnute čvrstoće betona, ali na čvrstoću utječe i sastav punila. Prema provedenim ispitivanjima širina klase NMF-e u punilu negativno utječe na čvrstoću betona, ali pozitivno na njegovu zapreminsku težinu. Zapreminske težine s NMF-om u punilu smanjuju zapreminske težine i u izravnoj su korelaciji s čvrstoćama. Beton spravljen prema receptu primijenjenom u ispitivanjima ne može zadovoljiti zahtjeve za izradu betonske galanterije, ali vrlo neresantno bi bilo provesti ispitivanja uz variranje udjela cementa i NMF-e.

## 6. LITERATURA

Agencija za zaštitu okoliša, (2013): Ivješće o električnom i elektroničkom otpadu za 2012. godinu, Zagreb, Dostupno na: <http://www.azo.hr/Izvjescja25>

Anić Vučinić, A., Vujević, D., Premur V., Lilek, H., Blažić, D., Lenček, S., Mikić, A., Kaniški, M.: Karakterizacija i mogućnosti upravljanja otpadom nastalim u procesu uporabe tiskanih pločica, Zbornik radova, XII. Međunarodni simpozij gospodarenja otpadom Zagreb (2012).

Ban, B. C., Song, J. Y., Lim, J. Y., Wang, S. K., An, K. G., Kim, D. S.: Studies on the Reuse of Waste Printed Circuit Board as an Additive for Cement Mortar, *Journal of Environmental Science and Health* 40 (2005) 645-656

Batayneh, M., Marie, I., Asi, I.: Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management* 27 (2007) 1870-1876

Bizzo, W. A., Figueiredo, R. A., Andrade, V. F.: Characterization of Printed Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical Separation, *Materials* 7 (2014) 4555-4566

Blažić, D.: Iskorištavanje vrijednih svojstava otpadne prašine od recikliranja tiskanih pločica, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin (2011), Diplomski rad.

Canjuga, D.: Optimiranje inkapsulacije EE otpada variranjem udjela cementa, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin (2014), Završni rad.

Chao, G., Hui, W., Wei, L., Jiangang, F., Xin, Y.: Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB), *Waste Management* 31 (2011) 2161-2166

Goosey, M., Kellner, R.: Scoping Study End of Life Printed Circuit Boards, Shipley Europe Limited (2002), Dostupno na [http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB\\_Study.pdf](http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf)

Guo, J., Guo, J., Cao, B., Tang, Y., Xu, Z.: Manufacturing process of reproduction plate by nonmetallic materials reclaimed from pulverized printed circuit boards, *Journal of Hazardous Materials* 163 (2009) 1019-1025

Guo, J., Guo, J., Xu, X.: Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review *Journal of Hazardous Materials* 168 (2009) 567-590

Gupta, D.: E-Waste: A Global Problem and related issues, *International Journal of Scientific & Engineering Research* 3 (2012) 2229-5518

Jovičić, N., Kalambura, S.: Zbrinjavanje električnog i elektroničkog otpada u RH - rezultati i izazovi, Znanstveno-stručni skup Gospodarenje otpadom Varaždin 2012.

Luda, P.M.: Recycling of Printed Circuit Boards, In: Kumar, S.(Ed): *Integrated Waste Management - Volume II*, Ed., InTech, Rijeka, 2011. (285-298)

Mikić, A.: Primjena koagulacije/flokulacije za pročišćavanje otpadnih voda nastalih u procesu obrade pirolitičkih dimnih plinova, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin (2012), Diplomski rad.

Moltó, J., Egea, S., Conesa, J.A., Font, R.: Thermal decomposition of electronic wastes: Mobile phone case and other parts; *Waste Management* 31 (2011) 2546-2552

Mou, P., Wa, L., Xiang, D., Gao, J., Duan, G.: A Physical Process for Recycling and Reusing Waste Printed Circuit Boards, *IEEE International Symposium* (2004) 237-242.

Mou, P., Xiang, D., Duan, G.: Products Made from Nonmetallic Materials Reclaimed from Waste Printed Circuit Boards, *Tsinghua Science and Technology*, 12 (2007) 276-283.

Niu, X., Li, Y.: Treatment of waste printed wire boards in electronic waste for safe disposal, *Journal of Hazardous Material* 145 (2007) 410-416

Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A., Kameya T.: A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources, *Waste Management* 31 (2011) 2150-2160

Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I.: Use of recycled plastic in concrete: A review, *Waste Management* 28 (2008) 1835-1852

Sohaili, J., Muniyandi, S. K., Mohamad, S.S.: A Review on Potential Reuse of Recovered Nonmetallic Printed Circuit Board Waste, *Journal of Engineering and Applied Sciences* 2 (2011) 946-951

Sthiannopkao, S., Wong, M.H.: Handling e-waste in developed and developing countries, Initiatives, practices, and consequences, 463-464 (2013) 1147-1153

Wang, R., Zhang, T., Wang, P.: Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar, *Materials and Structures* 45 (2012) 1439-1445

Wang, X., Gaustad, G.: Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards, *Waste Management*, 32 (2012) 1903-1913

Yadong Li, P.E.; Richardson, J.B.; Walker, A.K.; Yuan, P.-C.: TCLP Heavy Metal Leaching of Personal Computer Components, *Journal Of Environmental Engineering*, (2006) 497 - 504

Yang, X., Sun, L., Xiang, J., Hu, S., Su, S.: Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review, *Waste Management* 33 (2013) 462-473

Zheng, Y., Shen, Z., Cai, C., Ma, S., Xing, Y.: The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the polypropylene composites, *Journal of Hazardous Materials* 163 (2009) 600-606

Zoeteman, B.C.J., Krikke, H.R., Venselaar, J.: Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world, *Int J Adv Manuf Technol* 47 (2010) 415-436