

Maja RUJNIĆ-SOKELE, Mladen ŠERCER, Božo BUJANIĆ
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvno-plastomernoga kompozita

ISSN: 0351-1871

UDK: 678.742:676.03

Prethodno priopćenje / Preliminary communication

Primljeno / Received: 12. 5. 2004.

Prihvaćeno / Accepted: 14. 6. 2004.

Sažetak

U radu je dan pregled najnovijih spoznaja i trendova na području proizvodnje plastomernih kompozita s prirodnim vlaknima. Navedene su najvažnije prednosti i ograničenja njihove primjene, mogućnosti preradbe i uporabe. Na primjeru plastomernih kompozita s drvnim vlaknima prikazan je utjecaj recikliranja na mehanička svojstva kompozita.

KLJUČNE RIJEČI:

drvno-plastomerni kompoziti
mehanička svojstva
recikliranje

KEY WORDS:

wood-thermoplastic composites
mechanical properties
recycling

Influence of recycling on mechanical properties of wood-thermoplastic composite

Summary

The paper reviews the latest trends in the field of thermoplastic composites with natural fibres. The most important advantages and limitations of their use are specified, as well as possible processing and recovery procedures. Taking the example of thermoplastic composite with wood fibres, the influence of recycling on the mechanical properties of the composite is reviewed.

Uvod / Introduction

Proizvodnja sirovina, materijala i proizvoda, njihova uporaba i odlaganje imaju značajan gospodarski i ekološki utjecaj. Iskristivost sirovina i ekološka prihvatljivost može se povećati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivoga i trajnoga proizvoda, ali isto tako i korištenjem obnovljivih izvora sirovina. Zbog toga je upotreba prirodnih vlakana u kompozitima u neprestanom rastu.

Prilikom razvoja bilo koje industrijske grane potrebno je imati na umu dugoročnu dostupnost sirovina. Kako bi se osigurala trajna opskrba prirodnim vlaknima, nužno je poticati razvoj poljoprivredne proizvodnje i zdravih ekosustava. Takva poljoprivreda označava ravnotežu između očuvanja prirodnih dobara i njihova

korištenja, kako na lokalnomu tako i na globalnomu planu. To pretpostavlja trajni uzgoj biljaka s prirodnim vlaknima, skrb o korištenju poljoprivrednih dobara i očuvanje ekosustava.¹

Najveći udio u proizvodnji plastomera s prirodnim vlaknima zauzima drvo. Za to postoje dva važna razloga odnosno prednosti. Prvi je razlog dostupnost drva, a drugi je što ga ima više od svih drugih prirodnih sirovina koje dolaze u obzir za upotrebu u kompozitima.

Drvo i drugi prirodni materijali kao ojačala kod plastomera privukli su pažnju svojom niskom cijenom i ekološkom prihvatljivošću. Daljnji razvoj tih materijala i širenje njihova tržišta ovisit će o istraživanjima i poboljšanju njihovih preradbenih i uporabnih svojstava.

Kompoziti s prirodnim vlaknima / Natural fibre composites¹

Postoji velik broj biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana. Treba ih sve uzeti u obzir prilikom promišljanja o uzgoju jer svaka od njih ima određene prednosti pred drugom. Bitna je i potražnja za pojedinim vlaknima na tržištu.

Tablica 1 prikazuje popis važnijih biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana i grubu procjenu njihovih količina.

TABLICA 1. Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana¹

TABLE 1. Inventory of major potential world fibre sources¹

Izvor prirodnih vlakana / Fibre source	Svijet (tona osušene tvari) / World (dry metric tons)
Drvo / Wood	1 750 000 000
Slama (pšenica, riža, ječam, zob, raž, lan, trava) / Straw (wheat, rice, oat, barley, rye, flax, grass)	1 145 000 000
Stabljika (kukuruz, sorgum, pamuk) / Stalks (corn, sorghum, cotton)	970 000 000
Šećerna trska / Sugar cane bagasse	75 000 000
Trska / Reeds	30 000 000
Bambus / Bamboo	30 000 000
Sortirani pamuk / Cotton staple	15 000 000
Srčika (juta, kenaf, konoplja) / Core (jute, kenaf, hemp)	8 000 000
Papirus / Papyrus	5 000 000

Izvor prirodnih vlakana / <i>Fibre source</i>	Svijet (tona osušene tvari) / <i>World (dry metric tons)</i>
Liko (juta, kenaf, konoplja) / <i>Bast (jute, kenaf, hemp)</i>	2 900 000
Pamuk pročišćen / <i>Cotton linters</i>	1 000 000
Esparto trava / <i>Esparto grass</i>	500 000
List (američka agava, manila, henequen) / <i>Leaf (sisal, abaca, henequen)</i>	480 000
Sabai trava / <i>Sabai grass</i>	200 000
UKUPNO / <i>TOTAL</i>	4 033 080 000

Dok se drveno brašno i vlakna dobivena iz drva upotrebljavaju kao jeftina zamjena za mineralna punila i ojačala u polietilenu, poli(vini-kloridu) i polipropilenu, ili za poboljšanje svojstava oporabljenih plastomera, vlakna dobivena iz biljaka kao što su lan, konoplja ili juta trenutno su konkurencija staklenim vlaknima u kompozitima uslijed svoje ekološke prihvatljivosti i povoljne cijene.

Prirodna vlakna imaju niz prednosti:

- dobivaju se iz obnovljivih izvora
- niske su gustoće
- nisu abrazivna
- lako se oporabljuju
- biorazgradiva su
- lako su dostupna u velikim količinama
- imaju dobra akustička i izolacijska svojstva
- mali je utrošak energije potreban za preradbu
- niske su cijene.

Tablica 2 prikazuje dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana.

TABLICA 2. Dimenzije nekih vrsta prirodnih vlakana¹
TABLE 2. Dimensions of some lignocellulosic fibres¹

Dimenzije vlakana / <i>Fibre dimensions, mm</i>		
Tip vlakna / <i>Type of fibre</i>	Prosječna duljina / <i>Average length</i>	Debljina / <i>Width</i>
Pamuk / <i>Cotton</i>	10 – 60	0,02
Lan / <i>Flax</i>	5 – 60	0,012 – 0,027
Konoplja / <i>Hemp</i>	5 – 55	0,025 – 0,050
Manilska konoplja / <i>Manila hemp</i>	2,5 – 12	0,025 – 0,040
Bambus / <i>Bamboo</i>	1,5 – 4	0,025 – 0,040
Esparta (Alfa) / <i>Esparto</i>	0,5 – 2	0,013
Slama od žita / <i>Cereal straw</i>	1 – 3,4	0,023
Indijska konoplja / <i>Jute</i>	1,5 – 5	0,02
Listopadno drvo / <i>Deciduous wood</i>	1 – 1,8	0,03
Četinjače / <i>Coniferous wood</i>	3,5 – 5	0,025

Svojstva i primjena kompozita s prirodnim vlaknima / Properties and application of natural fibre composites¹

U odnosu na ostale kompozite, za primjenu kompozita s prirodnim vlaknima postoje neka ograničenja. Prvo se ograničenje odnosi na niže temperature preradbe. Granična temperatura razgradnje prirodnih vlakana kreće se oko 200 °C, iako je moguće postići i više temperature, ali kroz kraće vrijeme. To je ujedno i ograničenje za moguće uporabive plastomere. Izbor je uglavnom sveden na polipropilen (PP), poli(vinil-klorid) (PVC), polietilen (PE) i polistiren (PS). No, treba naglasiti da ovi plastomeri čine približno 70 % ukupne proizvodnje polimera, pa troše i značajne količine punila i ojačala.

Drugo ograničenje je upijanje vode prirodnih vlakana, njihova higroskopnost. Upijanje vode može uzrokovati bubrenje vlakana što pak uzrokuje slabu dimenzijsku stabilnost. Kad je vlakno omotano polimerom upijanje je vode najmanje. Nemoguće je potpuno ukloniti upijanje vode bez primjene skupe površinske zaštite kompozita, no moguće ga je smanjiti, primjerice, kemijskom promjenom hidroksilnih grupa prisutnih u vlaknu što, naravno, povisuje cijenu. Dobro prijanjanje vlakna s matricom također smanjuje upijanje vode. Ova ograničenja treba uzeti u obzir prilikom odabira i primjene ovih kompozita.

Celulozna vlakna / punila mogu biti razvrstana u tri razreda, ovisno o njihovu ponašanju u polimernoj matrici.

- Drvni i ostali biljni otpad ubraja se u skupinu punila koja povećavaju rastezni i savojni modul elastičnosti ali malo utječu na čvrstoću kompozita.
- Drvena vlakna i reciklirani papir imaju veći utjecaj na rast modula elastičnosti. Pritom povećavaju i čvrstoću kompozita, uz upotrebu veziva koja poboljšavaju prijenos naprezanja s matrice na vlakno.
- Prirodna vlakna od biljaka (kenaf, juta, lan i sl.) vrlo su učinkoviti dodaci. Rastezni i savojni modul elastičnosti je kod tih kompozita značajno viši nego kod kompozita s drvnim vlaknima, osobito ako se uzme u obzir omjer povišenja modula elastičnosti i gustoće kompozita. Taj je omjer u razini s kompozitima ojačanim staklenim vlaknima.

U tablici 3 navedene su vrijednosti rastezne čvrstoće nekih prirodnih vlakana.

TABLICA 3. Vrijednosti rastezne čvrstoće¹
TABLE 3. Tensile strength for some agro-based fibres¹

Vlakna / <i>Fibres</i>	Rastezna čvrstoća* / <i>Tensile strength, GPa</i>
Kenaf / <i>Kenaf</i>	11,91
Konoplja / <i>Hemp</i>	8,95
Drvo / <i>Wood</i>	7,48
Agava / <i>Sisal</i>	6,14
Pamuk / <i>Cotton</i>	3,54

* Sve su vrijednosti pojedinačna čvrstoća vlakana osim za agavu, za koju je iskazana čvrstoća snopa vlakana / *All single fibres strength except sisal which is for fibre bundles*

Postupci proizvodnje kompozita s prirodnim vlaknima / Processes of production of natural fibre composites

U plastičarskoj industriji kao dodatak polimerima pretežno se rabio talk, kalcijev karbonat, tinjac te staklena i ugljikova vlakna. Godišnje se trošilo oko 2,5 milijuna tona tih dodataka i ojačavala. Postojao je svojevrstni otpor prerađivača prema uporabi drvnih i prirodnih vla-

kana, kao što su kenaf ili lan, ponajviše zbog njihove velike nasipne gustoće, niske toplinske postojanosti i sklonosti prema upijanju vode, te neprikladnosti opreme za preradbu kompozita s prirodnim vlaknima.²

Do značajne je promjene došlo zadnjih desetak godina. Veće je poznavanje svojstava drva i ostalih izvora prirodnih vlakana u plastičarskoj industriji, razvijena je nova oprema za preradbu polimera ojačanih prirodnim vlaknima, a postoje i bolja veziva i prijanjala. Sve je to povećalo interes plastičarske industrije za preradbu tih kompozita.²

I u drvnj se industriji također promijenio pristup. Povećana trajnost proizvoda od drvno-plastomernih kompozita uz minimalno održavanje čini ih naročito zanimljivim u građevinarstvu kao zamjena za drvenu građu.²

Preradba plastomernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima obično se provodi u dva koraka. Prvo se sastojci smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Smješavanje komponenata može se obaviti kontinuirano u ekstruderu, s time da se drvo može dodati zajedno s plastomerom ili u plastomernu taljevinu. Moguće je cikličko smješavanje komponenata u miješalicama, ali se mogu pojaviti odstupanja u kvaliteti od šarže do šarže.³

Za proizvodnju plastomernih kompozita primjenjuje se ekstrudiranje, injekcijsko prešanje, kalandriranje, toplo oblikovanje i pultrudiranje.³

Za proizvodnju plastomernih kompozita najviše se primjenjuje ekstrudiranje, i to za razne pune i šuplje profile. Postoje razni tipovi ekstrudera za preradbu drvno-plastomernih kompozita. To može biti ekstruder s jednim pužnim vijkom ili ekstruder s dva pužna vijka. Osi ekstrudera s dva pužna vijka mogu biti paralelne ili pod kutom. U nekim postupcima primjenjuju se ekstruderi u tandemu: prvi za smješavanje, a drugi za protiskivanje taljevine. Voda iz vlakana koja čini njihovu mokrinu odstranjuje se u ekstruderu tijekom preradbe.⁴

Injekcijsko se prešanje primjenjuje rjeđe, i to za oblikovanje proizvoda složenijih oblika. Sastojci se prvo smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Osim smješavanja u miješalici, smješavanje se može provesti ekstrudiranjem nakon čega se pravi granulati. Tako pripremljen granulati injekcijski se preša.

Prednosti ekstrudiranja u odnosu na injekcijsko prešanje su manja osjetljivost na mokrinu materijala i dobivanje gotovoga proizvoda u jednom koraku jer se smješavanje komponenata može obaviti u istom ekstruderu kojim se oblikuje profil. No to zahtijeva ekstruder s dva pužna vijka da bi se osiguralo smješavanje, a njegova cijena je viša od jednopužnoga.⁵

Također se primjenjuje kalandriranje s toplim oblikovanjem i pultrudiranje, ali u znatno manjem opsegu. Kalandriranjem se najčešće proizvode ploče koje se koriste za oblaganje u građevinarstvu.⁵

Pultrudiranjem se proizvode razni puni profili provlačenjem kroz matricu. Šuplji profili ograničenih duljina mogu se proizvesti namatanjem na jezgru s posmakom.⁵

Drvno-plastomerni kompoziti / Wood-thermoplastic composites

Drvno-plastomerni kompoziti (DPK) relativno su nova skupina materijala koja je započela svoj razvoj preko Atlantika, ali u zadnje vrijeme se i u Europi pokazuje veliko zanimanje za taj materijal. Taj pojam pokriva iznimno široko područje kompozita koji primjenjuju polimere od polipropilena do poli(vinil-klorida), i veziva/punila od drvnoga brašna ili drvnih vlakana. Ti novi materijali proširuju kon-

ceptiju drvenih kompozita od čiste iverice u nova područja i, što je još važnije, u novu generaciju kvalitetnih proizvoda.⁵

Prva generacija drvnih kompozita bila je kombinacija recikliranoga drvnoga brašna ili piljevine i veziva na bazi duromera. Ti su materijali bili sasvim dobri za nezahtjevne primjene. Nova generacija drvno-plastomernih kompozita, osim što se brzo razvila, dovela je do kompozita koji imaju dobra mehanička svojstva, visoku dimenzijsku stabilnost i mogu se oblikovati u složene oblike. Oni su čvrsti, stabilni i mogu se ekstrudirati ili injekcijski prešati u uskim tolerancijama.⁵

Najuobičajeniji kompoziti toga tipa proizvode se smješavanjem drvnoga brašna i plastomera, a dobiveni se materijal može preradivati postupcima koji su tipični za plastiku, iako materijal ima svojstva i drva i plastike.⁵

Drvo može biti u obliku piljevine ili kao stari drveni otpad, što znači da nije potrebno trošiti dodatne drvene resurse za proizvodnju ovoga kompozita, već se može koristiti otpadno drvo koje bi se u najboljem slučaju spalilo, ako ne i bacilo. Tako ono postaje sirovina što je očiti dokaz da recikliranje može biti unosno i ekološki pogodno.⁵

Polimerni materijali također mogu biti reciklirani, na primjer PE vrećice, iako se kod zahtjevnije primjene treba izbjegavati te se upotrebljava novi polimerni materijal. U drvno-plastomernim kompozitima je uporaba dostigla svoj cilj – od otpada proizvoda kratkoga životnoga vijeka radi se dugovječni proizvod.⁵

Drvno-plastomerni kompoziti su proizvodi koji ne zahtijevaju daljnju obradu. Postojani su na vremenske uvjete, vodu i plijesan te se primjenjuju i na otvorenomu prostoru gdje bi samo drvo bilo neprikladno.⁵

DPK imaju mnogo prednosti:^{5, 6}

- koriste jeftine i lako nabavljive sirovine
 - cijenom su konkurentni i drvu i plastomerima
 - lako se proizvode primjenom već postojećih tehnika proizvodnje
 - proizvodi mogu biti raznoliki i veličinom i oblikom
 - ne zahtijevaju površinsku zaštitu poput drva
 - smanjena je cijena održavanja u odnosu na drvo
 - mogu se spajati čavlima i obrađivati postupcima za obradbu drva.
- Nemoguće je napraviti savršeni materijal, što se može vidjeti i po nedostacima DPK-a:^{5, 6}
- imaju veću gustoću od plastomera i drva
 - skuplji su od drva
 - cijena montaže je veća
 - za proizvodnju je potrebna veća količina energije u odnosu na drvo
 - niže su čvrstoće u odnosu na drvo.

Jedan od razloga razvoja drvno-plastomernih kompozita je ekološko motrište. Pritisci na industriju u pogledu oporablivosti i održivoga razvoja svakodnevno rastu. Zbog toga postoji jasna potreba za produžetkom životnoga vijeka materijala kao što je drvo. Ovakvo iskorištavanje materijala, na koje se gleda kao da je otpad, daje potporu načelima održivoga razvoja.⁵

Proizvođačima polimernih materijala jasno je da moraju što manje ovisiti o petrokemijskoj industriji zbog stalnoga rasta cijena nafte. Drvna industrija također ima potrebu povećati iskoristivost resursa i uporabiti otpad koji se neminovno javlja. Dolaskom DPK-a dobrotu iskorištenja drva povećala se za 40 % u odnosu na starije metode uporabe.⁵

DPK pridonosi okolišu i na sljedeće načine:⁵

- ima mali postotak otpada (koji je lako oporabljiv)
- DPK ne sadrži formaldehide ili hlapljive organske sastojke
- DPK je oporabljiv proizvod (može se samljjeti te ponovo upotrijebiti)
- kao otpad nije opasan i može se odlagati s ostalim otpadom.

Svojstva i primjena drvno-plastomernih kompozita / Properties of wood-thermoplastic composites⁵

Drvno-plastomerni kompoziti su materijali koji, slično kao polimerni materijali, imaju mnogo sastojaka. Osnovnoj mješavini drva i plastomera dodaju se dodaci za poboljšanje preradljivosti i promjenu svojstava proizvoda. Tipična sirovina je fino drvo brašno (veličina čestica 0,25 – 0,5 mm) koja se smješa s plastomerom i dodacima.

Drvno-plastomerni kompoziti imaju svojstva obaju materijala. Imaju krutost i čvrstoću između vrijednosti plastike i drva, ali općenito veću gustoću i od drva i od plastike. Svojstva DPK-a izravna su posljedica njegove strukture: oni su prisani spoj čestica drva i plastomera pri čemu plastomer obavija drvo tankim omotačem.

Niska higroskopsnost DPK-a (upijanje vode od približno 0,7 % u usporedbi sa 17 % ravnotežne mokrine kod jelovine na otvorenom prostoru u ljetnim mjesecima), izravan je rezultat strukture. Vodu može upiti samo drvo u vanjskom dijelu koje je u dodiru s okolinom, ali se ne prenosi kroz plastomernu matricu ili se prenosi neznatno. Kao posljedica DPK-i su izrazito postojani na zračnu vlagu, imaju malu promjenu obujma u vodi i ne podliježu napadu kukaca i plijesni.

Pigmenti, UV stabilizatori i veziva mogu se dodati u DPK prije preradbe da se poboljšaju određena svojstva. Općenito govoreći, svojstva DPK-a su sljedeća:

- dobra krutost i žilavost
- dimenzijska stabilnost
- otpornost na trulež i plijesan
- dobra toplinska svojstva
- niska higroskopsnost.

Svojstva DPK-a mogu se prilagoditi zahtjevima proizvoda u uporabi, bilo mijenjajući vrstu drva ili plastomera. DPK bazirani na PE su jeftiniji i mogu se primijeniti pri višim temperaturama nego proizvodi na bazi PVC-a, ali DPK s matricom od PVC-a su pogodniji za završnu obradbu ili bojanje.

Također se može promatrati veličina čestica drvnoga brašna, omjer drva i plastomera, postotak veziva i druge tvari koje se može lako promijeniti da bi se ispitaio njihov utjecaj na svojstva konačnoga proizvoda. Najčešće se ispituju čvrstoća, bilo savojna ili rastezna, rastezni i savojni moduli, temperatura omekšavanja ili pak dimenzijska stabilnost ovisno o navedenim utjecajima.

U SAD-u je tržište drvno-plastomernih kompozita krajem prošloga i početkom ovoga stoljeća raslo 100 % godišnje, nešto zbog širenja primjene na nove proizvode, a nešto zbog povećanja potražnje za već postojećim proizvodima. Trenutna primjena DPK-a najveća je u građevinarstvu koje mnogostrano iskorištava svojstva DPK-a.

DPK se može koristiti za proizvode u kojima su do sada dominirali drvo ili PVC, a tipične primjene su okviri vrata i prozora te njihove sastavnice, vanjsko dekorativno oblaganje, palube brodice, daske za glačanje, rukohvati ograda, radne površine, police, ograde, vrtni i uredski namještaj, kuhinjski ormarići te zvučna izolacija.

Ispitivanje mehaničkih svojstava regenerata drvno-plastomernoga kompozita / Testing of mechanical properties of wood-thermoplastic composite regenerate

Drvno-plastomerni kompoziti uobičajeno se prerađuju postupkom ekstrudiranja, pa se željela provjeriti njihova pogodnost za injekcijsko prešanje. Isto je tako bilo zanimljivo ispitati kako se ponaša regenerat kompozita polipropilena i drvnoga brašna tijekom injekcijskoga prešanja te, jesu li i u kojoj mjeri opadala mehanička svojstva nakon više ciklusa preradbe odnosno mehaničkoga recikliranja. U tu svrhu injekcijskim prešanjem su izrađeni ispiti za ispitivanje nekih mehaničkih svojstava kompozita.

Ispitni materijal i oprema / Testing material and equipment

Proizvođač kompozita je tvrtka *Isokon* iz Slovenskih Konjica. Kompozit se sastoji od 61 % polipropilena, 37 % drvnoga brašna i 2 % boje, a proizveden je smješanjanjem sastojaka u dvopužnom ekstruderu te naknadnim usitnjavanjem ekstrudata.

Prije prve preradbe materijal je bio sušen 4 sata pri temperaturi od 106 °C prema preporuci proizvođača materijala, da ne bi došlo do bubrenja izradaka nakon preradbe.

Ispitci su izrađeni u kalupu koji je namijenjen za izradbu ispita za ispitivanje mehaničkih svojstava polimera, te nije bilo potrebna naknadna obradba istih.

Kompozit je prerađen na stroju za injekcijsko prešanje *Engel VC 330/60*. Parametri su preradbe navedeni u tablici 4.

TABLICA 4. Parametri injekcijskoga prešanja
TABLE 4. Injection moulding parameters

Parametar preradbe/ <i>Processing parameter</i>	Vrijednost / <i>Value</i>
Temperatura mlaznice / <i>Nozzle temperature</i>	195 °C
Temperatura 1. grijala / <i>1st heater temperature</i>	195 °C
Temperatura 2. grijala / <i>2nd heater temperature</i>	190 °C
Temperatura 3. grijala / <i>3rd heater temperature</i>	190 °C
Brzina ubrizgavanja / <i>Injection rate</i>	110 mm/s
Tlak ubrizgavanja / <i>Injection pressure</i>	160 bar
Temperatura vode za temperiranje kalupa / <i>Cooling temperature</i>	20 °C
Naknadni tlak / <i>Holding pressure</i>	90 bar
Vrijeme naknadnoga tlaka / <i>Holding time</i>	8 s
Vrijeme hlađenja / <i>Cooling time</i>	13 s
Ukupno vrijeme ciklusa / <i>Cycle time</i>	24,2 s

Provedba ispitivanja / Conducting the experiment⁷

Nakon preradbe izratci su usitnjeni i tako dobiveni materijal je ponovno injekcijski prešan s istim parametrima.

Postupak usitnjavanja i ponovnoga injekcijskoga prešanja ponavljan je 9 puta, tako da je materijal ukupno preraden 10 puta. U daljnjemu tekstu pojam *generacija materijala (ispitaka, otpresaka)* odnosit će se na broj preradbi koje je materijal prošao.

Prve četiri generacije materijala bile su oporabljene u roku 48 sati od njegova sušenja prije prve preradbe. Međutim, nakon četiri preradbe materijal je ponovno preraden tek nakon 72 sata.

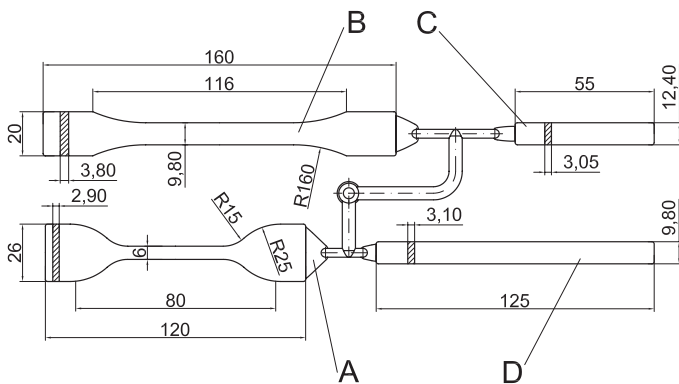
Zbog toga se na površini otpresaka 5. i 6. generacije pažljivijim promatranjem mogu vidjeti bijele pruge u smjeru tečenja materijala, što je posljedica povećane mokrine materijala. Primijećeno je i malo, ali ipak osjetno smanjenje većine svojstava 5. generacije ispitaka u odnosu na 4. generaciju.

Pošto je ustanovljeno da se svojstva vrlo malo mijenjaju s povećanjem broja preradbi, ispitivanje mehaničkih svojstava 7, 8. i 9. generacije materijala nije obavljeno. Da bi se uklonio utjecaj mokrine na svojstva uradka i time ispitalo je li smanjenje svojstava vezano uz povećanje sadržaja vode u materijalu, prije 10. preradbe materijal je osušen u istim uvjetima kao prije 1. preradbe.

Međutim, pokazalo se da sušenje nije bilo primjereno za ovako visoku generaciju materijala, te je očitovanje sadržaja vode u vidu bijelih pruga bilo još izraženije u 10. generaciji materijala nego li u 5. i 6. To je naravno uzrokovalo daljnji pad većine svojstava.

Ispitivanje mehaničkih svojstava / Testing of mechanical properties

Na slici 1 prikazana je kalupna šupljina ispitnoga kalupa.



SLIKA 1. Kalupna šupljina; A – ispitak A, B – ispitak B, C – ispitak C, D – ispitak D

FIGURE 1. Mould cavity; A – specimen A, B – specimen B, C – specimen C, D – specimen D

Na kompozitnim ispitcima ispitivana su sljedeća mehanička svojstva:

- rastezni modul (ispitak B)
- rastezna čvrstoća (ispitak A i ispitak B)
- savojni modul (ispitak C)
- savojna čvrstoća (ispitak C)
- savojna žilavost (ispitak D).

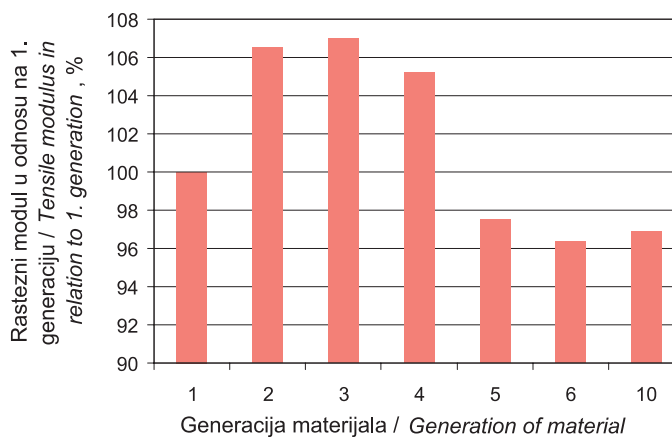
Rastezni modul / Tensile modulus

Rastezni modul ispitivan je na ispitcima tipa B (slika 1). Dimenzije ispitaka u potpunosti odgovaraju traženim dimenzijama ispitaka prema HRN G.S2.612 te se dobivene vrijednosti rasteznoga modula mogu uspoređivati s vrijednostima rasteznoga modula drugih materijala.

U tablici 5 prikazani su rezultati ispitivanja rasteznoga modula (navedena je srednja vrijednost od 5 mjerenja), a na slici 2 prikazano je ponašanje rasteznoga modula s obzirom na 1. generaciju materijala.

TABLICA 5. Rezultati ispitivanja rasteznoga modula
TABLE 5. Results of tensile modulus testing

Generacija materijala / Generation of material	Rastezni modul / Tensile modulus N/mm ²	Standardna devijacija / Standard deviation N/mm ²
1	2570	151
2	2737	125
3	2749	86
4	2704	85
5	2506	77
6	2477	131
10	2490	74



SLIKA 2. Grafički prikaz rasteznoga modula po generacijama materijala

FIGURE 2. Graphic representation of tensile modulus by material generations

Rastezna čvrstoća / Tensile strength

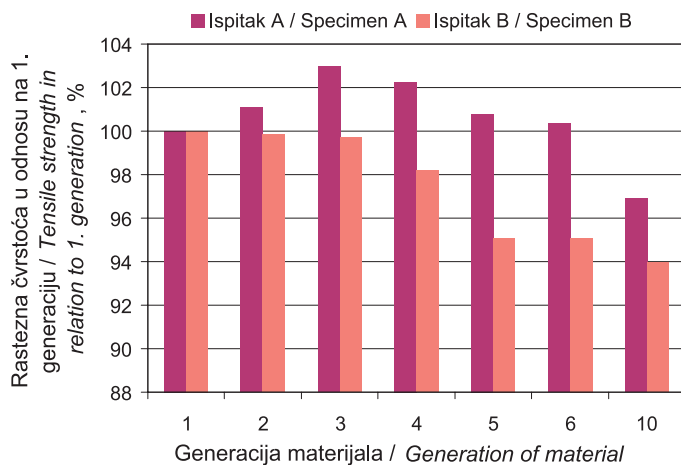
Rastezna čvrstoća ispitivana je na dva tipa ispitaka (ispitak A i ispitak B) s dvije različite brzine ispitivanja.

Ispitak A odgovara dimenzijama i oblikom prema HRN G.S2.612 te se dobiveni podaci o rasteznoj čvrstoći mogu uspoređivati s drugim materijalima.

U tablici 6 prikazani su rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće (srednja vrijednost od 5 mjerenja), a na slici 3 prikazano je ponašanje rastezne čvrstoće s obzirom na 1. generaciju materijala.

TABLICA 6. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće
TABLE 6. Results of tensile strength testing

Generacija materijala / Generation of material	Tip ispitka / Test specimen type	Rastezna čvrstoća / Tensile strength N/mm ²	Standardna devijacija / Standard deviation N/mm ²
1	A	24,74	0,13
2	A	25,01	0,16
3	A	25,48	0,14
4	A	25,30	0,16
5	A	24,94	0,16
6	A	24,82	0,21
10	A	23,97	0,25
1	B	22,47	0,20
2	B	22,44	0,07
3	B	22,40	0,11
4	B	22,06	0,12
5	B	21,37	0,07
6	B	21,37	0,07
10	B	21,11	0,07



SLIKA 3. Grafički prikaz rastezne čvrstoće po generacijama materijala
FIGURE 3. Graphic representation of tensile strength by material generations

Savojni modul / Flexural modulus

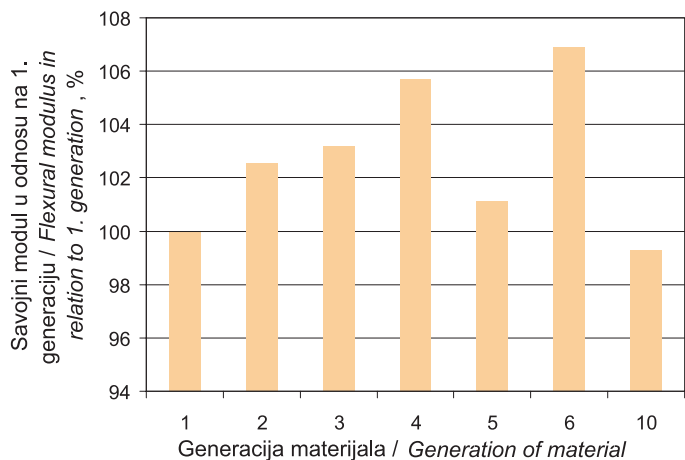
Dimenzije ispitka (slika 1, ispitak D) u skladnosti su s traženim dimenzijama prema HRN G.S2.614 te se rezultati ispitivanja mogu

uspoređivati s drugim materijalima. Rezultati ispitivanja savojnoga modula dani su u tablici 6.

U tablici 7 prikazani su rezultati ispitivanja savojnoga modula (srednja vrijednost od 5 mjerenja), a na slici 4 prikazano je ponašanje savojnoga modula s obzirom na 1. generaciju materijala.

TABLICA 7. Rezultati ispitivanja savojnoga modula
TABLE 7. Results of flexural modulus testing

Generacija materijala / Generation of material	Savojni modul / Flexural modulus N/mm ²	Standardna devijacija / Standard deviation N/mm ²
1	1699	128
2	1742	72
3	1753	74
4	1796	91
5	1718	68
6	1816	90
10	1687	59



SLIKA 4. Grafički prikaz savojnoga modula po generacijama materijala
FIGURE 4. Graphic representation of flexural modulus by material generations

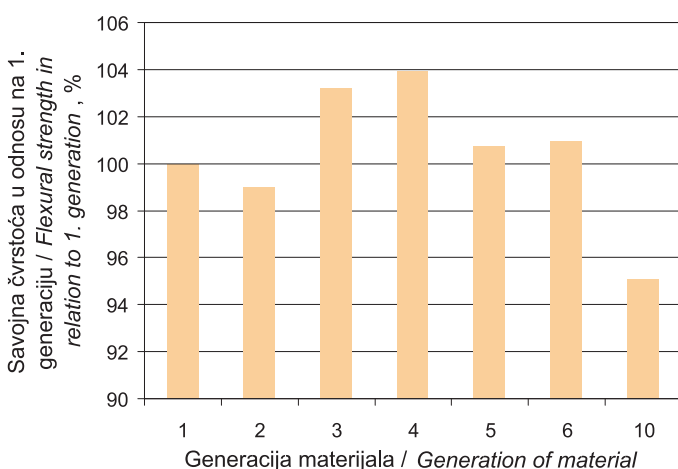
Savojna čvrstoća / Flexural strength

Ispitak je istovjetan ispitku za ispitivanje savojnoga modula (slika 1, ispitak D) te se utvrđene vrijednosti savojne čvrstoće također mogu uspoređivati s vrijednostima savojne čvrstoće drugih materijala.

Rezultati ispitivanja po generacijama ispitaka dani su u tablici 8 (srednja vrijednost od 5 mjerenja), a na slici 5 prikazano je ponašanje savojne čvrstoće s obzirom na 1. generaciju materijala.

TABLICA 8. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće
TABLE 8. Results of flexural strength testing

Generacija materijala / Generation of material	Savojna čvrstoća / Flexural strength N/mm ²	Standardna devijacija / Standard deviation N/mm ²
1	40,19	0,44
2	39,79	0,92
3	41,47	0,00
4	41,77	0,27
5	40,49	0,35
6	40,57	0,41
10	38,22	0,27



SLIKA 5. Grafički prikaz savojne čvrstoće po generacijama materijala
FIGURE 5. Graphic representation of flexural strength by material

Savojna žilavost / Impact strength

Ispitivanje je izvedeno s energijom udara od 1 kJ na ispitku C (slika 1). Ovaj ispitak ne odgovara normi za određivanje savojne žilavosti plastomera prema HRN G.S2.616, te se vrijednosti mogu upotrijebiti samo kao usporedba između generacija materijala, a nikako kao usporedba s vrijednostima žilavosti drugih materijala. Vrijednosti dobivene ispitivanjem savojne žilavosti dane su u tablici 9, a grafički prikaz odnosa vrijednosti po generacijama na slici 6.

Rasprava o rezultatima pokusa / Discussion of the results of the experiment

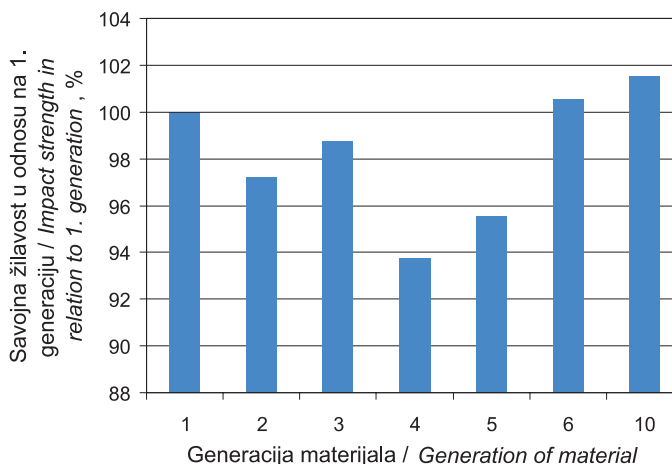
Kao što se može vidjeti na slici 2, oporabljeni kompozit u 2, 3. i 4. generaciji ima čak viši rastezni modul nego li nakon prve preradbe. Smanjenje rasteznoga modula materijala 5, 6. i 10. generacije uzrokovano je najvjerojatnije povećanjem mokrine materijala.

U prilog tome govori i činjenica da se rastezni moduli ispita 2, 3. i 4. generacije neznatno razlikuju, a i razlika između materijala 5, 6. i 10. generacije je vrlo mala.

Kao i kod rasteznoga modula, vrijednosti rastezne čvrstoće 2, 3. i 4. generacije ispita su veće u odnosu na 1. generaciju, dok su manje u 5, 6. i 10. generaciji materijala (slika 3).

TABLICA 9. Rezultati ispitivanja savojne žilavosti
TABLE 9. Results of impact strength testing

Generacija materijala / Generation of material	Savojna žilavost / Impact strength kJ/m ²	Standardna devijacija / Standard deviation kJ/m ²
1	7,19	0,43
2	6,99	0,48
3	7,1	0,39
4	6,74	0,42
5	6,87	0,44
6	7,23	0,53
10	7,30	0,40



SLIKA 6. Grafički prikaz savojne žilavosti po generacijama materijala
FIGURE 6. Graphic representation of flexural strength by material generations

Dobiveni podaci o savojnomu modulu pokazuju da nije došlo do smanjenja istoga kao posljedice uporabe materijala. Štoviše, vrijednosti su savojnoga modula kod oporabljena materijala (generacije 2 – 6) veće nego nakon prve preradbe, dok je vrijednost savojnoga modula 10. generacije materijala neznatno manja u odnosu na vrijednost savojnoga modula 1. generacije.

Može se primijetiti da savojni modul pokazuje težnju rasta s povećanjem broja preradbi, ali sniženje u 5. i 10. generaciji je, kao i kod rasteznoga modula, najvjerojatnije uzrokovano povećanom mokrinom materijala (slika 4).

Kao i kod rastezne čvrstoće, nakon uporabe je došlo do porasta savojne čvrstoće, što se najbolje vidi u 3. i 4. generaciji. Zanimljivo je primijetiti da se značajniji pad savojne čvrstoće pojavljuje tek u 10. generaciji materijala (slika 5).

Zbog velikoga rasipanja rezultata prilikom određivanja savojne žilavosti ispitivanja su obavljena na uzorku od 10 ispita. S obzirom na moguća velika odstupanja pri izračunavanju srednjih vrijednosti savojne žilavosti, teško je izvući neki određen zaključak zbog malih razlika između generacija materijala. Jedino što se sa sigurnošću može ustvrditi je da se kod veće mokrine materijala povećava žilavost.

Zaključak / Conclusion

Kompoziti predstavljaju veliki izazov, ali i pružaju nove mogućnosti za svakoga konstruktora, projektanta i inženjera.

Nove mogućnosti donose isto tako i nove probleme. Čest je slučaj slaboga prijanjanja matrice i ojačala, te je potrebno naći prikladna veziva da se riješi taj problem, ili kemijski treba izmijeniti ojačala i matricu. No, također treba istražiti i mogućnosti uporabe, jer će u budućnosti oporabljeni kompoziti imati prednost pri izboru materijala.

Iako se kod uporabe plastomera očekuje smanjenje većine mehaničkih svojstava s povećanjem broja preradbi, ipak se uspješno oporabljuju gotovo svi plastomeri. Ispitivani materijal nije pokazao ponašanje tipično za plastomere u pogledu uporabe. Štoviše, neka su svojstva bila čak i bolja u višim generacijama materijala.

No, tijekom izradbe rada uočeno je da se materijal vrlo lako ovlažuje što uzrokuje smanjenje većine svojstava. Također je primijećen problem sušenja materijala visokih generacija.

Čak i kada bi se zanemarila mokrina i smanjenje mehaničkih svojstava pripisalo u potpunosti degradaciji materijala, s praktične strane to smanjenje ne bi bilo značajno.

Naime, ako se za prosječan udio oporabljenoga materijala u novomu materijalu prilikom preradbe injekcijskim prešanjem odabere 25 %, tada će udio 5. i viših generacija materijala iznositi svega 0,4 %, što znači da će utjecaj nešto nižih svojstava tih generacija biti gotovo beznačajan.

Iako je sa stanovišta nekih svojstava, npr. žilavosti, taj kompozit nepogodan za zahtjevnije primjene, barem se može reći da se ta svojstva neće značajno smanjiti kao posljedica primarne uporabe.

Udio oporabljenoga materijala često je malen kod polimera zbog lošijih preradbenih ili mehaničkih svojstava, no u ovom slučaju, iako se radi o pretežno polimernome materijalu, on neće imati takve probleme.

Zahvala / Acknowledgement

Rad je dio istraživanja što ga je financiralo Ministarstvo znanosti i tehnologije, danas Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske, u okviru projekta EUREKA E!2819 - FACTORY ECOPLAST. Autori zahvaljuju Ministarstvu na novčanoj potpori.

LITERATURA / REFERENCES

1. Rowell, R. M., Sanadi A. R. i dr.: *Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and Opportunities*, <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/PDF1997/rowel97d.pdf>
2. N. N.: *Interfacing Wood-plastic composites industries in the U.S.*, Forest Products Society, www.jobwerx.com/news/Archives/iwpc.html
3. N. N.: *Wood Plastic Composites Study – Technologies and UK market Opportunities*, www.wrap.org.uk/publications/WoodPlasticsCompositeStudy_TechnologiesAndUKMarketOpportunities.pdf
4. Climenhage, D.: *Recycled Plastic Lumber. A Strategic Assessment of Its Production, Use and Future Prospects*, Environment & Plastic Industry Council, www.plasticsrecycling.ab.ca/PlasticLumberReport.pdf
5. N. N.: *Wood-Plastic Composites*, TimbaPlus, <http://www.timbaplus.co.uk/TechnicalReview.pdf>
6. N. N.: *An Investigation of the Potential to Expand the Manufacture of Recycled Wood, Plastic Composite Products in Massachusetts*, Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 2000, <http://www.chelseacenter.org/pdfs/TechReport19.pdf>
7. Pleše, T.: *Ispitivanje mehaničkih svojstava regenerata drvno-plastičnog kompozita*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2004.

DOPISIVANJE / CORRESPONDENCE

Mr. sc. Maja Rujnić-Sokele
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5
HR-10000 Zagreb, Hrvatska / Croatia
Tel.: +385-1-61-68-191, Faks: +385-1-61-56-940
E-mail: mrujnic@fsb.hr

Posljednje vijesti

Privedio: Damir GODEC

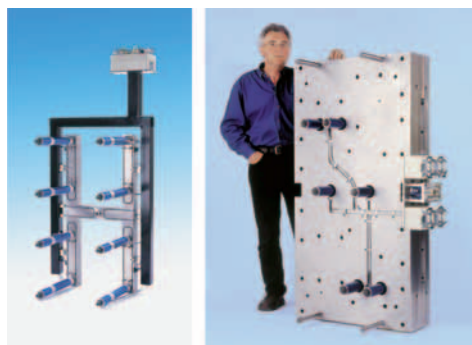
Vrući uljevni sustav *Rheo-Pro* za injekcijsko prešanje zahtjevnih otpresaka

Zajednički rad tvrtki *Mold Hotrunner Technology AG* (MHT-Hochheim, Njemačka) i *Mold Hotrunner Solutions Inc.* (MHS-Georgetown, Kanada) rezultirao je izradbom nove generacije vrućih uljernih sustava *Rheo-Pro*. *Rheo-Pro* sustav nije jednostavni sklop standardnih elemenata, već se tim sustavom nastoji udovoljiti zahtjevima kupaca u svakom pojedinom slučaju. Obje tvrtke udružile su stručnjake iz područja vrućih uljernih sustava u jedan tim koji u suradnji s kupcima razvija optimalni vrući uljevni sustav već od rane faze razvoja kalupa.

Prednosti uporabe toga sustava očituju se u izvrsnoj prilagodbi vrućega uljernih sustava svakom zahtjevnijem kalupu, pri čemu se svaki element sustava posebno ispituje prije isporuke. *Rheo-Pro* sustav je moguće uporabiti i pri zahtjevnijim postupcima injekcijskoga prešanja, kao što su višekomponentno injekcijsko prešanje, koinjekcijsko

prešanje, kaskadno injekcijsko prešanje te pri uporabi katnih kalupa. Konačno, kupci vrućih uljernih sustava svakodnevno su suočeni s uporabom novih, zahtjevnijih polimernih materijala, izradbom otpresaka vrlo kompleksne i komplicirane geometrije, pri čemu im MHT/MHS stručni tim s pomoću *Rheo-Pro* sustava omogućuje brzo i učinkovito rješavanje postavljenih zadataka.

Mold & Hotrunner Technology AG, Press Release



Rheo-Pro vrući uljevni sustav