

Primljen / Received: 8.6.2015.

Ispravljen / Corrected: 27.7.2016.

Prihvaćen / Accepted: 23.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.8.2018.

# Primjena plastike iz elektroničkog otpada u asfaltnim kolnicima

Autor:



Prof.dr.sc. **Lakshmi Murugan**, dipl.ing.grad.  
Fakultet inženjerstva i tehnologije Kamaraj  
Odjel za građevinarstvo  
Tamil Nadu, Indija  
[lakshmiciv@gmail.com](mailto:lakshmiciv@gmail.com)

Stručni rad

**Lakshmi Murugan**

## Primjena plastike iz elektroničkog otpada u asfaltnim kolnicima

U radu je prikazano istraživanje provedeno na uzorcima tradicionalnih asfaltnih mješavina i mješavina asfalta s dodatkom granula plastike kao zamjene za krupni agregat. Uspoređene su vrijednosti Marshallove stabilnosti asfaltnih mješavina s ciljem određivanja optimalnog udjela granula plastike. Cilj je bio utvrditi postoji li mogućnost da se u kolnicima primjene plastične komponente dobivene recikliranjem elektroničkog otpada, što se izvodi u sklopu plana za odgovorno gospodarenje elektroničkim otpadom, kojeg u posljednje vrijeme ima sve više.

**Ključne riječi:**

elektronički otpad, održivost, recikliranje, kolnici, bitumen

Professional paper

**Lakshmi Murugan**

## Use of e-plastic waste in bituminous pavements

This paper presents the research conducted on the samples of traditional asphalt mixes and asphalt mixes with plastic granules as replacement for coarse aggregate. Marshall stability parameters of these mixes are compared to determine an optimum proportion of plastic granules. The objective was to determine whether plastic components obtained by e-waste recycling can be used in pavement structures. The research was conducted in the scope of the plan for accountable management of increasingly growing quantities of e-waste.

**Key words:**

e-waste, sustainability, recycling, pavements, bitumen

Fachbericht

**Lakshmi Murugan**

## Verwendung von Kunststoff aus Elektronikschrott im Asphaltbelag

In der Abhandlung wird die Untersuchung dargelegt, die an Proben traditioneller Asphaltmischungen und Asphaltmischungen mit dem Zusatz von Kunststoffgranulat als Ersatz für großes Aggregat durchgeführt wurde. Verglichen wurden die Werte der Marshall-Stabilität der Asphaltmischungen mit dem Ziel, den optimalen Anteil des Kunststoffgranulats festzulegen. Das Ziel war es festzustellen, ob die Möglichkeit besteht, in den Fahrbahnen Kunststoffkomponenten zu verwenden, die aus wiederverwertetem Elektronischschrott gewonnen wurden, was im Rahmen des Plans der verantwortungsvollen Entsorgung von Elektronikschrott, wovon es in letzter Zeit immer mehr gibt, durchgeführt wird.

**Schlüsselwörter:**

Elektronischschrott, Nachhaltigkeit, Wiederverwertung, Fahrbahnen, Bitumen

## 1. Uvod

Značajna dostignuća u svijetu elektronike poboljšala su kvalitetu života suvremenog društva. Istodobno velik problem predstavljaju sve veće količine otpada od zastarjelih elektroničkih uređaja te znatna količina opasnog otpada generirana iz električnih i elektroničkih uređaja. Taj otpad predstavlja veliku prijetnju za zdravlje ljudi i okoliš. Strateški pristup upravljanju tim otpadom podrazumijeva trud svih sudionika kako bi se razvio proces uspješnog i održivog gospodarenja otpadom.

Gospodarenje elektroničkim otpadom sve je češća globalna tema, koja obuhvaća i posljedice djelovanja takvog otpada na ljude i okoliš. Potrebno je razviti učinkovitu strategiju gospodarenja otpadom, s naglaskom na mogućnost recikliranja. Globalne aktivnosti za zaštitu okoliša razvijaju se zahvaljujući povećanju živih i neživih resursa te s njima povezanih društvenih aktivnosti. Stvaranje elektroničkog otpada i mogućnost zagađenja okoliša njime povezuje okolišne probleme s elektroničkom i električnom industrijom. Prema Programu za okoliš Ujedinjenih naroda, u svijetu se godišnje proizvede od 20 do 25 milijuna tona elektroničkog otpada [1]. Institut ABI Research predviđa da će se u 2018. godini volumen odbačenih elektroničkih uređaja diljem svijeta povećati za 33 % u odnosu na 2012. godinu te će težiti osam puta više od ukupne težine egipatskih piramida.

U časopisu *Environmental Science & Technology* (2012.) predviđeno je da će u idućih 6 do 8 godina u zemljama u razvoju proizvodnja elektroničkog otpada biti najmanje dvaput veća u usporedbi s razvijenim zemljama. Također je predviđeno da će se do 2030. godine u zemljama u razvoju odbaciti, na godišnjoj razini, između 400 i 700 milijuna zastarjelih osobnih računala, što je znatno veća količina nego u razvijenim zemljama.

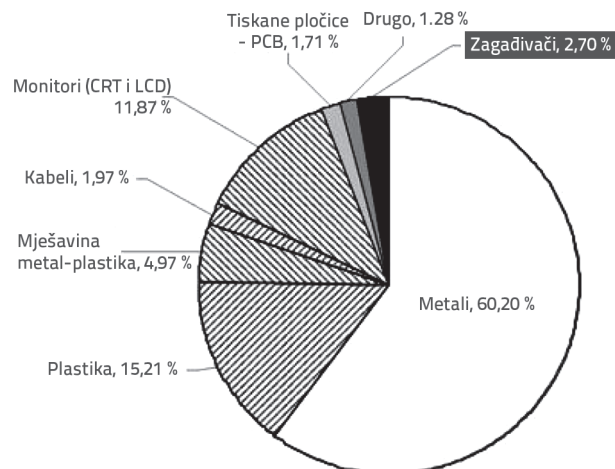
Izvršitelj Ujedinjenih naroda predviđa da će se do 2020. godine količine elektroničkog otpada, nastale odbacivanjem starih računala, povećati za 400 % u Kini, odnosno za 500 % u Indiji u usporedbi s količinama zabilježenim 2007. godine. Nadalje, količine elektroničkog otpada od odbačenih mobilnih telefona, zabilježene 2007. godine, mogle bi se povećati sedam puta u Kini, odnosno 18 puta u Indiji do 2020. godine [2]. Takva predviđanja zahtijevaju trenutno djelovanje u području gospodarenja elektroničkim otpadom u zemljama u razvoju poput Indije, gdje strateški plan za reguliranje procesa recikliranja treba biti uspostavljen s odgovarajućim značenjem za društvene reforme. Nevladine organizacije poput Toxics Linka aktivno nadziru štetne i opasne supstancije na području Indije. Organizacija izvještava o stvaranju otpadne električne i elektroničke opreme u Indiji, sektorima za recikliranje u državi i daje izvještaje utemeljene na toksikologiji tokova otpada [3]. Glavni fokus je na ekološkoj i ekonomičnoj procjeni procesa u industrijskim sektorima.

U izvještaju pod nazivom *Recycling from E- Waste to Resources*, koji je objavljen na Konvenciji u Baselu, korišteni su podaci iz 11 reprezentativnih zemalja u razvoju. Procijenjena je trenutna i buduća proizvodnja elektroničkog otpada [4]. Prema tom izvještaju, na globalnoj razini količina elektroničkog otpada se

godišnje povećava za približno 40 milijuna tona. Očekuje se da će se do 2020. godine količine elektroničkog otpada od odbačenih televizora, na području Kine i Indije, povećati od 1,5 do 2 puta, a od odbačenih hladnjaka količine bi se mogle udvostručiti ili čak trostručiti. Nadalje, za 2020. godinu je predviđeno da će se u Kini količina elektroničkog otpada iz odbačenih mobilnih telefona povećati sedam puta, a u Indiji čak 18 puta veća u odnosu na 2007. godinu. Ove činjenice pokazuju da treba posebnu pozornost usmjeriti na pripremu učinkovitog plana gospodarenja elektroničkim otpadom i svim njegovim komponentama.

### 1.1. Sastav elektroničkog otpada

U elektroničkom otpadu postoji više od tisuću različitih toksičnih tvari poput olova, žive, kadmija, selena, heksavalentnog kroma itd. Među njima prevladavaju crni metali, obojeni metali, plemeniti metali, staklo, plastika itd. Na slici 1. grafički je prikazan udio pojedinih materijala u elektroničkom otpadu.

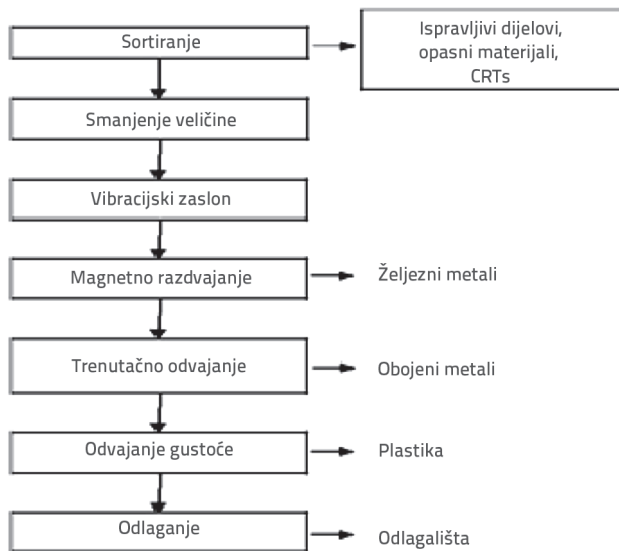


Slika 1. Udio pojedinih materijala u elektroničkom otpadu [5]

U mnogim gradskim područjima elektronički otpad koji se ne može ponovno koristiti predstavlja problem iz aspekta odlaganja ako ne postoji mogućnost njegove prerade. Otpad, koji nije moguće ponovno iskoristiti, odlazi se na odlagalištima otpada čime se ograničava njegova biološka razgradnja i time utječe na okoliš. Otpadna električna i elektronička oprema je sastavljena od različitih komponenti. Od velike je važnosti kategorizirati tokove otpada kako bi se razvio isplativ i ekološko prihvatljiv sustav recikliranja [6]. Slika 2. prikazuje proces razdvajanja različitih komponenti elektroničkog otpada.

Posebno dizajnirani plastični oblici sastavni su dio komunikacijske i elektroničke industrije. Dizajnirani su u obliku tiskanih pločica (eng. *Printed Circuit Boards - PCB*) i pomoćno su sredstvo u postupku proizvodnje čipova za računala. Da bi se mogla ponovno upotrijebiti plastika iz odbačenih elektroničkih uređaja potrebno je odvojiti metale od onih materijala koji imaju plastične komponente. Osnovni postupci prerade poput rezanja

i drobljenja plastičnih komponenti omogućuju stvaranje granula tražene veličine, čime se olakšava daljnji proces prerade.



Slika 2. Shematski dijagram e-otpada - plan za reciklažu materijala [7]

Prema podacima na naslovnoj mrežnoj stranici *Plastics information*, akrilonitril butadien stiren (ABS) je čvrsta visokokvalitetna plastika koja se primjenjuje kao zamjena za metalne dijelove pri izradi kućišta mikroprocesora (CPU) i tipkovnica. Osim ABS plastike, glavnu kategoriju smola korištenih u proizvodnji računala i televizora čine polistiren visoke žilavosti (HIPS), polifenilen oksid (PPO) i drugi.

## 1.2. Utjecaj elektroničkog otpada na okoliš

Toksični materijali koji se primjenjuju u postupku proizvodnje elektroničkih naprava glavni su razlog zagađenja uzrokovanog odbacivanjem zastarjelih elektroničkih uređaja u okoliš [8]. Smjernice Ministarstva okoliša i šuma (eng. *Ministry of Environment and Forest - MOEF*) iz 2008. navode da elektronički otpad sadrži brojne vrste supstancija i kemikalija (više od 1000 spojeva) koje uzrokuju ozbiljne probleme ljudskom zdravlju i okolišu [9].

Uobičajena metoda gospodarenja elektroničkim otpadom podrazumijeva odlaganje na odlagalištu otpada, no sva su takva odlagališta vodopropusna. Čak ni najbolja odlagališta nisu potpuno vodonepropusna, pa se određene količine kemikalija i metala procjeđuju u tlo. Situacija je daleko nepovoljnija kod starih, odnosno kod odlagališta sa slabim nadzorom odlaganja. Također, u obzir treba uzeti isparavanje metalne žive i dimetil žive. Nekontrolirani požari, do kojih može doći na takvim odlagalištima, predstavljaju dodatnu prijetnju za okoliš i zdravlje ljudi.

U mnogim zemljama u razvoju, s neformalnim sektorom za recikliranje, većina elektroničkog otpada je nepropisno obrađena. Takav otpad se obično spaljuje u reciklažnim dvorištima kako bi

se došlo do vrijednih metala poput zlata. Takvom neformalnom praksom oslobađaju se toksični oblaci koji se šire na velike udaljenosti te je mala stopa uporabe metala u usporedbi s vrhunskim industrijskim postrojenjima [11]. Komponente otpadne električne i elektroničke opreme i toksični sastojci navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Toksični sastojci iz otpadne električne i elektroničke opreme (prema EU direktivi)

| Sastojci                    | Komponente                                   |
|-----------------------------|--|
| Olovo i kadmij              | printane pločice                             |
| Živa                        | prekidači i monitori s ravnim zaslonom       |
| Kadmij                      | baterije računala                            |
| PCB                         | kondenzatori i transformatori                |
| Bromirani usporivač gorenja | tiskane pločice, plastična kućišta za kabele |
| Olovni oksid i kadmij       | katodne cijevi (CRTs)                        |
| PVC                         | izolacija kabela / ovojnica                  |

Različiti dijelovi komponenti elektroničkog otpada koje je moguće ponovno upotrijebiti koriste se u postupcima prerade i kondicioniranja. U ove su procese, iako se primjenjuju čak i jake kiseline, uključene žene i djeca. Primjena kiselina može ozbiljno utjecati na njihovo zdravlje. Također dolazi do zagađenja okoliša, no vlasnike postrojenja to posebno ne brine. Nakon odvajanja vrijednih dijelova iz elektroničkog otpada, ostaci koji nemaju novčanu vrijednost odlažu se na odlagalištima otpada zbog čega može doći do emisije toksičnih tvari [11].

U gusto naseljenim regijama ljudi su prisiljeni raditi u neprikladnom radnom okružju, gdje su izloženi opasnim kemikalijama, slabom provjetranju itd. Mnogi sudionici ne obraćaju pažnju na očigledne rizike i sigurnosnu praksu [12]. Kurian Joseph se dotaknuo teme o gospodarenju elektroničkim otpadom u Indiji. Najveći problemi koje je istaknuo odnose se na: nedostatak građanske svijesti, štetne uvjete u kojima se provodi recikliranje te na neodgovarajuće zakonske propise za sprječavanje povećanja količine elektroničkog otpada. Autor je preporučio implementaciju pristupa *Extended Producer Responsibility (EPR)* koji bi mogao pomoći smanjenju količine otpada [13].

## 1.3. Mogućnosti recikliranja elektroničkog otpada

Odlagališta elektroničkog otpada poput teških metala, stakla, plastike, crnih metala, obojenih metala te drugih toksičnih tvari izuzetno su štetna. Kako bi se umanjile opasnosti, nužno je usvojiti koncept 4R (eng. *reduce, reuse, recover and recycle*) koji se zasniva na reduciranju, ponovnoj upotrebi, uporabi i recikliranju otpada. Uobičajena je praksa postupanja s otpadom, koja ne uključuje recikliranje, odlagati ga na odlagališta otpada. S obzirom na to da elektronički otpad nije potpuno biorazgradiv, takav način postupanja nije ekološki prihvatljiv.

Potrebno je usvojiti nove postupke koji se zasnivaju na recikliranju otpada. Zbog prekomjerne prisutnosti određenih elemenata kao što su olovo, kadmij, živa, arsen i drugi, elektronički otpad se kategorizira kao opasan otpad. Ključni aspekt razvoja mehaničkog sustava reciklaže je učinkovito razdvajanje tih elemenata. Prisutnost plemenitih metala poput srebra, zlata, platine, paladijuma i drugih, ključan su ekonomski pokretač razvoja postrojenja za oporabu otpada. Koncentracija tih vrijednih metala razlog je snažnog interesa za uporabom elektroničkog otpada. Proces reciklaže plastike uključuje postupke usitnjavanja, odvajanja i granuliranja. Recikliranje je usvojeno kao osnovni postupak u pronalaženju ekološki prihvatljivog načina postupanja s plastičnim komponentama elektroničkog otpada.

Reciklirana plastika se razvrstava prema sirovinskom sastavu, a za to je potrebna velika količina radne snage te su troškovi obrade visoki. Recikliranjem otpada se osigurava zaštita okoliša. Primjenom plastike u postupku proizvodnje građevnih materijala smanjuje se količina tradicionalne sirovine za njihovu proizvodnju, a na taj se način ujedno rješava problem plastičnog otpada. Trenutačno je uobičajeno da se plastika koja se reciklira najprije razvrsta, a zatim se topi prije ponovne upotrebe. To zahtijeva brojnu radnu snagu i rezultira visokim troškovima obrade. Zbog toga se manja količina plastike reciklira, a preostala velika količina se odvozi na odlagališta otpada. S obzirom na to, traže se metode koje bi omogućile ponovnu upotrebu plastike bez ulaganja velikih napora i pretjeranih troškova. Osim toga, recikliranje velikih količina otpada trebao bi biti glavni odabir strategije gospodarenja otpadom s ciljem smanjenja problema vezanih uz odlaganje otpada.

Primjena plastike u postupku proizvodnje građevnih materijalima ima dvostruke prednosti. Na taj se način smanjuje potrebna količina tradicionalnih sastojaka za proizvodnju, a druga prednosti se ogleda u činjenici da se otpadna plastika, koja postaje sve veći problem, na taj način reciklira bez daljnjeg opterećivanja postrojenja za obradu i skladištenje otpada [14]. Ovisno o podrijetlu otpadnog materijala odlučuje se o primjeni postupka za recikliranje. Otpadna električna i elektronička oprema se usitjava na male, čak i na vrlo sitne granule. Mehaničko razdvajanje ima značajnu ulogu u procesu recikliranja otpadne električne i elektroničke opreme. Kenneth Stier i Gray Weede [15] zaključili su da se plastične granule dobivene iz stalaka za čestitke mogu upotrebljavati u betonu nakon što ih se usitni pomoću granulatora za plastiku na granule promjera približno od 0.010" do 0.030" (od 0,254 mm – 0,762 mm) i dužinu 1" (25,4 mm). Ispitivanja su pokazala da beton s dodatkom recikliranih plastičnih vlakana ima zadovoljavajuću tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje [15].

Istraživanja pokazuju da na reološka svojstva i kvalitetu bitumena utječe dodavanje polimernih spojevima kao što su guma i plastika. Aslam u svom radu [16] ističe da je bitumen, modificiran dodavanjem plastike iz otpada u masenom udjelu 5 do 10 %, poboljšao čvrstoću i trajnost kolnika. Dodavanjem sintetičkih polimera poput gume i plastike utječe se na reološka svojstva bitumena i time se poboljšava njegova kvaliteta.

Primjenom takvog bitumena poboljšavaju se svojstva kolnika i njegova trajnost. Mješavina bitumena i polimera prikladan je zamjenski materijal za izgradnju kolnika, jer ima visoke vrijednosti Marshallove stabilnosti i Marshallovog koeficijenta [17].

Justo i Veeraragvan [18] zaključili su da dodavanje reciklirane plastike u iznosu 8-postotnog masenog udjela rezultira modificiranom mješavinom asfaltnog betona poboljšane čvrstoće i stabilnosti. Kombinacija recikliranog polietilena niske gustoće (LDPE) i asfalta sprječava konstrukciju od starenja. Primjena plastike u bitumenu poboljšava svojstva mješavine i pomaže pri smanjivanju udjela šupljina te sprječava nastanak udarnih rupa [19]. Yue Hang je zaključio da se 15 do 30 % agregata može zamijeniti recikliranim polietilenom niske gustoće (LDPE) koji također pozitivno utječe na trajnost i ostala svojstva asfaltnih kolnika [20]. Proizvodnja asfaltnih mješavina s dodatkom recikliranog polietilena niske gustoće (LDPE) moguće je primjenom postojeće prakse i opreme te nije potrebno uvođenje alternativne tehnologije [21].

Reciklirane plastične komponente elektroničkog otpada nazivaju se granule plastike. Budući da se ovo istraživanje temelji na primjeni plastičnih komponenti elektroničkog otpada, u daljnjem će se tekstu granule plastike navoditi za djelomičnu zamjenu krupnog agregata. Ispitana je upotrebljivost granula plastike za proizvodnju modificirane asfaltnje mješavine. Svojstva modificiranih mješavina promatraju se na temelju Marshallovog indeksa stabilnosti.

## 2. Istraživanje

Primjena recikliranih granula plastike, dobivenih iz elektroničkog otpada, u izradi kolničkih konstrukcija nudi zanimljivo rješenje o reguliranju potreba za krupnim agregatom, kao i učinkovito postupanje s biološki nerazgradivom plastikom. Granule dobivene recikliranjem plastike djelomična su zamjena za krupni agregat u asfaltnim mješavinama [22, 23].

Provedeno je eksperimentalno istraživanje primjene recikliranih granula plastike iz elektroničkog otpada u asfaltnim mješavinama. Glavni cilj istraživanja bio je ispitati mogućnost upotrebe reciklirane plastike za djelomičnu zamjenu krupnog agregata u asfaltnim mješavinama. Projektirane su različite kombinacije asfaltnih mješavina s dodatkom plastike kako bi se pronašla mogućnost primjene reciklirane plastike. U tablici 2. su prikazana svojstva plastičnih čestica.

Tablica 2. Fizikalna svojstva čestica plastike iz elektroničkog otpada

| Svojstva                | Plastika iz e-otpada |
|-------------------------|----------------------|
| Specifična težina       | 1,01                 |
| Apsorpcija              | < 0,2 %              |
| Boja                    | bijela i crna        |
| Oblik                   | pravokutni           |
| Otpornost na drobljenje | < 2 %                |
| Otpornost na udarce     | < 2 %                |

Korišten je tip bitumena 60/70, koji je tvrdi od bitumena 80/100 te se primjenjuje kod visokih prometnih opterećenja [24]. Svojstva bitumena odgovaraju razredu S65 prema normi IS-73-2006 i IS-1208-1978. Rezultati laboratorijskog ispitivanja bitumena koji je korišten u ovom istraživanju prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Svojstva bitumena korištenog u ovom istraživanju

| Ispitivanje          | Rezultati |
|----------------------|-----------|
| Točka razmekšanja    | 46,3 °C   |
| Duktilnost           | 58 cm     |
| Penetracija na 25 °C | 67 mm     |

## 2.1. Klasifikacija mješavina

Ispitivanja su provedena prema Tehničkim uvjetima za ceste i mostove Ministarstva za cestovni promet i autoceste (eng. *Ministry Of Road Transport & Highway - MORTH*), a objavio ih je Indijski kongres za ceste (eng. *Indian Road Congress - IRC*).

Udio agregata prema Tehničkim uvjetima MORTH-a korišten u ovom istraživanju može se navesti s obzirom na referentnu mješavinu, 10:70:20 koja se sastoji od:

- 10 % agregata 11,2 mm (120 g)
- 70 % agregata 6,7 mm (840 g)
- 20 % kamenog brašna (240 g)

Sastav preostalih mješavina, korištenih u ovom istraživanju, prikazan je u tablici 4.

## 2.2. Postupak ispitivanja

Za svaki od četiri udjela veziva pripremljena su po tri uzorka za ispitivanje. Udio krupnog agregata, sitnog agregata i punila

u skladu je sa zahtjevima koje propisuju norme. Čvrstoća pripremljenih asfaltnih mješavina je određena primjenom Marshallovog pokusa stabilnosti. Uzorci su pripremljeni prema smjericama ASTM D 1559. Visina uzorka bila je 63,5 mm, a promjer 101,5 mm. Za svaki uzorak upotrijebljeno je približno 1200 grama drobljenog krupnog agregata i plastičnih granula u svrhu zamjene prirodnog agregata. Bitumen je zagrijan na temperaturu između 140 °C i 160 °C, a granule plastike su dodane agregatu u unaprijed određenom masenom udjelu. Potrebna količina bitumena je u točno određenom omjeru dodana agregatu, nakon čega su svi sastojci temeljito izmiješani. Modificirana asfaltna mješavina je ugrađena u kalup. Nakon 24-satnog mirovanja, uzorak je izvađen iz kalupa te je uronjen u vodenu kupelj zagrijanu do temperature 60 °C. Nakon 30 minuta uzorak je izvađen iz kupelji te obrisani tako da u njemu nema vode. Potom je uzorak postavljen u Marshallovu ispitnu glavu. Određene su vrijednosti Marshallove stabilnosti, indeks tečenja te gustoća uzoraka. Marshallova stabilnost je maksimalno zabilježeno opterećenje (u kN) tijekom ispitivanja tlačne čvrstoće. Indeks tečenja je ukupna vertikalna deformacija (u mm) pri maksimalnom opterećenju. Marshallov indeks (u kN/mm) se odnosi na krutost asfaltnih mješavina. To je zapravo omjer maksimalnog opterećenja i trajne deformacije.

## 3. Rezultati i rasprava

Tijekom izrade mješavine primijenjen je udio bitumenskog veziva bio u rasponu od 4,5 % do 6,0 %. Optimalni udio bitumena rezultira maksimalnom gustoćom mješavine pri zbijanju i maksimalnom stabilnošću. Rezultati Marshallovog ispitivanja referentne (tradicionalne) asfaltnih mješavina i asfaltnih mješavina u kojima je krupni agregat zamjena plastičnim granulama u određenom masenom udjelu od krupnog agregata prikazani su u tablicama 5. do 9.

Tablica 4. Svojstva mješavine

| Oznaka mješavine       | Krupni agregat<br>Veličina zrna 11,2 mm | Krupni agregat<br>Veličina zrna 6,7 mm | Granule plastike - maseni<br>udio od ukupne mase uzorka | Kameno brašno |
|------------------------|---|--|---|---------------|
| Mix CB<br>10:70:0:20   | 10 % - 120 g                            | 70 % - 840 g                           | 0 %   | 20 % - 240 g  |
| Mix PB1<br>10:66:4:20  | 10 % - 120 g                            | 66 % - 792 g                           | 4 % - 48 g  | 20 % - 240 g  |
| Mix PB2<br>10:62:8:20  | 10 % - 120 g                            | 62 % - 744 g                           | 8 % - 96 g  | 20 % - 240 g  |
| Mix PB3<br>10:58:12:20 | 10 % - 120 g                            | 58 % - 696 g                           | 12 % - 144 g  | 20 % - 240 g  |
| Mix PB3<br>10:54:16:20 | 10 % - 120 g                            | 54 % - 648 g                           | 16 % - 192 g  | 20 % - 240 g  |

Tablica 5. Rezultati Marshallovog pokusa – referentna mješavina (Mix CB)

| Maseni udio veziva [%] | Gustoća<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Vrijednosti Marshallovih svojstava |                     | Marshallov indeks<br>[kN/mm] |
|------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------|
|                        |                                 | Stabilnost [kN]                    | Indeks tečenja [mm] |                              |
| 4,5                    | 2398,00                         | 12,97                              | 2,26                | 5,74                         |
| 5                      | 2403,33                         | 13,42                              | 2,53                | 5,30                         |
| 5,5                    | 2413,53                         | 14,02                              | 2,86                | 4,90                         |
| 6                      | 2398,02                         | 13,47                              | 3,38                | 3,98                         |

Tablica 6. Rezultati Marshallovog pokusa za mješavina Mix PB1

| Maseni udio veziva [%] | Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ] | Vrijednosti Marshallovih svojstava |                     | Marshallov indeks [kN/mm] |
|------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|
|                        |                              | Stabilnost [kN]                    | Indeks tečenja [mm] |                           |
| 4,5                    | 2404,23                      | 17,77                              | 2,34                | 7,59                      |
| 5                      | 2412,57                      | 21,33                              | 2,52                | 8,46                      |
| 5,5                    | 2416,33                      | 23,65                              | 2,70                | 8,76                      |
| 6                      | 2411,63                      | 21,82                              | 2,99                | 7,30                      |

Tablica 7. Rezultati Marshallova ispitivanja za mješavinu PB2

| Maseni udio veziva [%] | Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ] | Vrijednosti Marshallovih svojstava |                     | Marshallov indeks [kN/mm] |
|------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|
|                        |                              | Stabilnost [kN]                    | Indeks tečenja [mm] |                           |
| 4,5                    | 2385,57                      | 18,69                              | 3,35                | 5,57                      |
| 5                      | 2392,39                      | 24,32                              | 3,72                | 6,53                      |
| 5,5                    | 2392,72                      | 27,41                              | 4,06                | 6,75                      |
| 6                      | 2391,78                      | 22,82                              | 4,61                | 4,95                      |

Tablica 8. Rezultati Marshallova ispitivanja za mješavinu Mix PB3

| Maseni udio veziva [%] | Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ] | Vrijednosti Marshallovih svojstava |                     | Marshallov indeks [kN/mm] |
|------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|
|                        |                              | Stabilnost [kN]                    | Indeks tečenja [mm] |                           |
| 4,5                    | 2388,08                      | 23,60                              | 3,57                | 6,61                      |
| 5                      | 2397,58                      | 28,21                              | 4,18                | 6,75                      |
| 5,5                    | 2406,32                      | 36,35                              | 5,01                | 7,25                      |
| 6                      | 2411,63                      | 26,57                              | 5,29                | 5,02                      |

Tablica 9. Rezultati Marshallovih ispitivanja za mješavinu Mix PB4

| Maseni udio veziva [%] | Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ] | Vrijednosti Marshallovih svojstava |                     | Marshallov indeks [kN/mm] |
|------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|
|                        |                              | Stabilnost [kN]                    | Indeks tečenja [mm] |                           |
| 4,5                    | 2368,08                      | 21,56                              | 3,51                | 6,14                      |
| 5                      | 2361,22                      | 25,04                              | 3,80                | 6,58                      |
| 5,5                    | 2370,15                      | 26,90                              | 4,10                | 6,56                      |
| 6                      | 2361,37                      | 20,87                              | 2,95                | 7,07                      |

U tablici 5. prikazani su rezultati Marshallovog pokusa za tradicionalnu asfaltnu mješavinu Mix CB s različitim udjelom veziva. Rezultati pokazuju da vrijednosti Marshallove stabilnosti variraju s promjenom udjela veziva u mješavini. Povećanjem udjela veziva, gustoća mješavine se neznatno povećava. Vrijednosti Marshallove stabilnosti rastu s povećanjem udjela veziva u mješavini. Za referentnu je mješavinu optimalan udio veziva iznosio 5,5 % masenog udjela agregata, pa je pri tom udjelu veziva postignut optimalan Marshallov indeks. Ovo je u skladu s rezultatima prethodnih ispitivanja.

U tablici 6. su prikazani rezultati Marshallovog pokusa za mješavinu Mix PB1 (krupni agregat zamijenjen je granulama plastike u iznosu 4 % masenog udjela krupnog agregata) s različitim udjelom veziva.

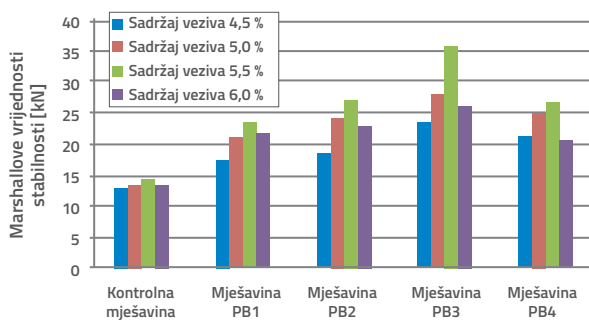
Rezultati Marshallovog pokusa za mješavinu Mix PB1 pokazuju da, kao što je uočeno i kod referentne mješavine, vrijednosti gustoće, Marshallove stabilnosti i indeksa tečenja rastu s povećanjem udjela veziva u mješavini. Nadalje, rezultati ispitivanja su pokazali da su vrijednosti Marshallove stabilnosti za mješavinu Mix PB1 gotovo 60 % veće nego kod referentne mješavine Mix CB. Za ovu je mješavinu također optimalni udio veziva, pri kojem je postignuta maksimalna vrijednost Marshallovog indeksa, iznosio 5,5 %.

U tablici 7. su prikazani rezultati Marshallovog pokusa za mješavinu Mix PB 2 (krupni agregat zamijenjen je granulama plastike u iznosu 8 % masenog udjela krupnog agregata) s različitim udjelom veziva. Za mješavinu Mix PB2 rezultati Marshallovog pokusa su pokazali povećanje vrijednosti



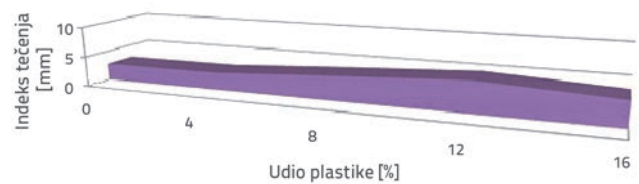
Marshallove stabilnosti za 70 % u odnosu na referentnu asfaltnu mješavinu Mix CB. Također, maksimalne vrijednosti Marshallovih svojstava su postignute pri optimalnom udjelu veziva od 5,5 %. U tablici 8. su prikazani rezultati Marshallova ispitivanja za mješavinu Mix PB 3 (krupni agregat zamijenjen je granulama plastike u iznosu 12 % masenog udjela krupnog agregata) s različitim udjelom veziva. Rezultati ispitivanja su pokazali da su kod mješavine Mix PB3 postignute najveće vrijednosti Marshallove stabilnosti, i to u rasponu od 23,60 kN do 36,35 kN ovisno o udjelu veziva. S povećanjem udjela granula plastike, vrijednosti Marshallove stabilnosti i indeks tečenja povećali su se za otprilike 140 % u odnosu na referentnu asfaltnu mješavinu Mix PB.

U tablici 9. prikazani su rezultati Marshallova ispitivanja za mješavinu Mix PB 4 (krupni agregat zamijenjen je granulama plastike u iznosu 16 % masenog udjela krupnog agregata) s različitim udjelom bitumena. Rezultati ispitivanja dobiveni za mješavinu Mix PB4 pokazali su smanjenje vrijednosti Marshallove stabilnosti u odnosu na mješavinu Mix PB3. Međutim, usporedbom rezultata ispitivanja dobivenih za mješavinu Mix PB3 s rezultatima za referentnu mješavinu Mix PB4 vidljivo je prosječno povećanje Marshallovih svojstava za 74,5 %.



Slika 3. Promjena vrijednosti Marshallove stabilnosti asfaltnih mješavina s dodatkom granula plastike

Na slici 3. je prikazana promjena vrijednosti Marshallove stabilnosti ovisno o udjelu veziva u mješavini. Rezultati Marshallovog pokusa su dobiveni za različite asfaltno mješavine pri različitim udjelima veziva: 4,5 %, 5,0 %, 5,5 % i 6,0 %. Granule plastike dobivene preradom elektroničkog otpada korištene su kao djelomična zamjena za krupni agregat u različitim masenim udjelima (0 %, 4 %, 8 %, 12 % i 16 %) i u kombinaciji sa svim udjelima bitumena. Ustanovljeno je da su maksimalne vrijednosti Marshallove stabilnosti, kod kontrolne mješavine i mješavine s dodatkom plastičnih granula, postignute pri 5,5-postotnom masenom udjelu veziva. Taj udio veziva odgovara prethodno provedenim istraživanjima i propisanoj vrijednosti u Tehničkim uvjetima MORTH-a. U usporedbi s referentnom asfaltnom mješavinom Mix CB, mješavina Mix PB3 pokazuje 159-postotnom povećanje vrijednosti Marshallove stabilnosti, što je značajno otkriće ovog ispitivanja.



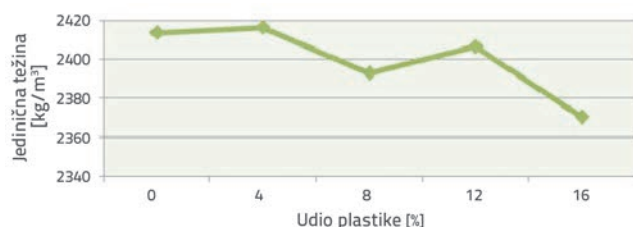
Slika 4. Promjena vrijednosti indeksa tečenja mješavina s plastičnim česticama pri optimalnom udjelu veziva

Vrijednosti indeksa tečenja mješavina s granulama plastike prelaze vrijednost od 5 mm (slika 4.), a maksimalna vrijednost indeksa tečenja dobivena je za mješavinu Mix PB3. Pokazalo se da se s povećanjem udjela granula plastike povećava vrijednost indeksa tečenja mješavina. Suprotno tome, niža vrijednost indeksa tečenja je zabilježena u mješavini Mix PB4 koja ima najveći udio granula plastike.



Slika 5. Ovisnost Marshallovog indeksa o udjelu plastičnih čestica

Na slici 5. je prikazan utjecaj udjela granula plastike na vrijednost Marshallova indeksa. Vidljivo je da mješavine s dodatkom granula plastike imaju veće vrijednosti Marshallova indeksa u odnosu na referentnu mješavinu. Veće vrijednosti Marshallova indeksa osiguravaju otpornost kolnika: na nastanak oštećenja uslijed posmičnih naprežanja, na nastanak trajnih deformacija te na smanjenje mogućnosti za nastanak udarnih rupa, što je u skladu s rezultatima istraživanja koje su proveli Sinan i Agar [26].



Slika 6. Varijacije jedinične težine mješavina s dodatkom plastike i optimalnim udjelom veziva

Na slici 6. je prikazan utjecaj granula plastike na gustoću asfaltnih mješavina s optimalnim udjelom veziva 5,5 %. Očigledno je da se s povećanjem udjela granula plastike u asfaltnoj mješavini smanjuje njena gustoća. Manja masa plastičnih granula rezultira

smanjenjem gustoće. Stoga mješavina Mix PB4 s najvišim udjelom granula plastike ima za 92 % veću vrijednost Marshallove stabilnosti u odnosu na referentnu mješavinu Mix CB.

#### 4. Zaključak

Odlaganje istrošenih elektroničkih uređaja predstavlja veliku prijetnju za okoliš zbog udjela opasnih materijala i sve veće količine takvog otpada. Na temelju rezultata ispitivanja doneseni su sljedeći zaključci koji objašnjavaju učinak primjene plastike iz elektroničkog otpada u asfaltnim mješavinama:

- Prijašnja istraživanja su provedena u svrhu ispitivanja mogućnosti primjene otpadnog stakla i plastike kao zamjene za agregat u betonu. S obzirom na to, u ovom je ispitivanju istražena mogućnost primjene plastike iz elektroničkog otpada kao zamjene za agregat.
- Na temelju veličina granula pretpostavljeno je da se granule plastike mogu koristiti kao djelomična zamjena za agregat u asfaltnim kolicima. Čestice plastike su dodane u asfaltnu mješavinu u određenom masenom udjelu krupnog agregata.
- Na temelju parametara Marshallove stabilnosti određen je optimalni udio veziva u mješavini i on iznosi 5,5 %. Ova vrijednost se podudara s rezultatima prijašnjih istraživanja [17, 28].
- Zaključeno je da se s povećanjem udjela granula plastike povećava vrijednost indeksa tečenja. Međutim, s manjim udjelom veziva u mješavini zadržavaju se minimalne vrijednosti indeksa tečenja bez obzira na udio granula plastike.
- Povećanjem udjela granula plastike znatno se povećavaju vrijednosti Marshallove stabilnosti, indeksa tečenja i Marshallovog indeksa u usporedbi s vrijednostima za tradicionalne asfaltnu mješavinu. Asfaltna mješavina s udjelom granula plastike u iznosu 12-postotnog masenog udjela krupnog agregata ima maksimalnu vrijednost Marshallove stabilnosti, koja je približno tri puta veća nego kod referentne mješavine. Rasel je preporučio da se granule polivinil-klorida (PVC), dobivene preradom komunalnog i komercijalnog otpada, mogu koristiti u asfaltnim mješavinama i to u vrijednosti 10-postotnog masenog udjela bitumena [28].
- Veće vrijednosti indeksa tečenja i Marshallova indeksa mješavina s dodatkom plastičnih čestica upućuju na to da su takve smjese elastične, ali također i čvršće.
- Primjena granula plastike, dobivenih iz elektroničkog otpada, u svrhu zamjene dijela agregata u asfaltnim mješavinama moguća je, a to su pokazali i rezultati ovog istraživanja. Recikliranje elektroničkog otpada na način da se primijeni pri izradi asfaltnih kolnika ima brojne prednosti među kojima se ističe očuvanje prirodnih resursa, ekonomičnost te upotreba otpada na ekološki prihvatljiv način.

#### LITERATURA

- [1] United States Environment Protection Agency (USEPA), Electronic reuse and recycling infrastructure development in Massachusetts, EPA-901-R-00-002, (2000).
- [2] United Nations Environment Programme, 2010, UN News Centre, Urgent need to prepare developing Countries for surge in E-waste, Document ID:612, Article ID 6471.
- [3] Toxics Link. E-waste in Chennai, 2004.
- [4] Sodhi, M.S., Reimer, B.: Basel Action Network, UNEP Environment Alert Bulletin, 1-4, January 2005.
- [5] Empa, The E-waste guide:2005, <http://www.ewaste.ch>.
- [6] Cui, J., Forsberg, E.: Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials*, B99 (2003), pp. 243-263, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00061-X)
- [7] Hai-Yong K., Schoenung, J.M.: Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options", *Resources Conservation & Recycling*, 45 (2005), pp. 368-400, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.06.001>
- [8] Mehta, P.K., Monteiro, P.M.: *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, 549, 1993.
- [9] MoEF guidelines for Environmentally Sound Management of E-waste, 2008.
- [10] Toxics Link, 2004, E-waste in Chennai, [www.toxicslink.org](http://www.toxicslink.org)
- [11] Wang, F., Kuehr, R., Ahlquist, D., Li, J.: E-waste in China: a country report. Bonn, Germany, United Nations University, 2013.
- [12] Toxics Link. Scrapping the hi-tech myth, computer waste in India, Delhi, 2008.
- [13] Kurian, J.: Electronic waste management in India-Issues and Strategies, *Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*, pp. 1-5, 2007.
- [14] Subramanian, P.M.: Plastics recycling and waste management in the US, *Resources, Conservation and Recycling*, 28 (2000), pp. 253-263, [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00049-X)
- [15] Stier, K.W., Gray Weede, D.: A Study Conducted to Investigate the Feasibility of Recycling Commingled Plastics Fibre in Concrete, *Journal of Industrial Technology*, 15 (1999) 1, pp. 1-8.
- [16] Shahan-ur-Rahman, A.: Use of Waste Plastic in Construction of Flexible Pavement, *New Building Materials & Construction World*, 2009.
- [17] Vasudevan, R.: Utilization of waste plastics for flexible pavement, *Indian High Ways Indian Road Congress*, 7 (2006).
- [18] Justo, C.E.G., Veeraragavan, A.: Utilization of Waste Plastic Bags in Bituminous Mix for Improved Performance of Roads, *Centre for Transportation Engineering, Bangalore University, Bangalore, India*, 2002.



- [19] Rema devi, M., Leni, S., Mini, M.I.: Reduction of optimum bitumen content in bituminous mixes using plastic coated aggregates, *International journal of innovative research in science, engineering & technology*, 2 (2013) 3, pp. 698-705.
- [20] Yue Huang, Roger, N. Bird, Heidrich, O.: A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (2007), pp. 58-73, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>
- [21] FHWA, User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction, 1997.
- [22] Zoorob, S.E., Suparma, L.B.: Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt), *Cement & Concrete Composites*, 22 (2000), pp. 233-242, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00026-3)
- [23] Jain, R.K., Singh, Y., Rai, M.: Recent Trends of Research in Plastic Building materials in India, *Building and Environment*, 12 (1977), pp. 277-280, [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0360-1323(77)90030-0)
- [24] Vasudevan, R.: Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers, *Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, 5 - 7 September 2007.
- [25] MORTH, Ministry of Road, Transport and Highways, Specifications for Road and Bridgeworks, Third Revision, Published by Indian Road Congress, 2000.
- [26] Hinishoglu, S., Agar, E.: Use of high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, 58 (2004), pp. 267-271, [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0)
- [27] Al-Abdul Wahhab, H., Al-Amri, G.: Laboratory evaluation of reclaimed rubber asphaltic concrete mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 3 (1991), pp. 189 – 197, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1991\)3:3\(189\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1991)3:3(189))
- [28] Rasel, H.M., Rahman, M.N., Ahmed, T.U.: Effect of waste PVC on the properties of Bituminous mixes, *International Journal of Civil Engineering*, 4 (2012) 1, pp. 77-84.