



## UPORABA ODPADNE PLASTIKE ZA IZDELAVO LEPIL ZA LEPLJENJE LESA

### USE OF WASTE PLASTICS FOR THE PREPARATION OF ADHESIVES FOR WOOD BONDING

Milan Šernek<sup>1\*</sup>, Vanja Turičnik<sup>2</sup>, Rožle Repič<sup>3</sup>, Bogdan Šega<sup>1</sup>

UDK 630\*824.8:678.86

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 16. 11. 2020

Sprejeto / Accepted: 30. 11. 2020

#### Izvleček / Abstract

**Izvleček:** Odpadne plastike je čedalje več, zato poskušamo najti različne načine njenega recikliranja in ponovne uporabe. Reciklirani termoplastični polimeri predstavljajo zanimiv potencial za izdelavo lepil, zato je bil cilj naše preliminarne raziskave proučiti primernost odpadnega polistirena za izdelavo lepil za lepljenje lesa. Lepilne mešanice smo izdelali tako, da smo odpadne polistirenske lončke (L) in žličke (Ž) za kavo razrezali na manjše koščke in jih ločeno raztopili v 5 različnih topil: butil acetat (BA), dimetilformamid (DMF), tetrahidrofuran (THF), limonen (L) in aceton (AC). Z njimi smo izdelali lepljenice iz dveh bukovih lamel (Fagus sylvatica L.), ki smo jih 10 minut stiskali v hidravlični stiskalnici pri temperaturi 150 °C in tlaku 12 barov. Za ugotavljanje kakovosti zlepljenosti smo izvedli strižni preizkus z univerzalnim testirnim strojem Zwick/Roell Z005. Ugotovili smo, da so preizkušanci, zlepljeni z lepilno mešanico Ž-DMF, dosegli povprečno strižno trdnost 6,5 N/mm<sup>2</sup>, preizkušanci, zlepljeni z L-DMF, pa 3,8 N/mm<sup>2</sup>. Vsi ostali preizkušanci so izkazovali nižjo trdnost lepilnega spoja oziroma so večinoma razpadli že po vročem stiskanju ali kasneje med žaganjem v preizkušance. V nadaljnjih raziskavah bomo obetajoči lepilni mešanici modificirali in optimizirali parametre stiskanja z namenom doseganja kakovosti zlepljenosti, ki ustreza standardnim zahtevam za plastomerna lepila za notranjo uporabo.

**Ključne besede:** lepilo, les, odpadna plastika, polistiren, strižna trdnost, ponovna uporaba plastike

**Abstract:** There is more and more plastic waste, so we try to find different ways to recycle and reuse it. Recycled thermoplastic polymers represent an interesting potential for the production of adhesives, so the aim of our preliminary investigations was to examine the suitability of waste polystyrene for the production of adhesives for wood bonding. The adhesive mixtures were prepared by cutting waste polystyrene cups (L) and coffee spoons (Ž) into smaller pieces and dissolving them separately in five different solvents: Butyl acetate (BA), Dimethylformamide (DMF), Tetrahydrofuran (THF), Limonene (L) and Acetone (AC). From these we prepared composite samples of two beech lamellae (Fagus sylvatica L.), which were pressed for 10 minutes in a hydraulic press at a temperature of 150 °C and a pressure of 12 bar. In order to determine the quality of the bonding, we carried out a shear test with a Zwick/Roell Z005 universal testing machine. We found that the test specimens bonded with the adhesive mixture Ž-DMF achieved an average shear strength of 6.5 N/mm<sup>2</sup> and the test specimens bonded with L-DMF achieved 3.8 N/mm<sup>2</sup>. All other test specimens showed a lower strength of the adhesive bonds, or they mostly delaminated after hot pressing or later during sawing into test specimens. In further research work we will modify these promising adhesive mixtures and optimise the pressing parameters in order to achieve bonding quality that meets the standard requirements for thermoplastic adhesives for interior applications.

**Keywords:** adhesive, wood, waste plastics, polystyrene, shear strength, reuse of plastic

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

#### 1.1 ODPADNA PLASTIKA

##### 1.1 WASTE PLASTICS

Uporaba plastičnih izdelkov je izjemno razširjena, zato se kopiči čedalje več plastičnih od-

padkov, ki onesnažujejo naše okolje. Različne iniciative poskušajo omejiti/zamenjati uporabo plastičnih izdelkov, kljub temu pa se še vedno ogromne količine plastike uporablja za izdelke, ki se po uporabi zavržejo. Prekomerna proizvodnja in neodgovorna uporaba plastike, iz katere izvirajo resne ekološke težave in nepopravljiva škoda, je povezana predvsem s sorazmerno enostavno izdelavo izdelkov iz plastike, njihovo nizko ceno in dolgo življenjsko dobo (Achilias et al., 2012; Tullo, 2018; Scott, 2018).

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Ljubljana, SLO

\* e-pošta: milan.sernek@bf.uni-lj.si

<sup>2</sup> Kompetenzzentrum Holz GmbH, Avstrija

<sup>3</sup> Zavod za gradbeništvo Republike Slovenije

Leta 2017 je bila letna proizvodnja plastike na globalni ravni 230 milijonov ton, v letu 2020 pa naj bi se povečala na kar 400 milijonov ton (Tawfik et al., 2017). Glede na naraščajoči družbeni pritisk na skrb za okolje in sedanje trende v smeri krožnega gospodarstva, bi bila najboljša možnost ravnanja s plastičnimi odpadki njihova predelava v določene kemijske spojine (monomere) z zahtevano čistostjo in kakovostjo, ki bi se ponovno uporabila kot surovina pri isti polimerizaciji ali v drugih postopkih (Ordaz-Quintero et al., 2020).

Krožno gospodarstvo po svoji zasnovi deluje obnovitveno in regenerativno, kar pomeni, da materiali nenehno krožijo po sistemu »zaprte zanke«. V primeru plastike to pomeni hkratno ohranjanje njene vrednosti v gospodarstvu brez škode za okolje (Ledsham, 2018). Po poročanju Fundacije Ellen MacArthur se po več kot 40 letih po prvi uvedbi univerzalnega simbola za recikliranje, reciklira le 14 % plastične embalaže, ki se uporablja po vsem svetu, medtem ko je 40 % konča na odlagališčih in 32 % v ekosistemih. Preostalih 14 % se sežiga ali je namenjene pridobivanju energije. Družba se mora danes oddaljiti od linearnega poslovnega modela in miselnosti »vzemi-uporabi-zavrzi« in tako preiti na krožno gospodarstvo. To pa vključuje izboljšanje recikliranja, spodbujanje ponovne uporabe, ustvarjanje trga za reciklirane materiale in preoblikovanje izdelkov.

Plastične materiale je mogoče reciklirati na različne načine, zahtevnost recikliranja pa se razlikuje glede na vrsto polimera, obliko in vrsto embalaže

oziroma izdelka. Toge izdelke iz enega polimera je preprosteje in bolj ekonomično reciklirati kot večplastne in večkomponentne izdelke. Termoplasti oziroma plastomeri, vključno s PET (polietilentereftalat), PE (polietilen) in PP (polipropilen) imajo velik potencial za mehansko recikliranje, medtem ko duromerov, kot so nenasičeni poliestri, epoksidne smole ali PMMA/ATH (npr. kerrock) ni mogoče mehansko reciklirati. Ti se lahko le ponovno uporabijo kot polnilni material, ko se predhodno pretvorijo v manjše delce (Hopewell et al., 2009; Vovk et al., 2017). Velik izziv predstavljajo tudi kompozitni polimeri, pri katerih je strošek reciklaže zelo velik. Tovrstni materiali se lahko dodajajo kot polnilo pri izdelavi drugih materialov, npr. asfalta (Vovk, 2017).

Odpadni termoplasti so zaradi ugodnih lastnosti in relativno enostavnega recikliranja zanimivi za izdelavo lesno-plastičnih kompozitov (WPC). Odpadna plastika, ki predstavlja večji del kompozita, je reciklirana, polnilo, v tem primeru lesna moka/vlakna, pa so naravni material. Končni material je v primerjavi s plastiko ojačan, okolju prijazen kompozit. Tovrstni kompoziti se uporabljajo v avtomobilski industriji, gradbeništvu in drugih izdelkih široke potrošnje. Za zagotavljanje ustreznih mehanskih lastnosti kompozita je potrebno dodati dodatke za izboljšanje adhezije med polimerom in lesnimi delci (Poletto, 2017).

Glede na tip plastike lahko plastične odpadke razvrstimo v 7 skupin, kot prikazuje preglednica 1 (povzeto po Selukar et al., 2014).

### Preglednica 1. Razvrščanje plastičnih odpadkov

Table 1. Classification of plastic waste

Identifikacijska številka plastike / Plastic Identification Code	Tip plastičnih odpadkov / Type of Plastic Waste	Ime plastike / Name of Plastic	Tipična uporaba plastike / Common Application of Plastic
1	PET	Polietilen tereftalat / Polyethylene Terephthalate	Plastenke, folije / Bottles, Films
2	HDPE	Polietilen visoke gostote / High Density Polyethylene	Embalaža, vrečke / Packaging, Shopping Bags
3	PVC	Polivinil klorid / Polyvinyl Chloride	Cevi, zavese, kreditne kartice, folije / Water pipes, Curtains, Credit card, Packaging films
4	LDPE	Polietilen nizke gostote / Low Density Polyethylene	Vrečke, izolatorji / Plastic bags, Wire Cloth
5	PP	Polipropilen / Polypropylene	Vrečke, igrače / Plastic Bags, Toys
6	PS	Polistiren / Polystyrene	Prehranska embalaža, izolacijski materiali / Food Boxes, Insulation Materials
7	Ostalo	Poliamid, polikarbonat / Polyamide, Polycarbonate	Specialni nameni in uporaba / Special purpose and application

## 1.2 UPORABE ODPADNE PLASTIKE PRI LEPLJENJU LESA

### 1.2 APPLICATION OF WASTE PLASTICS FOR BONDING OF WOOD

Poraba lepil za lepljenje lesa in izdelavo lesnih kompozitov narašča. Uporabljajo se predvsem formaldehidna lepila, ki utrjujejo pri povišani temperaturi. Zaradi zahtev po zmanjševanju emisij formaldehida iz končnih proizvodov pa raziskovalci veliko pozornost posvečajo alternativnim rešitvam. Ena izmed možnosti je uporaba talilnih lepil, ki utrjujejo predvsem fizikalno in pri katerih ni emisij hlapnih spojin med uporabo lepljenega proizvoda. Do neke mere lahko kot talilno lepilo uporabimo tudi termoplastične polimere, ki jih recikliramo iz odpadkov. S tem pristopom tako zmanjšamo količino teh odpadkov na deponijah in posledično proizvedemo produkte, ki niso škodljivi za zdravje ljudi in okolje (Kajaks et al., 2012). Takšna lepila iz odpadne plastike bi lahko predstavljala novo generacijo talilnih lepil (Grinbergs, 2010).

Tawfik et al. (2017) so za izdelavo lignoceluloznega kompozita uporabili rižovo slamo in polistiren. Kompozit so izdelali s postopkom vročega stiskanja pri 170 °C in tlaku 4 bare, ki so ga vzdrževali 10 minut. Požarno odpornost kompozita so zagotovili z dodatkom retardantov, kar pa lahko ima negativen vpliv na mehanske lastnosti (Eskander et al., 2018). Tako izdelan kompozit je možna alternativa sedanjim lesno-plastičnim kompozitom, katerega prednost je, da je izdelan iz odpadnega materiala, ki bi v nasprotnem primeru končal v naravi ali na deponiji.

Cui et al. (2010) so v eni izmed raziskav namesto že uveljavljenih lepil za lepljenje vezanih plošč uporabili plastične vrečke iz polietilena, polipropilena, polivinil klorida in polistirena. Preizkušali so vpliv količine plastičnih materialov, temperature in časa stiskanja na končne lastnosti vezanih plošč. Avtorji navajajo, da je optimalna količina plastičnih materialov v spoju 100 g/m<sup>2</sup>. Višja temperatura stiskanja pripomore k nižji viskoznosti omenjenih materialov, kar posledično izboljša adhezijo. Najvišjo trdnost so raziskovalci dosegli pri temperaturi 150 °C in časom stiskanja 6 minut. Pridobljeni kompozit zadošča minimalnim zahtevam trdnosti, emisij formaldehida pa ni.

Del Menezzi et al. (2016) so za izdelavo slojnatega furnirnega lesa (LVL) uporabili različne količine polistirena. LVL se pogosto uporablja v gradbene namene, za lepljenje pa se uporabljajo duromerne smole, ki izkazujejo dobre mehanske lastnosti.

Trdnost lepilnega spoja LVL, dosežena pri lepljenju s polistirenom v laboratorijskih pogojih, je bila zadostna, vendar pa je na tem področju po mnenju avtorjev potrebnih še veliko dodatnih raziskav.

Yang et al. (2011) so z dodajanjem kolofonije, fenolne smole, izocianata, benzoil peroksida in dibutil ftalata v polistiren pripravili lepilo, ki je po trdnosti primerljivo oziroma boljše kot komercialno belo polivinil acetatno (PVAc) lepilo za les. Kot navajajo avtorji, lepilo utrjuje 3,5 ure pri temperaturi 70 °C in naj bi bilo primerno za lepljenje lesa, plastike, stekla, papirja in drugih vlaknastih materialov.

Kajaks et al. (2012) so v svoji raziskavi dokazali, da je iz odpadne plastike (HDPE – polietilen visoke gostote, PP - polipropilen, PU - poliuretan, PA6 - poliamid) možno izdelati lesne kompozite, ki so po trdnosti primerljivi s kompoziti, zlepljenimi s konvencionalnimi lepili. Termoplasti lahko prodirajo do 40 µm globoko v les in zagotavljajo dobro adhezijo. Lepilni spoji so vodoodporni, tako da so kompoziti primerni za uporabo na prostem. Avtorji izpostavljajo visoko strižno trdnost, ki je bila dosežena pri lepljenju s PE, PU in PA6 vlakni (5,6 MPa do 10 MPa) in presega strižno trdnost konvencionalne vezane plošče, zlepljene s fenol-formaldehidnim lepilom.

Jasri et al. (2014) so izdelali lepilo iz reciklirane polistirena, ki je imelo primerljive mehanske lastnosti z nekaterimi komercialnimi lepili za les. Avtorji so lepilno mešanico pripravili tako, da so polistiren raztopili v topilu na osnovi etanola (RON 95) v razmerju EPS:RON 95 = 1:1.

## 1.3 RECIKLIRANJE POLISTIRENA 1.3 RECYCLING OF POLYSTYRENE

Polistiren je zelo razširjen in uporaben termoplastni material, vendar njegovi odpadki (še posebej ekspanziran polistiren) predstavljajo velik okoljski problem, saj v naravi zelo počasi razpada, danes pa ga v ogromnih količinah najdemo v morju (Tawfik, 2017).

Polistiren ((C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub>) je polimerni material, sestavljen iz monomernih enot stirena (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>) (Lye & Aw, 2003) in je zaradi ugodnih lastnosti in široke uporabe tretji najbolj pogosto uporabljen termoplast na planetu (prednjačita samo še polietilen in polipropilen). Najpogosteje se uporablja v prehrambni industriji kot embalaža, najdemo pa ga tudi kot zaščitni material pri transportu ali pa kot toplotni izolator (Lye & Aw, 2003). Zaradi nizke gos-

tote, dobre toplotne izolativnosti, odpornosti in dobrih mehanskih lastnosti je zelo zastopan v obliki ekspandiranega polistirena (Lye & Aw, 2003), katerega odpadki pa zaradi počasnega razpadanja predstavljajo zelo velik okoljski problem (Tawfik et al., 2017). Pri proizvodnji izdelkov iz ekspandiranega polistirena se kroglice polistirena segrejejo in ekspandirajo, kasneje pa se vbrizgajo v kalupe, kjer jih s pomočjo vodne pare segrejejo in tako ekspandirajo do robov kalupa. Ker se plast polistirena ob kalupu nekoliko zmežča, to privede do gladke površine izdelkov oziroma polizdelkov (Lye & Aw, 2003).

95 % ekspandiranega polistirena predstavlja zrak, kar pomeni, da pri njegovi predelavi iz velikega volumna odpadkov pridobimo relativno malo polistirena. Mehanske in estetske lastnosti recikliranega polistirena so dobre, njegova cena pa nizka. Eden izmed možnih načinov ponovne uporabe polistirena je izdelava lepila, saj je dobro topen v različnih topilih kot so bencin, aceton, butil acetat, limonen ipd. V stiku s topilom se prične raztapljati, njegov volumen pa se drastično zmanjša (Curia et al., 2017). Lisperguer et al. (2013) navajajo, da je recikliran polistiren mogoče dodatno izboljšati z dodajanjem lignina, saj že pri dodatku 2 % lignina izkazuje boljšo termično stabilnost. Selukar et al. (2014) so v eni izmed študij iz odpadnega polistirena z uporabo topil (bencin, aceton, toluen) na enostaven način izdelali lepilo. Največjo lepljivost so dosegli z uporabo bencina in toluena, medtem ko le-ta z acetonom ni bila dosežena.

Cilj naše preliminarne raziskave je bil v različnih topilih raztopiti polistiren iz odpadnih plastičnih žličk in lončkov za kavo ter ga uporabiti za izdelavo lepila za lepljenje lesa.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2 MATERIALS AND METHODS

#### 2.1 MATERIALI

##### 2.1 MATERIALS

Za lepljenje smo uporabili radialne lamele iz bukovine (*Fagus sylvatica* L.), ki so bile klimatizirane v standardni klimi s temperaturo 20 °C in relativno zračno vlažnostjo 65 %.

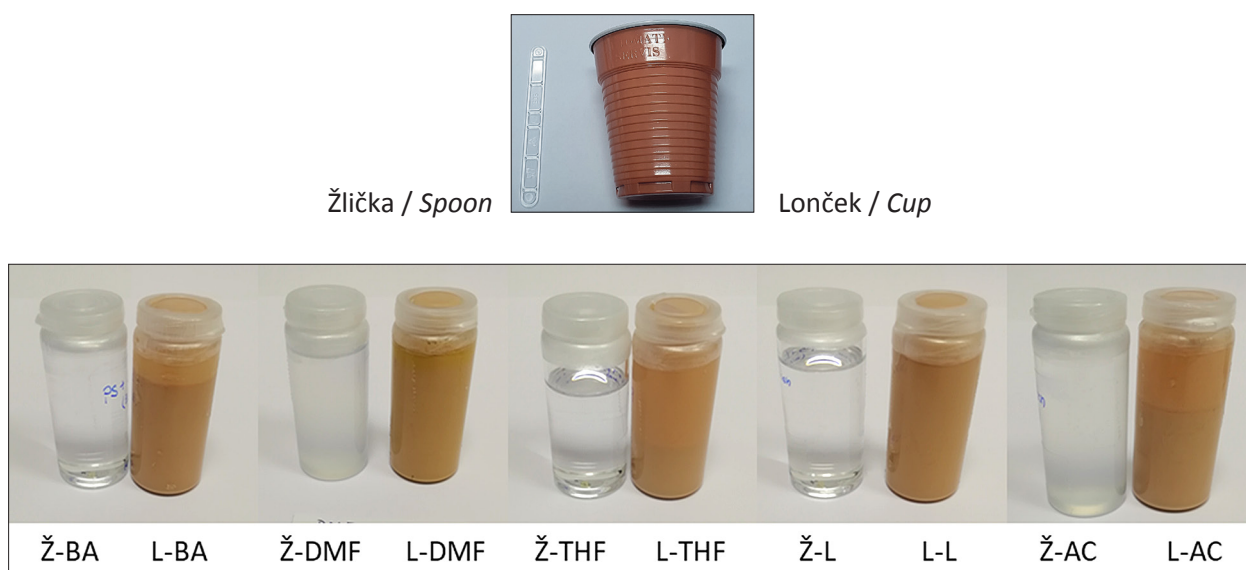
Lepilne mešanice smo pripravili iz polistirena, iz katerega so bili izdelani lončki in žličke za kavo, ki se uporabljajo v kavnih avtomatih in predstavljajo velik delež plastičnih odpadkov. Lončki za kavo so iz obarvanega polistirena, žličke pa iz čistega polistirena. Odpadna plastika iz lončkov in žličk je bila čista in suha, brez ostankov pijače. Razrezali smo jo na manjše koščke zaradi hitrejšega in lažjega raztapljanja v topilih. Za raztapljanje plastike smo uporabili 5 različnih topil: aceton (Roth), dimetilformamid – DMF (Roth), butil acetat (Sigma-Aldrich), tetrahydrofuran – THF (Roth, Bernd Kraft GmbH) in limonen (Merck KGaA).

Skupno smo pripravili 10 lepilnih mešanic, polovico iz žličk in polovico iz lončkov. Lepilne mešanice smo pripravili v steklenih posodah, kjer smo zmešali plastiko in topilo v utežnem razmerju 1:1. Mešanice smo sprva temeljito mešali, da se je raztopila večina kosov plastike, nato pa smo mešanice pustili stati čez noč. Pri raztapljanju smo si pomagali tudi z visoko frekvenčno kadjo. Po 16 urah so bile mešanice po večini homogene in gladke. Lepilne mešanice iz žličk so bile transparentne, iz lončkov pa motno rjave. Mešanice žličk v butil acetatu, tetrahydrofuranu in limonenu so bile kristalno čiste, medtem ko sta bili mešanici žličk v acetonu in dimetilformamidu motni (slika 1). Uporabljene lepilne mešanice in njihove oznake so predstavljene v preglednici 2.

*Preglednica 2. Lepilne mešanice iz odpadne plastike in različnih topil*

*Table 2. Adhesive mixtures from plastic waste and different solvents*

LEPILNE MEŠANICE IZ ŽLIČK / ADHESIVE MIXTURES FROM SPOONS		LEPILNE MEŠANICE IZ LONČKOV / ADHESIVE MIXTURES FROM CUPS	
OZNAKA / LABEL	POMEN / MEANING	OZNAKA / LABEL	POMEN / MEANING
Ž-BA	Žličke + Butil acetat / Spoons + Butyl acetate	L-BA	Lončki + Butil acetat / Cups Butyl acetate
Ž-DMF	Žličke + Dimetilformamid / Spoons + Dimethylformamide	L-DMF	Lončki + Dimetilformamid / Cups + Dimethylformamide
Ž-THF	Žličke + Tetrahydrofuran / Spoons + Tetrahydrofuran	L-THF	Lončki + Tetrahydrofuran / Cups + Tetrahydrofuran
Ž-L	Žličke + Limonen / Spoons + Limonene	L-L	Lončki + Limonen / Cups + Limonene
Ž-AC	Žličke + Aceton / Spoons + Acetone	L-AC	Lončki + Aceton / Cups + Acetone

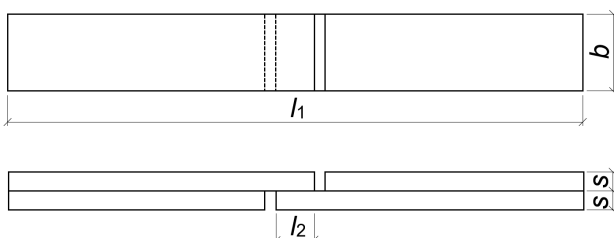


Slika 1. Rastopljene žličke (prozorno) in lončki za kavo (rjavo) v različnih topilih  
 Figure 1. Dissolved spoons (transparent) and coffee cups (brown) in different solvents

## 2.1 METODE

### 2.1 METHODS

Za ugotavljanje kakovosti zlepljenosti lesa z lepilnimi mešanici iz odpadne plastike smo izdelali lepljence, ki so bili zlepljeni iz dveh poskobljanih bukovih lamel dimenzij 500 mm × 150 mm × 5 mm. Lepilni površini smo obrusili z brusnim papirjem granulacije 240 in na površino ene lamele s pomočjo lopatice ročno nanесли 200 g/m<sup>2</sup> lepilne mešanice. Nato smo lameli združili in ju v hidravlični stiskalnici 10 minut stiskali pri temperaturi 150 °C in tlaku 12 barov. Po stiskanju smo lepljence obtežili in počakali, da so se ohladili. Iz njih smo nato izžagali preizkušance za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnega spoja po standardu SIST EN 205:2016 (slika 2), ki so bili 150 mm dolgi ( $l_1$ ) in 20 mm široki ( $b$ ). Strižna površina pa je bila dolga 10 mm ( $l_2$ ) in smo jo izdelali tako, da smo



Slika 2. Strižni preizkušavec za ugotavljanje kakovosti zlepljenosti

Figure 2. Shear specimen for determination of bonding performance

na vsaki strani preizkušanca zažagali utor do lepilnega spoja oziroma skozi obe 5 mm debeli lameli ( $s$ ).

Za vsako lepilno mešanico smo pripravili 10 preizkušancev. Preizkušance smo med razžagovanjem ustrezno označili in jih razvrstili glede na uporabljene lepilne mešanice (preglednica 2) ter jih nato sedem dni klimatizirali v standardni klimi ( $T = 20$  °C,  $\phi = 65$  %).

Strižni preizkus smo opravili z univerzalnim testirnim strojem Zwick/Roell Z005. Vsakemu preizkušancu smo pred vpetjem v stroj izmerili dolžino ( $l_2$ ) in širino ( $b$ ) strižne ploskve ( $A$ ) z digitalnim kljunastim merilom ter podatke meritev vnesli v računalniški program testXpert. Preizkušavec smo nato vpeli v vpenjalne čeljusti stroja in ga s hitrostjo 50 mm/min obremenili z natezno silo do porušitve ( $F_{max}$ ). Strižno trdnost ( $f_v$ ) smo izračunali po enačbi:

$$f_v = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{l_2 \times b}$$

## 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 SPLOŠNA OPAŽANJA

##### 3.1 GENERAL OBSERVATIONS

Med pripravo lepilnih mešanic iz odpadne plastike in med lepljenjem smo opazili nekaj zanimivih lastnosti in posebnosti, ki lahko vplivajo na uspešnost lepljenja:

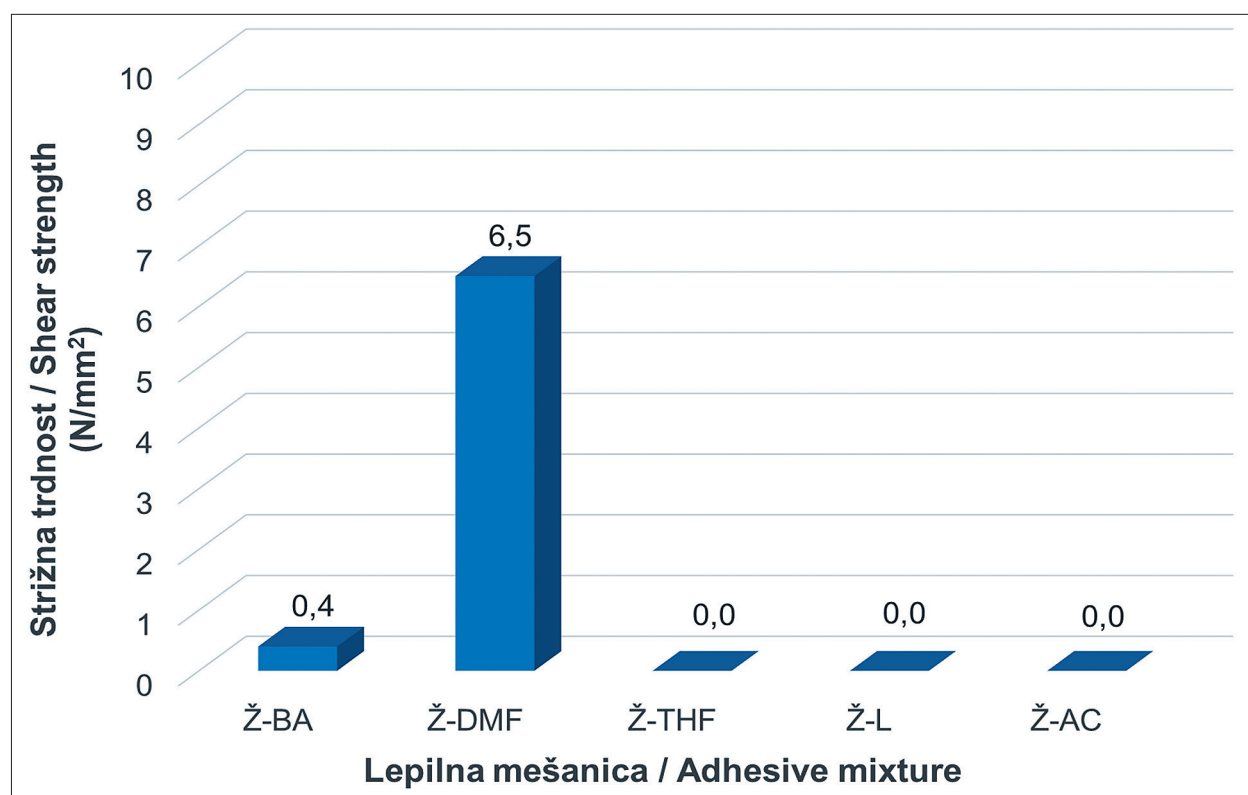
- Lepilni mešanici z acetonom sta bili že od začetka najbolj viskozni, med nanašanjem pa je topilo zelo hitro izhlapevalo in se je viskoznost hitro povečevala, zaradi česar je bil nanos zelo otežen.
- Lepilne mešanice z dimetilformamidom in tetrahidrofuranom so bile zelo močnega in neprijetnega vonja (smrad).
- Mešanice z butilacetatom in limonenom so bile gladke in homogene. Viskoznost je bila primerna za nanašanje.
- Lamelle, ki so bile zlepljene z lepilno mešanico, kjer je bilo topilo limonen, so se pri odpiranju stiskalnice takoj razslojile. Med vročim stiskanjem ni izparelo dovolj limonena in lepilni spoj ni utrdil.
- Pri lepilni mešanici iz lončkov in dimetilformamida se je na površini izločala tekoča snov rjave barve, ki smo jo z mešanjem brez težav spet homogenizirali.
- Vse lepilne mešanice iz lončkov so bile na splošno bolj heterogene in obarvane v primerjavi z mešanicami iz žličk, ki so bile precej prozorne in bolj homogene.
- Lepilne mešanice, pripravljene iz kavnih lončkov, so bile na splošno bolj viskozne od tistih iz žličk. To pripisujemo primesem, s katerimi so bili lončki obarvani.

Pomembna ugotovitev je tudi, da lepljenje pri sobni temperaturi ni bilo uspešno, oziroma je stiskanje trajalo pretirano dolgo (več dni), da se je ustvaril delno trden spoj, kljub temu pa je v lepilnem spoju še vedno ostal del topila. Ta ugotovitev je botrovala odločitvi, da stiskanje izvedemo v vroči stiskalnici pri temperaturi 150 °C, ki pospeši proces izhlapevanja in izparevanja topila iz lepilne mešanice. Hkrati pa lahko visoka temperatura pomeni popolno mehčanje plastike v lepilni mešanici, zato tak spoj ni trden in pridobi trdnost šele, ko ga po stiskanju ohladimo. Če so napetosti v lesu po stiskanju velike zaradi temperturnega in vlažnostnega gradienta, lahko lepilni spoj med procesom hlajenja popusti zaradi teh pojavov.

### 3.1 STRIŽNA TRDNOST LEPILNIH SPOJEV

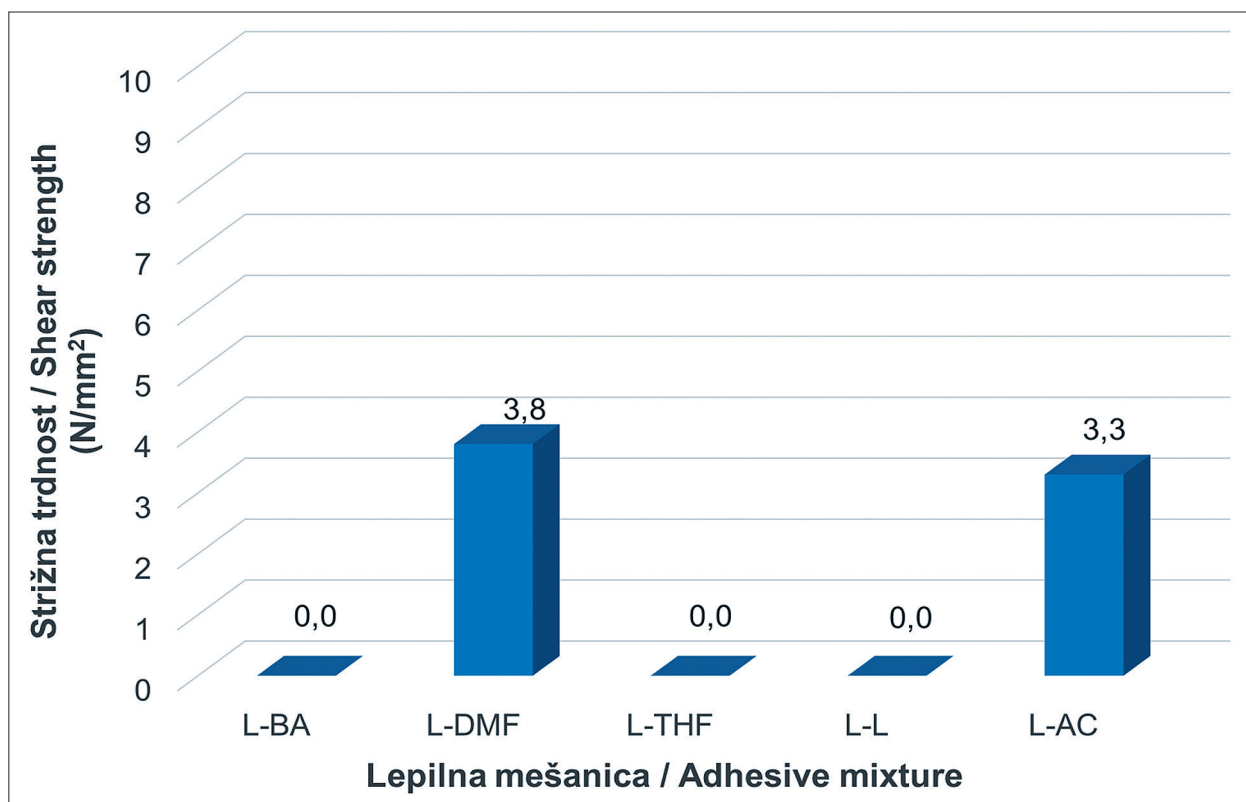
#### 3.1 SHEAR STRENGTH OF ADHESIVE BONDS

Ugotovili smo, da sta dve lepilni mešanici iz žličk (Ž-BA in Ž-DMF) zleplili bukove lamelle, medtem ko tri lepilne mešanice iz žličk (Ž-THF, Ž-L in Ž-AC) niso zlepile bukovih lamel in je večina preizkušancev razpadla že med žaganjem ali pred izvedbo strižnega testa (slika 3).



Slika 3. Strižna trdnost preizkušancev, zlepljenih z lepilnimi mešanicami iz žličk

Figure 3. Shear strength of test specimens glued with adhesive mixtures from spoons



Slika 4. Strižna trdnost preizkušancev, zlepljenih z lepilnimi mešanici iz lončkov  
Figure 4. Shear strength of test specimens glued with adhesive mixtures from cups

Preglednica 3. Rezultati strižnega testa za obetajoči lepilni mešanici  
Table 3. Shear test results for a promising adhesive mixture

Lepilna mešanica / Adhesive mixture	Ž-DMF		L-DMF	
	$f_v$	Lom po lesu / Wood failure	$f_v$	Lom po lesu / Wood failure
Št. / No.	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%
1	5,7	0	1,8	0
2	5,6	0	4,7	0
3	2,9	0	2,2	0
4	7,1	0	1,8	0
5	7,0	0	4,0	0
6	8,3	25	9,3	50
7	4,6	0	7,8	50
8	8,4	0	6,1	0
9	8,4	0	0,0	0
10	6,6	25	0,0	0
Povprečje / Average	6,5	5	3,8	10
St-DEV / ST-DEV	1,7	10	3,0	20

Podoben rezultat je bil pri lepilih iz lončkov. Dve lepilni mešanici iz lončkov (L-DMF in L-AC) sta zlepili bukove lamele, medtem ko tri lepilne mešanice (L-BA, L-THF in L-L) niso zlepile bukovih lamel in je večina preizkušancev razpadla že med žaganjem ali pred izvedbo strižnega testa (slika 4).

Izmed vseh uporabljenih topil se je za pripravo lepilnih mešanic najbolje obneslo topilo dimetilformamid (DMF), saj so preizkušanci, zlepilni z lepilno mešanico Ž-DMF, dosegli povprečno strižno trdnost 6,5 N/mm<sup>2</sup>, z L-DMF zlepilni preizkušanci pa 3,8 N/mm<sup>2</sup>. Vsi ostali preizkušanci so izkazovali nižje trdnosti lepilnega spoja, oziroma so večinoma po lepljenju ali žaganju razpadli.

Na osnovi rezultatov strižne trdnosti in odstotka loma po lesu preizkušancev, ki so bili zlepilni z lepilnima mešanicama Ž-DMF in L-DMF (preglednica 3), lahko ugotovimo, da ti mešanici izkazujejo določen potencial za izdelavo lepil iz odpadne plastike. Naslednji raziskovalni korak bo optimizacija parametrov stiskanja (predvsem temperature) in postopka hlajenja lepljencev takoj po stiskanju. Predpostavljamo, da bi z ustrezno modifikacijo lepilne mešanice in postopka lepljenja lahko dosegli zadostne strižne trdnosti spojev za notranjo uporabo po SIST EN 204:2016 (10 N/mm<sup>2</sup>).

#### 4 SKLEPI

#### 4 CONCLUSION

Preliminarna raziskava možnosti uporabe odpadne plastike (žličke (Ž) in lončki (L) za kavo) za izdelavo lepilnih mešanic za lepljenje lesa je pokazala, da je izmed petih uporabljenih topil za pripravo lepilne mešanice bilo obetajoče zgolj topilo dimetilformamid (DMF). Preizkušanci, zlepilni z lepilno mešanico Ž-DMF, so dosegli povprečno strižno trdnost 6,5 N/mm<sup>2</sup>, preizkušanci, zlepilni z L-DMF, pa 3,8 N/mm<sup>2</sup>. Ostali preizkušanci so izkazovali bodisi nižje trdnosti lepilnega spoja oziroma so večinoma razpadli po vročem stiskanju ali žaganju v preizkušance. V nadaljnjih raziskavah bomo obetajoči lepilni mešanici modificirali in optimizirali parametre stiskanja z namenom doseganja kakovosti zlepljenosti, ki ustreza standardnim zahtevam za plastomerna lepila za notranjo uporabo.

#### 5 POVZETEK

#### 5 SUMMARY

The use of plastic products is extremely widespread, which is why there is an increasing amount of plastic waste that pollutes our environment. Various initiatives are trying to limit the use of plastic products, but huge amounts of plastic are still used for products that are thrown away after use.

Plastic materials can be recycled in different ways, and the complexity of recycling varies depending on the type of polymer, the shape and type of packaging or product. Thermoplastic polymers that are recycled from waste can be used for a variety of purposes, including the production of adhesives. A very common and useful thermoplastic material is polystyrene. It is most often used in the food industry as packaging, but it is also found as a protective material during transport or as a thermal insulator. One possible way to reuse polystyrene is to produce an adhesive.

The aim of our preliminary investigations was to dissolve polystyrene from plastic waste spoons (Ž) and coffee cups (L) in various solvents and to produce an adhesive for bonding of wood. The adhesive mixtures were made from polystyrene from which coffee cups and coffee spoons were made. We cut it into smaller pieces so that it could dissolve in solvents more quickly and easily. Five different solvents were used to dissolve the plastic: Acetone (AC), Dimethylformamide (DMF), Butyl acetate (BA), Tetrahydrofuran (THF) and Limonene (L).

We have produced a total of 10 adhesive mixtures, half from spoons and half from cups. The adhesive mixtures were produced in glass containers in which plastic and solvent were mixed in a weight ratio of 1:1 (Table 2). In order to determine the quality of bonding with adhesive mixtures made of plastic waste, we made bonded assemblies from two planed beech wood lamellas (*Fagus sylvatica* L.) with dimensions of 500 mm × 150 mm × 5 mm. The adhesive surface was sanded with 240 grit sandpaper and then 200 g/m<sup>2</sup> of adhesive mixture was applied by hand with a spatula to the surface of one lamella. The samples were then compressed in a hydraulic press for 10 minutes at a temperature of 150 °C and a pressure of 12 bar. After pressing, the samples were cooled and then cut into test specimens to determine the shear strength of the adhesive bonds according to the standard SIST EN



205: 2016 (Figure 2). The shear test was performed with a Zwick/Roell Z005 universal testing machine.

It was found that two adhesive mixtures from spoons (Ž-BA and Ž-DMF) partially bonded the beech lamellae, while three adhesive mixtures from the spoons (Ž-THF, Ž-L and Ž- AC) were not successful and most of the specimens disintegrated already during cutting or before the shear test was performed (Figure 3). A similar result was obtained with adhesives from cups. Two adhesive mixtures from cups (L-DMF and L- AC) partially bonded the beech lamellas, whereas three adhesive mixtures (L- BA, L-THF and LL) were not successful (Figure 4).

From the results of the shear strength of the specimens that were bonded with adhesive mixtures Ž-DMF and L-DMF (Table 3), it can be concluded that these mixtures have a certain potential for the production of adhesives from plastic waste. Test specimens bonded with Ž-DMF adhesive achieved an average shear strength of 6.5 N/mm<sup>2</sup>, and specimens bonded with L-DMF achieved 3.8 N/mm<sup>2</sup>. The next research step will be to optimise the pressing parameters (especially temperature) and the cooling process of the adhesives immediately after hot pressing. It is assumed that with appropriate modification of the adhesive mixture and the bonding process, the required shear strengths of adhesive bonds for interior applications according to SIST EN 204: 2016 (10 N/mm<sup>2</sup>) can be achieved.

## ZAHVALA

## ACKNOWLEDGEMENT

Raziskava je nastala v okviru programske skupine P4-0015, pod okriljem Agencije Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost (ARRS).

## LITERATURA

### REFERENCES

- Achilias, D. S., Andriotis, L., Koutsidis, I. A., Louka, D. A., Nianias, N. P., Siafaka, P., Tsagkalias, I., & Tsintzou, G. (2012). Recent advances in the chemical recycling of polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). V: *Material Recycling Trends and Perspectives*. Ur. Achilias, D. InTechOpen: London, UK.
- Cui, T., Song, K., & Zhang, S. (2010). Research on utilizing recycled plastic to make environment-friendly plywood. *Forestry Studies in China*, 12(4): 218–222.
- Curiac, A. S., Petre, A., Stoica, A. G., & Sandu, S. A. (2017). Preparation of adhesives from the expandable polystyrene waste. *Journal of Young Scientist*, Vol. V: 21-26.
- Del Menezzi, C. H. S., Nakamura, A., Queiroz, F., & Couto, M. (2016). Preliminary evaluation of laminated veneer lumber bonded with expanded polystyrene. *Eur. J. Wood Prod.*, 74: 759–761.
- Ellen MacArthur Foundation. *Circular Economy* (<https://www.ellen-macarthurfoundation.org/>)
- Eskander, S. B., Tawfik, M., & Tawfik, M. L. (2018). Mechanical, flammability and thermal degradation characteristics of rice straw fiber-recycled polystyrene foam hard wood composites incorporating fire retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132: 1115-1124.
- Grinbergs, U., Kajaks, J., & Reihmane, S. (2010). Usage of ecologically perspective adhesives for wood bonding. *Scientific Journal of Riga Technical University: Material Science and Applied Chemistry*, 22(1): 114-118.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 364: 2115-2126.
- Jasri, M. A. H. M., Afendi, M., Zulkepli, N. N., Basirom, I., Nurhashima, S., Abu, N., Yahud, S., Amin, N. A. M. (2014). Tensile shear strength of wood adhesive from recycled polystyrene. *Applied Mechanics and Materials*, 554: 3-6.
- Kajaks, J., Reihmane, S., Grinbergs, U., & Kalnins, K. (2012). Use of innovative environmentally friendly adhesives for wood veneer bonding. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 61,3: 207-211.
- Lisperguer, J., Nuñez, C., & Perez-Guerrero, P. (2013). Structure and thermal properties of maleated lignin-recycled polystyrene composites. *J. Chil. Chem. Soc.*, 58, 4: 1937-19740.
- Lye, S. W., & Aw, H. D. (2003). Powder adhesive moulding of recycled expandable polystyrene. *Plastics, Rubber and Composites*, 32, 8-9: 368-376.
- Ordaz-Quintero, A, Monroy-Alonso, A., & Saldívar-Guerra, E. (2020). Thermal pyrolysis of Polystyrene aided by Nitroxide end-functionality. *Experiments and Modeling. Processes*, 8, 432: 1-26.
- Park, Y. J., & Kim, H. J. (2003). Hot-melt adhesive properties of EVA/aromatic hydrocarbon resin blend. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 23(5): 383-392.
- Poletto, M. (2017). Mechanical, dynamic mechanical and morphological properties of composites based on recycled polystyrene filled with wood flour wastes. *Maderas, Cienc. tecnol.*, 19, 4, pp.433-442.
- Scott, A. (2018). Not-so-fantastic plastic. *Chem. Eng. News*, 96: 16-18.
- Selukar, N. B., Lande, C. V., & Ingole, C. G. (2014). Waste Thermocol to adhesive for better environment. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, Volume 1, Issue 6: 98-101.
- SIST (2016). *Razvrstitev plastomernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo* (SIST EN 204:2016).
- SIST (2016). *Lepila - Lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo - Ugotavljanje natezno-strižne trdnosti spojev s preklpom* (SIST EN 205:2016).
- Tawfik, M., Eskander, S. B., & Nawwar, G. A. M. (2017). Hardwood-composites made of rice straw and recycled polystyrene foam wastes. *J. Appl. Polym. Sci.*

- Tullo, A. H. (2018). Fighting ocean plastics at the source. *Chem. Eng. News*, 96: 28-34.
- Vovk, M., Beličič, A., & Šernek, M. (2017). Sestava, lastnosti, uporaba in reciklaža Kerrocka. *Les/Wood*, 66(2), 57-69. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n02a06>
- Winther, T., Bannerman, J., Skogstad, H., Johansson, M. K. G., Jacobson, K., & Samuelsson, J. (2015). Adhesives for adhering polystyrene plastic and their long-term effect. *Studies in Conversation*, 60,2: 107-120.
- Yang, M., Sui, W., Qin, Y., & Nie, Y. (2011). Study on recycling of waste styrofoam for adhesive. *Advanced Materials Research*, 181-182: 975-978.