

Svojstva i primjena drvno-plastičnih kompozita

Prah, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:867746>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivana Prah

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja **Ivana Prah**

Predala je izrađen završni rad dana: 5. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije
prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 10. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivana Prah

SVOJSTVA I PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH
KOMPOZITA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, FKIT

Članovi ispitnog povjerenstva:

izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, FKIT

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, FKIT

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, FKIT

Zagreb, rujan 2024.

Zahvaljujem svojoj mentorici na strpljenju i susretljivosti tijekom pisanja ovog rada. Također zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom cijelog vremena studiranja te prijateljima koji su mi razveselili studentske dane.

SVOJSTVA I PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA

SAŽETAK

Drvno-plastični kompoziti izrađuju se od plastičnog materijala kao matrice i drva kao punila. Primjena drvno-plastičnih kompozita sve je veća zbog njihovih dobrih konačnih svojstava. Drvo ugrađeno u plastičnu matricu poboljšava mehanička svojstva dok plastika u drvno-plastičnim kompozitima smanjuje bubrenje u vodi. Različiti drvni i poljoprivredni ostaci povezani s polimernom matricom, osim što daju kompozit dobrih svojstava, pomažu u zbrinjavanju otpada. U posljednje vrijeme, sve je više nastojanja da se postigne učinkovito recikliranje otpadnih polimernih i drugih materijala. Jedan od prikladnih načina zbrinjavanja polimernog otpada i različitih drvnih, tj. općenito celuloznih ostataka upravo su drvno-plastični kompoziti. Ovaj rad analizira različite postupke pripreme i primjene drvno-plastičnih kompozita kao i njihova svojstva.

Ključne riječi

drvno-plastični kompoziti

drvo

plastika

polimerni kompoziti

recikliranje

PROPERTIES AND APPLICATION OF WOOD-PLASTIC COMPOSITES

SUMMARY

Wood-plastic composites are prepared of plastic material as a matrix and wood as a filler. The use of wood-plastic composites is increasing due to their good final properties. Wood embedded in a plastic matrix improves mechanical properties, while plastic in wood-plastic composites reduces swelling in water. Various wood and agricultural residues combined with the polymer matrix, providing a composite with good properties, help also in a waste treatment. Recently, there has been an increasing effort to achieve efficient recycling of waste polymers and other materials. Wood-plastic composites are one of the suitable ways to use polymer waste as well as various wood or cellulose residues. This paper analyzes various methods of preparation, properties and application of wood-plastic composites.

Key words

plastic

polymer composites

recycling

wood

wood-plastic composites

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO	3
2.1. POLIMERI	3
2.2. POLIMERNI KOMPOZITI	5
2.2.1. Drvno-plastični kompoziti	6
2.2.2. Polimerni materijali za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita	7
2.2.3. Drvni (celulozni) materijali za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita	9
2.2.4. Svojstva i primjena drvno-plastičnih kompozita	10
2.2.5. Procesi proizvodnje drvno-plastičnih kompozita	11
2.2.5.1. Ekstrudiranje	11
2.2.5.2. Injekcijsko prešanje	15
2.2.5.3. Kompresijsko prešanje	16
2.2.5.4. Lasersko sinteriranje	16
2.2.5.5. Pultruzija	17
3. METODIKA	18
4. REZULTATI I RASPRAVA	18
4.1. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA	18
4.2. PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA ZA VANJSKE KONSTRUKCIJE	19
4.3. PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA U AUTOMOBILSKOJ	
INDUSTRIJI	23
4.4. PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA ZA PROIZVODNJU PALETA	24
4.5. KARAKTERIZACIJA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA PROIZVEDENIH OD	
MJEŠAVINA RECIKLIRANE PLASTIKE	26
4.6. RECIKLIRANJE DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA	27
5. ZAKLJUČAK	28
6. LITERATURA	29
7. POPIS SIMBOLA	31
8. ŽIVOTOPIS	32

1. UVOD

Drvo je jedna od najvažnijih sirovina na Zemlji koja ima bitnu ulogu u svakodnevnom životu. U mnogim zemljama u razvoju, drvo je glavni izvor opskrbe gorivom što rezultira iscrpljivanjem šuma, tj. prirodnih bogatstava i narušavanjem ravnoteže u okolišu. Pretpostavlja se da će se, u nadolazećim godinama, brojni ljudi diljem svijeta suočiti s nedostatkom ogrjevnog drva zbog smanjenja šumskih površina. Glavni čimbenici koji potiču upotrebu drva njegova su dobra svojstva: niska gustoća, mehanička svojstva i netoksičnost. Međutim, niska vodootpornost veliki je nedostatak drva, a uzrokovana je prirodnom higroskopnošću. Kako bi se smanjila upotreba drva i potaknulo očuvanje šumskih prostora, 1990-ih su stvoreni drvo-plastični kompoziti (eng. *wood plastic composites*, *WPC*) koji kombiniraju plastične materijale i usitnjeno drvo pa predstavljaju novi tip materijala za razne primjene [1].

Tijekom procesa proizvodnje te nakon kraja životnog vijeka proizvoda, dolazi do odlaganja velikih količina otpada koje treba adekvatno zbrinuti, a ne odložiti u okoliš. I preradom drva dolazi do drvnog otpada koji je materijal pogodan za recikliranje. Jedan od načina oporavka drvnog otpada leži u mogućnosti njegovog kombiniranja s otpadnim plastičnim materijalima. Plastični materijali imaju široku primjenu u različitim područjima: kao ambalažni materijali, kao materijali u graditeljstvu, tekstilnoj industriji i medicini te se zato pojavljuju velike količine njihovog otpada. Najveći je nedostatak sintetskih plastičnih materijala spora biodegradacija pa se ne smiju odbacivati i odlagati u prirodu. Kao i drveni otpad, plastični otpad pogodan je za recikliranje. Proizvodnja drvo-plastičnih kompozita jedan je od načina recikliranja drvnog i plastičnog otpada [2].

Drvo-plastični kompoziti relativno su novi proizvodi u usporedbi s dugom poviješću prirodnog drva ili tradicionalnih proizvoda od drva kao što su iverica ili vlaknatica. Drvo-plastični kompoziti naširoko se koriste u brojnim razvijenim zemljama. Proizvode se miješanjem rastaljene reciklirane plastike i usitnjelog drva, većih ili manjih dimenzija, a često se primjenjuju čestice drva koje su sitne poput brašna [3].

Drvo-plastični kompoziti materijali su izrađeni od plastičnog materijala kao matrice i drva kao punila. Kao i drugi kompozitni materijali, sastavni su materijali sačuvani u svojim izvornim oblicima i kombiniraju se kako bi se dobio novi materijal s niskom cijenom i prikladnim mehaničkim i fizičkim svojstvima za različite primjene. Oblikuju se u daske ili grede koje se mogu koristiti u mnogim primjenama kao što su vanjske i unutrašnje podne obloge, ograde,

klupe u parku, vanjski i unutarnji namještaj (npr. stolice, nasloni sjedala u automobilima) te okviri za vrata i prozore. Većina plastičnih materijala niske cijene, kao što je polipropilen (PP), polietilen visoke gustoće (HDPE), polietilen niske gustoće (LDPE), poli(etilen-tereftalat) (PET) i polistiren (PS), materijali su niske čvrstoće. Zbog toga se ovim polimernim materijalima tijekom procesa proizvodnje, u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava, dodaju mineralna punila, npr. kalcijev karbonat. Međutim, porast cijene kalcijevog karbonata i ostalih punila motiviraju istraživače da pronađu ekološki prihvatljivu alternativu. Vlakna drva i različitih biljaka (pšenična, rižina ili lanena) predloženi su kao dobra alternativa anorganskim punilima. Drvo se smatra odličnim tipom vlakana zbog svoje specifične strukture i dobrih mehaničkih svojstava. Drvno-plastični kompoziti imaju mnoge prednosti u usporedbi s plastikom ojačanom mineralnim punilima jer imaju nisku cijenu, laku se oblikuju, a u konačnici imaju brojna prikladna svojstva za različite primjene [4].

Cilj ovog rada je upoznati se sa svojstvima, proizvodnjom i primjenom drvno-plastičnih kompozita.

2. OPĆI DIO

2.1. POLIMERI

Naziv polimer nastao je od dvije grčke riječi (poli i meros), a prvi ga je put upotrijebio Jakob Berzelius 1833. godine kao naziv za kemijske spojeve koji se razlikuju po veličini molekulske mase, a imaju jednaki sastav. Michael Faraday je 1829. godine utvrdio da se kao temeljni proizvod pirolitičke razgradnje prirodnog kaučuka (cis-1,4-poliizoprena) dobiva izopren koji je ujedno i njegov sastavni dio. Ta i druga istraživanja postavila su temelj za razvoj polimera. U današnje se vrijeme pod pojam polimer svrstavaju sve sintetski priređene i modificirane te prirodne makromolekule [5].

Njemački apotekar Eduard Simon je 1839. zagrijavanjem uljaste tekućine nastale destilacijom prirodnog balzama (storaks) dobio krutu masu. Time je provedena prva polimerizacija u laboratoriju. Na temelju toga je francuski kemičar Marcelin Berthelot 1866. godine polimerizacijom nazvao nastajanje veće asocirane molekule iz više manjih. Nadalje, kemičar Hermann Staudinger 1924. je uveo naziv i pojam makromolekula. Postavio je teoriju koja govori da su polimeri visokomolekulski spojevi koji nastaju povezivanjem više niskomolekulskih spojeva kovalentnim vezama. Nakon velikog broja uspješnih sinteza polimera, teorija o makromolekulskoj prirodi polimera sasvim je prihvaćena tek 1930. godine. Dvadeseto stoljeće mnogi su autori nazvali i „polimerno doba“, prvenstveno zato što je 1979. godine proizvodnja plastomera premašila proizvodnju čelika. Dvadeseto su stoljeće obilježili organski polimeri [5].

Polimeri se mogu podijeliti na nekoliko načina i skupina [5]:

1. Prema porijeklu

- Prirodni polimeri: kaučuk, biopolimeri, celuloza, škrob, vuna itd.

Prirodni polimeri upotrebljavaju se od postanka ljudskog roda, prvobitno za hranu, obuću i odjeću, ali i za ogrjev i konstrukcijske materijale. Biopolimeri su polimeri od kojih su izgrađena živa bića (bjelančevine, hormoni, polisaharidi, nukleinske kiseline).

- Sintetski polimeri

Sintetski su se polimeri počeli upotrebljavati i proizvoditi u drugoj polovici 19. stoljeća i to najprije u manjim količinama, a više nakon Prvog svjetskog rata. Sintetski polimeri dijele se:

- a) prema mehanizmu nastajanja: na stupnjevite i lančane
- b) prema vrsti ponavljajućih jedinica: na homopolimere i kopolimere

Homopolimeri su polimeri koji sadrže jednu vrstu ponavljajućih jedinica. Kopolimeri su polimeri koji sadrže dvije ili više vrsta ponavljajućih jedinica. Ovisno o udjelu monomera, kemijskoj prirodi te o njihovom rasporedu uzduž lanca makromolekula. Kada u reakciji sudjeluju tri monomera, govori se o terpolimerima.

- c) prema oblicima makromolekula: na linearne, razgranate i umrežene

Linearni polimeri imaju visok stupanj simetrije, sadrže manji broj bočnih grana. Razgranati se sastoje od temeljnog linearnog lanca i određenog broja bočnih lanaca koji su većinom nižeg stupnja polimerizacije. Umreženi polimeri nastaju međusobnim povezivanjem linearnih makromolekula kovalentnim vezama u prisustvu određenih tvari koje služe za umrežavanje.

2. Prema primjenskim svojstvima

- poliplasti (plastomeri i duromeri)
- elastomeri
- premazi
- veziva
- ljepila
- funkcionalni polimeri itd.

Polimeri su većinom organski, a sastoje se pretežno od ugljika, zatim od vodika, kisika i dušika, a rjeđe od anorganskih elemenata kao što su B, S, P, F i Cl pa, ovisno o njihovom udjelu, mogu biti poluorganski ili potpuno organski. Poluorganski polimeri sadrže anorganske elemente u temeljnom lancu ili bočnim skupinama. Anorganski su polimeri građeni od makromolekula koje sadrže anorganske temeljne lance i bočne skupine te ne sadrže ugljikove atome.

Polimeri se mogu dobiti na dva načina: procesima polimerizacije i modifikacijama prirodnih makromolekulskih tvari. Polimerizacija je kemijska reakcija u kojoj manje molekule, monomeri, međusobnim povezivanjem stvaraju veće molekule, polimere. Nazivi polimera dobivaju se na temelju sljedećeg: prema nazivima monomera, ponavljane konstrukcijske jedinice i njihovih struktura. Polimeri koji dobivaju naziv prema nazivu monomera, najčešće su polimeri dobiveni iz jednog monomera kao kod lančanih polimerizacija (npr. kada se od stirena dobiva polistiren), a tada se nazivu monomera dodaje prefiks poli. Kada se monomer

sastoji od dvije riječi, kao što je vinil-klorid, uz prefiks poli dodaju se zagrade pa je naziv polimera poli(vinil-klorid).

Za polimere koji nastaju stupnjevitom polimerizacijom iz dva reaktanta, nazivi polimera dobivaju se tako da se iza prefiksa poli u zagradi nabroje građevni dijelovi. Primjer je poli(etilen-tereftalat).

Kod naziva polimera na temelju ponavljanih konstrukcijskih jedinica, upotrebljavaju se trivijalna imena ili imena preporučena IUPAC-ovom komisijom za nomenklaturu makromolekula. Primjerice, prema IUPAC-ovoj nomenklaturi, polistiren je poli(1-feniletilen), a poli(etilen-tereftalat) je poli(oksietilenoksitereftaloil). Dakle, IUPAC-ova se nomenklatura temelji na nomenklaturi organskih spojeva.

Skupina s dvostrukim vezama najčešća je monomerna funkcionalna skupina i to u vinilnim spojevima, aldehidima i ketonima. Nakon funkcionalnih skupina s dvostrukim vezama, slijede funkcionalne reaktivne skupine. Te se skupine često nalaze na dvije vrste molekula monomera (karboksilne, amino ili hidroksilne skupine). Ciklički spojevi, koji se povezuju otvaranjem prstena i nastajanjem linearnih makromolekula, posebna su vrsta monomera.

Vrste polimera koji se danas najčešće proizvode su: polietilen, polipropilen, poli(vinil-klorid), polistiren i poli(etilen-tereftalat) [5].

2.2. POLIMERNI KOMPOZITI

Polimerni kompoziti dobivaju se kombiniranjem dvaju ili više materijala kako bi se dobio proizvod koji je kvalitetniji od sastavnih materijala i ima prošireno područje primjene u odnosu na njih. Sastoje se od polimerne matrice i potpornog materijala (punila, ojačala) koji može biti organski ili anorganski. Polimerni kompoziti teže stvaranju materijala koji je jači od čistog polimera. Međutim, iako na neki način postaje otporniji u odnosu na zasebne komponente, može imati i neke nedostatke. Osim visoke specifične otpornosti, neke od prednosti polimernih kompozita su niska specifična težina, visoka otpornost na koroziju te fleksibilnost i mogućnost lakog oblikovanja. Nedostaci koje mogu imati polimerni kompoziti su podložnost degradaciji i slabljenju svojstava na visokim temperaturama i ostalim uvjetima primjene. Svojstva polimernih kompozita razlikuju se ovisno o vrsti polimerne matrice i punila koji se koriste kao i o njihovim omjerima [6].

Polimerni kompoziti, zbog svoje fleksibilnosti i prilagodljivosti, imaju mnoge primjene, kao što su građevina, brodogradnja, zrakoplovstvo, sport itd. Primjerice, polimerni kompoziti ojačani vlaknima intenzivno se koriste u konstrukcijskim materijalima zrakoplova. Staklo-poliester kompoziti koriste se u industriji prijevoznih sredstava za izradu panela karoserije, okvira, unutrašnjih strukturnih komponenti i branika. Dominiraju u izgradnji izletničkih brodova zbog svoje male težine i otpornosti na koroziju. Ugljik-polimerni kompoziti koriste se za izradu opruga i pogonskih osovina. Ugljik-epoksidni kompoziti koriste se u trkaćim čamcima i automobilima. Najveći korisnik polimernih kompozita, nakon zrakoplovne industrije, industrija je sportske opreme. Dominiraju u izradi sportskih rekvizita zbog svoje izvanredne čvrstoće i krutosti. Neki od sportskih proizvoda koji uključuju polimerne kompozite su teniski reketi, okviri za bicikle, palice za golf, skije i štapovi za pecanje [7].

2.2.1. Drvno-plastični kompoziti

Drvo-plastični kompoziti izrađuju se miješanjem čestica drva s polimerima. Mehanička svojstva drvno-plastičnih kompozita prvenstveno ovise o sastavu njegove matrice (polimeri), punila (piljevina), sredstva za spajanje i maziva. Većinom je polimer matrice drvno-plastičnih kompozita napravljen od polimera kao što su HDPE, PS, PP, PET itd. [1].

Rano je uočeno da je u razvoju drvno-plastičnih kompozita važna adhezija između prirodnih čestica ili vlakana drva i polimerne matrice. Pri formiranju drvno-plastičnih kompozita, razlika u površinskoj energiji može dovesti do loše disperzije vlakana unutar matrice te relativno slabog međupovršinskog povezivanja između dvije faze kompozita. Drvo i lignocelulozni materijali imaju relativno veliku gustoću hidroksilnih skupina na svojoj površini zbog celuloze i hemiceluloze dok je često upotrebljavani polimer polietilen linearni alkan vrlo velike molekulske mase koji sadrži samo ponavljajuće CH_2 jedinice. Iako je slobodna površinska energija drva ($40\text{--}60 \text{ mJ/m}^2$) znatno veća od površinske energije polietilena (31 mJ/m^2) i polipropilena (32 mJ/m^2), malo doprinosi površinskoj energiji drvno-plastičnih kompozita ($31,5 \text{ mJ/m}^2$). Određeni spojevi, kao što je stearinska kiselina, upotrebljavaju se kako bi se prevladali problemi povezivanja komponenti drvno-plastičnih kompozita [8].

U tipičnom procesu proizvodnje drvno-plastičnih kompozita, polimerni materijal i drvena vlakna ili čestice za ojačanje miješaju se i oblikuju pod pritiskom i toplinom da bi se proizveo novi materijal. Polimerni se materijal koristi kao matrica koja okružuje vlakna te prenosi

primijenjeno opterećenje na njih. Vlakna za ojačanje odgovorna su za poboljšanje mehaničkih svojstava kompozita kao što su vlačna čvrstoća i žilavost [4].

Drvno-plastični kompoziti dobivaju se na način da se usitnjeni celulozni materijal iz samog drva ili poljoprivrednih ostataka različitih dimenzija (vlakna, strugotine, piljevina ili brašno, tj. prah), miješa s rastaljenim polimernim materijalima poput polietilena ili polipropilena unutar ekstrudera ili različitih tipova miješalica. Dobiveni materijal može se granulirati za kasnije oblikovanje proizvoda koje će se provoditi injekcijskim prešanjem, ekstruzijom ili kompresijskim prešanjem. Dobiveni materijal može se tako oblikovati u jednostavne dijelove kao što su daske ili u složenije profile za specifičnu upotrebu [8].

2.2.2. Polimerni materijali za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita

Plastični materijali, koji se koriste za izradu drvno-plastičnih kompozita, mogu se svrstati u dvije glavne kategorije: termoplastika i duroplasti. Temperatura prerade polimernih materijala ne bi smjela prijeći 200 °C kako bi se drvena vlakna zaštitila od degradacije celuloznih lanaca.

U proizvodnji drvno-plastičnih kompozita na bazi duroplasta, proizvode se gotovi dijelovi koji se nakon toga ne mogu taljenjem preoblikovati. Najčešće korišteni duroplasti su epoksidi, aminosmole i fenolne smole te poliuretani.

Za razliku od duroplasta, termoplasti se mogu preoblikovati ponovnim taljenjem. Polimerni materijali koji se najčešće koriste u proizvodnji drvno-plastičnih kompozita su HDPE, LDPE, PP, PVC i PS [4]. Polietilen, PE je vrsta termoplastičnog polimera koji se tali od 110 do 130 °C s gustoćom od 0,91 do 0,96 g/cm³. Komercijalno se proizvodi polimerizacijom etilena. PE se dijeli na više vrsta od kojih se za ove primjene najčešće koriste polietilen niske gustoće (LDPE), polietilen srednje gustoće (MDPE) i polietilen visoke gustoće (HDPE). Istraživanje Taiba i suradnika iz 2010. pokazalo je da dodatak ultraljubičastog (UV) stabilizatora može ograničiti i minimizirati negativan učinak prirodnog trošenja, pod utjecajem UV zračenja, na drvno-plastične kompozite na bazi HDPE-a. Osim drvno-plastičnih kompozita, HDPE se koristi za dobivanje i drugih vrsta kompozita. U istraživanju Maadeeda i suradnika, iz 2013., koje se odnosi na kompozite sa staklenim vlaknima, otkriveno je da kristalna domena HDPE-a može povećati vlačnu čvrstoću materijala i smanjiti izvlačenja vlakana nakon dodavanja staklenih vlakana [9]. HDPE ima visok omjer čvrstoće i gustoće i visoku specifičnu čvrstoću te je tvrdi od LDPE-a. Zbog svoje niske točke taljenja, LDPE se koristi za toplinsko zavarivanje

te se još koristi u kabelskim i žičanim aplikacijama zbog dobrih električnih karakteristika [4]. Polietilen ima i dobru kemijsku otpornost na brojne vrste kemikalija.

PP ima slična svojstva kao PE, ali ima veću otpornost na toplinu i nešto bolja mehanička svojstva [4]. Prednost PP-a je što posjeduje veću krutost od HDPE-a [9]. PP se zbog svoje visoke točke taljenja koristi za pakiranja koja su izložena višim temperaturama. Također se koristi za pakiranje hrane i lijekova te za izradu vanjskih kućišta dijelova za vozila (npr. akumulatora) [4].

Za razliku od HDPE-a i PP-a, PVC je kompatibilniji s drvnim vlaknima [9]. PVC ima dobru kemijsku otpornost i stabilnost te dobra električna svojstva. Puno se koristi u izradi cijevi [4]. PVC sadrži klor koji djeluje kao usporivač gorenja u plastici zbog čega je zapaljivost drvo-plastičnih kompozita na bazi PVC-a znatno manja u usporedbi sa zapaljivošću drvo-plastičnih kompozita na bazi HDPE-a ili PP-a [9]. Međutim, PVC je tijekom upotrebe pri visokim temperaturama podložan degradaciji [4, 9].

Dobra svojstva PS-a, kao što su niska gustoća, visoka krutost i svojstvo toplinske izolacije, čine ga dobrim izborom kod pakiranja hrane i lijekova [4]. Komercijalni proizvodi od drvo-plastičnih kompozita, temeljeni na LDPE-u, HDPE-u i PS-u, našli su svoje mjesto na europskom tržištu, no proizvodi na bazi PS-a nešto su slabije prihvaćeni [8].

Razvoj prerade omogućio je upotrebu dodatnih polimernih materijala u izradi drvo-plastičnih kompozita, primjerice poliamida 6 i 12 (Nylon 6 i 12) ili polimetilmetakrilat, PMMA. Oni imaju zahtjevnija toplinska svojstva za miješanje u talini, tj. treba se paziti da se vrijeme zadržavanja unutar ekstrudera ili stroja za brizganje svede na minimum. Mješavine do 60 % drvnog brašna u poliamidu 12 pokazale su povećano savijanje i vlačnu čvrstoću [8].

Kopolimeri stiren anhidrida maleinske kiseline (SMA) koriste se u automobilskoj industriji za unutarnje dijelove. Dodavanje drvenih vlakna u SMA povećava mogućnost recikliranja i mehanička svojstva. Simonsen i sur. otkrili su da punila za drvo poboljšavaju krutost i čvrstoću SMA dok smanjuju udarnu čvrstoću i temperaturu staklastog prijelaza. Ostala istraživanja zaključila su da SMA kompoziti proizvedeni procesom ekstruzije smanjuju gustoću do 30 % i povećavaju čvrstoću na savijanje i krutost na razinu veću od poliamida 66 [10].

2.2.3. Drvni (celulozni) materijali za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita

Drvno-plastični kompoziti mogu se pripremiti korištenjem različitih dimenzija celuloznih komponenti (od drvnog brašna do vlakana) iz mnogih vrsta drveća i biljaka te ostalih celuloznih materijala. U mnogo slučajeva, proizvođači drvno-plastičnih kompozita odabiru materijal koji je relativno obilan i pouzdano dostupan na njihovom geografskom području. Često je to popratni proizvod neke drvne industrije, kao što su strugotine ili piljevina, koji se može samljeti i prosijati kako bi se odabrala veličina čestica i ujednačenost koju zahtijeva proizvođač.

Neki proizvođači daju veliku prednost prahu određene vrste tvrdog drva, poput bukve, gdje su ekstrakti i smole na nižim razinama od mekog drva što smanjuje probleme u miješanju. U drugim regijama, bambus je dostupan materijal i drvno-plastični kompoziti temeljeni na bambusu pokazali su da bambusovo brašno daje kompozitu slična vlačna svojstva kao kompoziti od uobičajenog drvnog brašna.

Mnoga istraživanja drvno-plastičnih kompozita pokazala su da poljoprivredni ostaci povezani s polimernom matricom daju dobar proizvod te pomažu u zbrinjavanju otpada. Neki od primjera su: pšenična slama, koštice maslina, ljuske kokosa i lješnjaka, rižine ljuske itd.

Istraživanja optimalne veličine drvnog brašna pokazala su da su manje veličine čestica uglavnom bolje za postizanje prikladnih svojstava kompozita. Kad su prosijani dijelovi bambusovog brašna korišteni za izradu PP kompozita, pokazalo se da brašno ispod 500 μm pridonosi boljim mehaničkim svojstvima kompozita od veličina 500–850 ili 850–1000 i 1000–2000 μm . Međutim, slabo tečenje i poteškoće kod dispergiranja u talini problemi su koji se javljaju s upotrebom vrlo sitnih čestica i [8].

Drvna vlakna obično sadrže celulozu, hemicelulozu, lignin i popratne tvari (akcesorske sastojke). Stvarni sastav celuloznih materijala razlikuje se od vrste do vrste. Celuloza čini od 40 do 50 % drvnih vlakana.

Čimbenici koji su doprinijeli povećanju interesa za drvna vlakna su ekonomična proizvodnja, mala specifična težina, čvrstoća i krutost. Nadalje, drvna vlakna nisu abrazivna za opremu za oblikovanje i miješanje pa time smanjuju troškove proizvodnje. Najvažniji aspekt drvnih vlakana je to što su ekološki prihvatljiva. Drvna vlakna vrsta su obnovljivih materijala s malom proizvodnom energijom. Obrada drva i proizvodnja drvnih vlakana odvija se dobro razvijenim tehnologijama. Osim toga, drvna vlakna posjeduju visoku električnu otpornost, dobra toplinska i akustična izolacijska svojstva i dostupnost u cijelom svijetu.

Neki nedostaci koji uvelike smanjuju potencijal korištenja drvnih vlakana su: niska toplinska stabilnost, sklonost stvaranju agregata tijekom obrade, sezonske varijacije kvalitete i niska otpornost na vodu. Visoko upijanje vode drvnih vlakana dovodi do bubrenja što dovodi do niskih mehaničkih svojstava i smanjuje dimenzijsku stabilnost drvno-plastičnih kompozita. Jedan od glavnih nedostataka drvnih vlakana loša je kompatibilnost između vlakana i polimernog materijala što rezultira nehomogenom disperzijom vlakana unutar matrice. Većina polimera, osobito termoplasta, nepolarni su (hidrofobni) materijali koji nisu kompatibilni s polarnim (hidrofilnim) drvom što može rezultirati lošom adhezijom polimernog materijala i vlakana u kompozitu. Temperatura obrade još je jedan problem. Naime, toplinska razgradnja vlakana drva dovodi do promjene organoleptičkih svojstava drva i pogoršanja mehaničkih svojstva. Toplinska degradacija drva rezultira i stvaranjem plinovitih proizvoda kada se koriste temperature iznad 200 °C što može uzrokovati nisku gustoću, visoku poroznost i niska mehanička svojstva kompozita. Prednost je što drvena vlakna, koja se koriste u drvno-plastičnim kompozitima, mogu imati veliku raznolikost veličina, oblika i karakteristika pa, u kombinaciji s polimernim materijalima, omogućuju kreiranje brojnih proizvoda različitog izgleda, namjena i svojstava.

Drvno brašno i drvena vlakna nusproizvodi su ili otpadni proizvodi drvnog materijala. Drvno brašno mnogo je šire dostupno nego drvena vlakna. Osim toga, uglavnom je niže cijene, puno ga je lakše obraditi od drvnih vlakana i bolje se miješa u talini s polimernim materijalom. Drvno brašno dostupno je u mnogim veličinama, od 20 (grubo) do 400 (ekstra fino). Za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita, prema kriteriju cijene, učinka i lakoće obrade, obično se odabire drvno brašno veličine sita 40 [9].

2.2.4. Svojstva i primjena drvno-plastičnih kompozita

Drvno-plastični kompoziti ujedinjuju svojstva plastike i drva. Općenito, ugradnja drva u plastičnu matricu poboljšava mehanička svojstva u usporedbi s plastičnim materijalom. Nasuprot tome, plastika u kombinaciji s drvom smanjuje bubrenje u vodi u usporedbi s čistim drvom.

Primjena drvno-plastičnih kompozita za podove, vanjske objekte, okvire prozora i općenito za građevinske materijale, pri čemu dolazi do izražaja njihova izloženost atmosferi ili kontaktu s vodenim medijima, učinila je istraživanje fizičkih svojstava (gustoća, bubrenje, utezanje) ovih materijala neophodnim. Fizička svojstva općenito su povezana sa strukturom materijala tako

da se mjerenje promjena fizičkih svojstava može koristiti za procjenu strukturnih promjena materijala.

Toplinsko ponašanje i stabilnost vrlo su važni parametri za obradu i upotrebu drvno-plastičnih kompozita. Proizvodnja ovakvih kompozita zahtijeva miješanje drvnih vlakana i polimerne matrice na povišenoj temperaturi tako da može doći do razgradnje celuloznog materijala što može izazvati neželjene učinke na svojstva drvno-plastičnih kompozita. Tehnike koje se najčešće koriste za toplinsku analizu su termogravimetrijska analiza (TGA) i diferencijalna pretražna kalorimetrija (DSC) [9].

Glavni utjecaj drvnog brašna u drvno-plastičnim kompozitima je poboljšanje krutosti u savijanju i napetosti. Dok je poboljšanje snage savijanja većinom uspješno, poboljšanje vlačne čvrstoće nije zajamčeno. Vlačna svojstva većine materijala dobivenih iz drvno-plastičnih kompozita ostaju niska u odnosu na drvo ili druge građevinske proizvode te se zato proizvod ne koristi u primjenama gdje je vlačna snaga ograničavajući faktor.

Aspekti lakog održavanja proizvoda dobivenih iz drvno-plastičnih kompozita čine ih privlačnima za upotrebu. Primjerice, nedostatak stvaranja iverja i jednostavnost čišćenja dovode do širokog prihvatanja ovih proizvoda [8].

Drvno-plastični kompoziti koriste se za izradu daski za podove i ograde, za obloge u građevinarstvu, lijevane plohe u automobilskoj industriji, dijelove okvira u industriji namještaja, brizgane dijelove u elektroindustriji, razne dijelove za igračke i glazbene instrumente itd. [10].

2.2.5. Procesi proizvodnje drvno-plastičnih kompozita

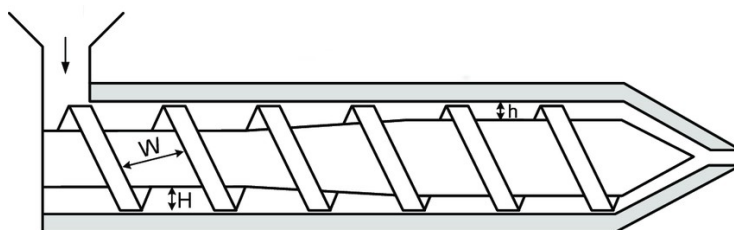
Primarni procesi proizvodnje drvno-plastičnih kompozita su ekstruzija, injekcijsko prešanje i kompresijsko prešanje. Noviji procesi proizvodnje drvno-plastičnih kompozita uključuju dodatnu proizvodnju putem modeliranja slijepljenih slojeva i lasersko sinteriranje [10].

2.2.5.1. Ekstrudiranje

Ekstruder je najvažniji uređaj za pripremu drvno-plastičnih kompozita, a njegova je namjena taljenje polimernog materijala i miješanje rastaljenog polimernog materijala s drvnim punilom i aditivima [10]. Ekstruderi koji se najčešće koriste su: ekstruder s jednim pužnim vijkom i

ekstruder s dva pužna vijka (korotirajući ili suprotno rotirajući), *co-kneader* ekstruder i *Woodtruder* [4, 10].

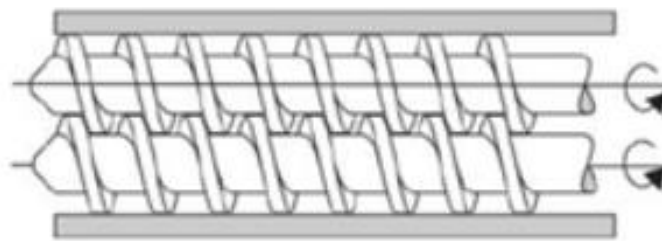
Ekstruder s jednim pužnim vijkom (Slika 1.) ima najjednostavniji dizajn među ostalim ekstruderima i obično ima omjer duljine cijevi i promjera 34:1. Obrada polimera unutar ove vrste ekstrudera prolazi kroz dvije glavne faze: taljenje i miješanje. Ekstruder je opremljen ventilacijskom jedinicom za uklanjanje hlapljivih tvari. Materijali se unose u ekstruder preko gravitacijskog lijevka. Materijali se tale i miješaju pomoću smicanja uzrokovanog kretanjem vijka unutar cijevi. Na kraju se dobiveni materijal suši pomoću ugrađenih dijelova za sušenje. Jednostavan dizajn i niski fiksni i operativni troškovi glavne su prednosti ove vrste ekstrudera u odnosu na druge ekstrudere. Međutim, ima i mnogo nedostataka kao što su: niska stopa proizvodnje, izloženost drvnih vlakana degradaciji tijekom taljenja, a i održavanje temperature taline može biti problem, posebno pri visokim tlakovima [4].



Slika 1. Ekstruder s jednim pužnim vijkom [11]

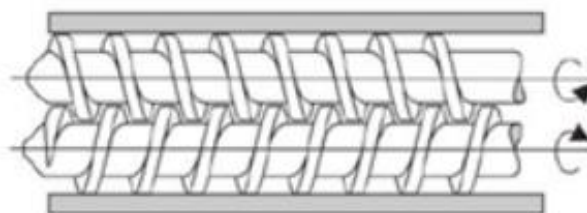
Dvopužni ekstruderi imaju dva vijka. Korotirajući dvostruki vijak (Slika 2.) u kombinaciji s jednostrukim vijkom s vrućim taljenjem može se koristiti za proizvodnju profila drvo-plastičnih kompozita. Materijal za ovaj sustav je drveno brašno ili vlakna (pri sadržaju vlage u okolini od 5 do 8 %), a polimer i aditivi mogu biti u svom prirodnom stanju. Komponente se ne trebaju prethodno miješati. Poželjni sustavi dodavanja materijala su gravimetrijski dodavači i bočne hranilice s dva vijka. Mehanizam za taljenje/miješanje uključuje potrebnu temperaturu, brzinu vijka i tlak za miješanje vijkom. Uklanjanje vlage postiže se korištenjem atmosferskih i vakuumskih otvora. Prednosti ovog sustava uključuju sposobnost obrade drva pri sadržaju vlage u okolini jer se ekstruder koristi za sušenje vlakana te dobro miješanje vlakana s polimernim materijalom. Neki od nedostataka su: potreba za sustavima za periferno hranjenje, velika brzina puža i nedostatak hlađenja vijka, nemogućnost održavanja niske temperature

taline s većim pritiskom [10]. Hosseinaei i sur. su 2012. godine korotirajući dvostruki vijak koristili za proizvodnju drvno-plastičnih kompozitnih uzoraka sastavljenih od PP-a kao matrice i drvenog brašna kao punila [12]. Za izradu uzoraka, koristio se pneumatski stroj za injekcijsko prešanje pri temperaturi obrade od 135 °C. Vijak se okretao brzinom od 30 okretaja u minuti, a temperatura cijevi kretala se od 180 do 195 °C. Polipropilen cijepljen anhidridom maleinske kiseline koristio se kao kompatibilizator. Proizvedeni uzorci hlađeni su u vodenoj kupelji, a potom su sušeni u pećnici 12 h na 103 ± 2 °C [4].



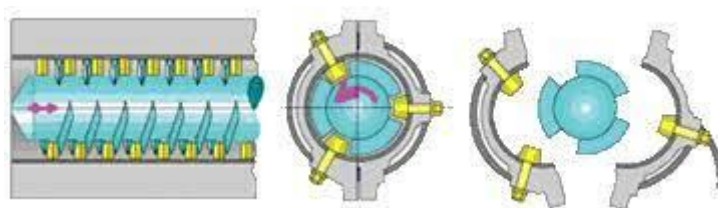
Slika 2. Korotirajući ekstruder s dva pužna vijka [13]

Suprotno rotirajući dvostruki ekstruderi (Slika 3.) koriste se kod polimera koji su osjetljivi na toplinu poput krutog poli(vinil-klorida), za niskotemperaturnu ekstruziju za vlakna i pjene, kod materijala koji se teško dodaju i kod materijala koji zahtijevaju otplinjavanje. Suprotno rotirajući dvostruki vijak može imati paralelne ili konusne konfiguracije vijaka. Koriste se vlakna i polimeri iste veličine čestica (od 250 do 400 μm). Materijal se priprema tako da se prvo vlakana suše, a nakon toga se intenzivno miješaju s polimerom i dodacima. Za taljenje/miješanje, koristi se povišena temperatura i miješanje pomoću vijaka. Vлага se uklanja kroz vakuum odzračivanje. Prednosti ovih ekstrudera su: niska brzina vijaka (revolutions per minute, rpm) i miješanje s malim smicanjem. Potreba za sustavom sušenja, sustavom za smanjenje veličine unesenih materijala, sustavom prethodnog miješanja te mogućnost utjecaja transporta materijala na omjere mješavine neki su od nedostataka ovog ekstrudera [10].



Slika 3. Suprotno rotirajući ekstruder s dva pužna vijka [11]

Co-kneader ekstruder (Slika 4.) modificirana je verzija ekstrudera s jednim pužnim vijkom na čiju su cijev učvršćene igle. Igle brišu cijelu površinu vijka ekstrudera što ga čini samočišćećim ekstruderom. Time se značajno smanjuje vrijeme zadržavanja što je glavni problem kod ekstrudiranja toplinski osjetljivih polimera. Osim za čišćenje, igle se koriste i za ometanje protoka polimera što povećava ukupnu brzinu taljenja i smanjuje temperatura materijala. Glavne prednosti co-kneader ekstrudera su: niža potrošnja energije, niža temperatura taline, vrhunska homogenost miješanja, očuvanje strukture vlakana i visoka stopa proizvodnje [4].



Slika 4. Co-kneader ekstruder [14]

Woodtruder™ uključuje paralelni 28:1 L/D rotirajući dvostruki ekstruder i ekstruder s jednim pužnim vijkom od 75 mm, miješalicu, kompjuterizirani sustav za kontrolu miješalice, sustav alata za kalupe, spremnik za hlađenje raspršivačem s pogonskim valjcima, pokretnu pilu za rezanje i stol za otjecanje. Kako obrada počinje, drveno brašno s okolnim sadržajem vlage stavlja se u hranilicu za vlakna i suši unutar dvostrukog vijka. U međuvremenu, odvojeno od vlakna, tali se plastika. Mehanizam taljenja/miješanja uključuje grijanje i miješanje pomoću vijka. Odvajanjem unosa drva i taljenja plastike osigurava se da vlakna neće biti degradirana (spaljena) tijekom taljenja plastike i da će rastaljena plastika potpuno obaviti vlakna. Ovi se materijali zatim miješaju, a sva preostala vlaga ili hlapljive tvari uklanjaju se vakuumskim odzračivanjem. Prednosti ovoga sustava su: brašno i dodaci u svom su prirodnom stanju i nije potrebna posebna priprema materijala, odvojeni proces taljenja polimera, dobro miješanje polimernog materijala i vlakana, hlađenje vijka, mogućnost održavanja niske temperature taline s visokim pritiskom, vrhunska ventilacija, odvojena oprema za prethodno miješanje, vrlo fleksibilna integrirana kontrola procesa, učinkovit sustav za dopremanje materijala. Neki od nedostataka ovog ekstrudera su: manji protok proizvoda, veći troškovi te korištenje glavnog ekstrudera kao sušionika što nije najučinkovitiji način prerade suhog drvenog brašna [10].

2.2.5.2. Injekcijsko prešanje

Injekcijsko prešanje drvno-plastičnih kompozita koristi se za proizvodnju dijelova kojima ne treba završni korak i koji sadrže složene geometrije [10]. Granule nastale ekstrudiranjem relativno se lako prerađuju injekcijskim prešanjem kako bi se napravili proizvodi kao što su posude za biljke (Slika 5.) i slično. Granule se rastale, a zatim se ubrizgavaju u jednostavan kalup na nižoj temperaturi, gdje se brzo hlade do čvrstog stanja. Zatim se kalup otvara i proizvod se uklanja prije ponavljanja postupka. Ograničavajući faktori su debljina stijenke lijevane komponente i indeks tečenja taline (eng. *melt flow indeks, MFI*) mješavine. Osim toga, svi oštri kutevi, zakrivljenost u dizajnu ili detalji koji skreću protok polimera mogu predstavljati izazov. Nadalje, neki brizgani predmeti mogu zahtijevati relativno tanku stijenku, npr. ako je proizvod dizajniran da bude lagan ili zbog tradicionalnog oblika proizvoda [8].



Slika 5. Posude za cvijeće s bambusovim vlaknima kao punilom [8]

Najveći dio postupaka injekcijskog prešanja za drvno-plastične kompozite koristi dobro razdvojena ili nasjeckana prirodna vlakna. Nova-Institut objavio je katalog injekcijskog prešanja NFC (eng. *natural fibre composite*) kuglica unutar projekta *n-fibrebase* koje su korištene u širokom rasponu proizvoda i oblika: neki su bili za automobilsku primjenu (npr. rešetke zvučnika i ploče) dok su drugi bili korišteni za robu široke potrošnje (npr. kutija za CD). Za injekcijsko prešanje, najčešće se koristi polipropilen s malim dijelom polietilena i 6 % biopolimera [8].

2.2.5.3. Kompresijsko prešanje

Kompresijsko prešanje metoda je prešanja u kojoj se prethodno zagrijani polimer i celulozni materijal oblikuju u zagrijanoj šupljini kalupa. Gornji čep i pritisak potiskuju materijale da dođu u kontakt sa svim područjima kalupa. Tijekom cijelog procesa, pritisak i toplina održavaju se sve dok polimer ne postigne stanje stvrdnjavanja. Kompresijsko prešanje istraživano je dugi niz godina u proizvodnji automobilskih kompozitnih dijelova. Korak miješanja može se eliminirati pa je moguće miješanje i oblikovanje u jednom koraku u procesu kompresijskog prešanja. Time se smanjuje duljina vlakana i vrijeme kompresije vlakana na povišenim temperaturama. Ovom metodom, celulozna se vlakna ravnomjerno raspoređuju između polimernih filmova, a zatim se prešanjem u kalupu za kompresiju, tijekom predviđenog vremena i pri potrebnoj temperaturi, stvaraju drvno-plastični kompoziti. Česti problem koji se javlja kod kompresijskog prešanja je preorijentacija vlakana tijekom obrade. Konačna orijentacija vlakna utječe na svojstva čvrstoće pa je potrebno poznavati mehanizam preorijentacije. Formiranje površinskih šupljina još je uvijek veliki nedostatak, posebno u automobilske industriji. Pravilno dizajnirani kalup može osigurati veće jednosmjerno poravnanje izbjegavajući stvaranje šupljina [9].

2.2.5.4. Lasersko sinteriranje

Selektivno lasersko sinteriranje metoda je koja proizvodi drvno-plastične kompozitne proizvode koji imaju složenu geometriju. Zhang i sur. (2020.) koristili su selektivno lasersko sinteriranje za izradu drvno-plastičnih kompozita PES (poli(eter-sulfon)) / prah borovog drva. Proces sinteriranja odvijao se pri sljedećim parametrima: debljina sloja 0,1 mm, temperatura predgrijavanja 83 °C, unutarnja snaga 13 W. Kako bi se poboljšala mehanička i fizikalna svojstva drvno-plastičnog kompozita, proizvedenog ovom metodom, ugljikova nanocijev koristila se kao pojačanje. Zatim su proizvedene drvno-plastične komponente naknadno tretirane u mikrovalnoj pećnici snage 385 W i frekvencije 2,45 GHz. Optimalno vrijeme tretmana, koje proizvodi najveću čvrstoću savijanja proizvedenih uzoraka, bilo je 10 s uz čvrstoću savijanja koja je dosegla vrijednost od 15,7 MPa [4].

2.2.5.5. Pultruzija

Pultruzija je metoda dobivanja drvno-plastičnih kompozita koja je manje istražena u odnosu na ostale metode. Drvno-plastični kompozitni profil proizvodi se povlačenjem materijala kroz stacionarnu matricu. Proces se sastoji od ulaznog i završnog dijela koji su suženi na veličinu konačne dimenzije profila. Sirovina ulazi u dio s konstantnom geometrijom, gdje se polimer tali. Pomiješani materijali zatim prolaze kroz odjeljak za hlađenje gdje se termoplastični polimer stvrdnjava. Glavni zahtjev procesa pultruzije je da pomiješani materijal za izradu kompozita može teći kroz matricu uređaja [9].

Pultruzija se koristi za rad s dugim vlaknima, za oblikovanje tankih kompozita s orijentacijom vlakana u jednom smjeru. Takvi kompoziti, zbog svojih mehaničkih svojstava, imaju različite primjene u automobilskom sektoru jer zahtijevaju visoku krutost ili otpornost na vlačna opterećenja. Ova je tehnika pokazala određeni potencijal s dugim prirodnim vlaknima. Istraživanja s lanenim vlaknima u PP matrici pokazala su postizanje veće čvrstoće na savijanje i veći modul od sustava PP/lan dobivenog ekstrudiranjem ili injekcijskim prešanjem [8].

3. METODIKA

Ovaj rad obuhvaća pregled znanstvenih istraživanja o pripremi, svojstvima i primjeni drvno-plastičnih kompozita. U radu se analiziraju različiti načini ispitivanja svojstava drvno-plastičnih kompozita kao i njihova primjena u raznim područjima.

4. REZULTATI I RASPRAVA

Većina fizičkih i mehaničkih svojstava drvno-plastičnih kompozita ovisi o interakciji drva i polimernog materijala. Jedan način poboljšanja te interakcije uključuje sredstvo za kompatibilizaciju. Općenito, određeni aditivi pomažu kompatibilnosti između hidrofilnog drva i hidrofobnog polimernog materijala omogućujući stvaranje kvalitetnog kompozita ujednačenih svojstava. Drvno-plastični kompoziti pokazuju sklonost degradaciji kada su izloženi UV svjetlu pa njihova prirodna ili pigmentirana boja može izblijediti. Stoga je, ovisno o konačnoj primjeni, potrebno dodati UV stabilizatore za stabilizaciju svojstava drvno-plastičnih kompozita [15].

4.1. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA

Zbog održanja stabilnosti drva u drvno-plastičnim kompozitima, temperatura za pripremu ovih kompozita ne smije biti previsoka. Zbog toga se koriste termoplasti s nižom temperaturom taljenja kao što su PP, PE, PVC i PS. Kao sredstvo za ojačanje u drvno-plastičnim kompozitima, koristi se obrađeno drvo, često bor, hrast ili javor. Dodavanjem određene količine sredstva za kompatibilizaciju, poboljšavaju se svojstva drvno-plastičnih kompozita. Ako je udio sredstva za kompatibilizaciju premalen, može doći do povećanja bubrenja i smanjenja mehaničkih svojstava drvno-plastičnih kompozita.

U istraživanju Bhaskara i suradnika (2020.), ispitivala su se svojstva drvno-plastičnih kompozita [1]. Kompoziti su izrađeni metodom kompresijskog prešanja, kao punilo koristilo se borovo drvo brašno, a kao polimerna matrica koristili su se PP (80 %) i HDPE (20 %). Maleinski anhidrid koristio se kao sredstvo za kompatibilizaciju, a cinkov stearat kao lubrikant. Drvo i polimerni materijal koristili su se u različitim postocima. Piljevina se sušila na 103 °C kako bi se uklonio sadržaj vlage. Nakon toga su se sastojci pomiješali, a temperatura je

podignuta na 180 °C. Na kalup je primijenjen tlak od 20 bara u trajanju od 400 s, a nakon toga se tlak povećao na 60 bara i ostavio djelovati 120 s te se zatim povećao na 100 bara i djelovao je 30 s. Na kraju je kompozit ostavljen da se ohladi na sobnu temperaturu. Provedeni su testovi ispitivanja gustoće, apsorpcije vode i mehaničkih svojstava (vlačne čvrstoće, tvrdoće i udara). Ispitivanjima je utvrđeno da je gustoća drvno-plastičnih kompozita veća ako je udio drva veći. Apsorpcija vode smanjuje se u odnosu na apsorpciju vode čistog drva. Pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije, vidljive su nepravilnosti za kompozite s 30 % drva. Za razliku od navedenog uzorka, kod uzorka s 40 % drva nije došlo do stvaranja pukotina i šupljina i komponente su bile dobro povezane. Vlačna čvrstoća ovakvih kompozita niža je u usporedbi s drvno-plastičnim kompozitima izrađenim od jednog polimernog materijala što pokazuje da upotreba mješavine polimernih materijala ima negativan učinak na vlačnu čvrstoću. Tvrdoća kompozita povećava se s povećanjem udjela drvnih čestica. Povećanjem udjela drva povećava se smična čvrstoća materijala. Dakle, količina drva u kompozitu izravno je proporcionalna smičnoj čvrstoći [1].

4.2. PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA ZA VANJSKE KONSTRUKCIJE

Drvno-plastični kompoziti predstavljaju koristan materijal za primjenu u različitim djelatnostima i dijelovima svijeta jer mogu koristiti otpadno drvo i plastiku što predstavlja postupak recikliranja i ponovnog korištenja ovih materijala. Nakon isteka životnog vijeka, neki drvno-plastični kompoziti mogu se i sami reciklirati.

Binhussain i El-Tonsy ispitivali su 2013. godine svojstva drvno-plastičnih kompozita izrađenih od otpadaka palminog lišća. Otpaci palminog lišća korišteni su kao alternativa prirodnom drvu. Cilj ovog istraživanja bio je proizvodnja ekološki prihvatljivog umjetnog drva recikliranjem miješane plastike iz krutog komunalnog otpada i otpada od palminog lišća s poljoprivrednih gospodarstava. Za dobivene uzorke WPC-a, određena su neka mehanička i fizikalna svojstva, kao što su: gustoća, apsorpcija vode, tvrdoća, modul elastičnosti (zatezanje i savijanje), udarna čvrstoća i linearna brzina gorenja te su rezultati uspoređeni s prirodnim tvrdim, mekim drvom i drvom od vlaknastih ploča srednje gustoće (eng. *medium density fiberboard*, *MDF*). Dobiveni drvno-plastični kompoziti pokazali su manju apsorpciju vode, linearno gorenje i tvrdoću, veću gustoću od prirodnog i MDF drva i mogu se koristiti u vanjskim konstrukcijama.

Razvijene su tri kombinacije WPC-a: PC-mix, PS-mix i PVC-mix. Listovi palme i plastični otpad reciklirani su za proizvodnju WPC-a s karakteristikama sličnim komercijalnom drvu, a konačni su materijali bili inovativni, čisti i niske cijene. Mehanička i fizikalna svojstva dokazala su prihvatljive konačne i obećavajuće WPC proizvode. Utvrđeno je da PS-mix kompoziti imali manju gustoću u usporedbi s PC-mix i PVC-mix kompozitima. Gustoća razvijenog umjetnog drva bila je očekivana budući da ulazne komponente mješavine imaju veliku gustoću i proces prešanja odvijao se pod visokim tlakom. Zbog visoke gustoće, primjena dobivenih drvno-plastičnih kompozita je ograničena. Međutim, njihova fizikalna i mehanička svojstva mogu biti korisna i preporučuju se za specifične primjene, poput vrata i podova.

Prosječna tvrdoća PC-mixa, PVC-mixa i PS-mixa bila je manja od prirodnog drva i MDF-a. PVC-mix i PS-mix materijali pokazali su veću čvrstoću i modul (i kod savijanja i pri rastezanju) i manju prekidnu deformaciju nego PC-mix. Visoka duktilnost mješavine PC-a, u usporedbi s onom mješavine PVC-a i mješavine PS-a, mogla je utjecati na visoku otpornost na udarce. Brzina linearnog gorenja bila je najveća za prirodno drvo i MDF. Prosječna vrijednost brzine linearnog gorenja dobivenih kompozita bila je 8.3 mm/min što pokazuje da promjena tipa polimera ne utječe na brzinu linearnog gorenja. Početna temperatura termogravimetrijske analize (TGA) bila je oko 340 °C.

Iz dobivenih je rezultata zaključeno da recikliranje plastike štedi mnogo energije te smanjuje utjecaj na okoliš. S druge strane, korištenje otpada od palminog lišća pridonosi očuvanju šumskih resursa i osigurava zeleniji okoliš [16].

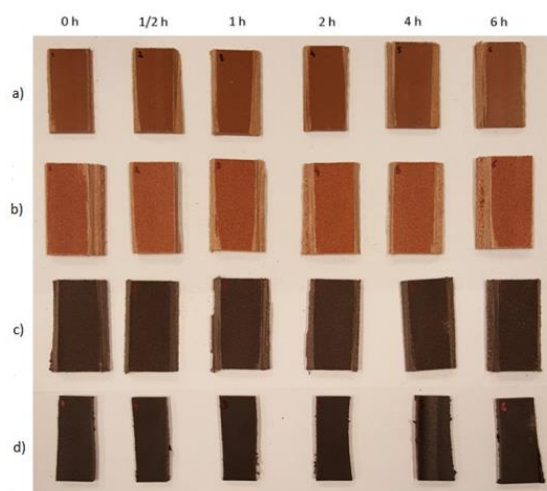
Vercher i sur. su 2018. godine proučavali mehanička i termomehanička svojstva te starenje i moguće promjene vizualnog aspekta drvno-plastičnih kompozita dviju različitih matrica (PVC, PE) i dva različita punila (rižina ljuska, borovo drvo) u svrhu davanja preporuke arhitektima u vezi s izborom drvno-plastičnih kompozita umjesto drva za upotrebu u vanjskim podovima [17]. Svojstva proučavana u ovom istraživanju su: tvrdoća po Shoreu, Charpy udarna svojstva, čvrstoća na savijanje, Vicat temperatura omekšavanja, koeficijent linearnog toplinskog širenja, kolorimetrija, otpor na starenje (klimatska komora, slana magla), apsorpcija vode i kemijska otpornost na uobičajene proizvode.

Kroz fizikalna, kemijska i mehanička ispitivanja, određena su svojstva pripremljenih kompozita. Fizičko-mehaničko ponašanje ispitanih uzoraka ukazuje na bolju izvedbu WPC-a na bazi PVC-a u odnosu na WPC na bazi PE-a. Najbolja vrsta kompozita bila je procijenjena na temelju viših vrijednosti nekih mehaničkih svojstava kao što su tvrdoća po Shoreu, otpornost

na udar i čvrstoća na savijanje. Iako su i PVC i PE polimeri klasificirani kao termoplasti, bolje mehaničko ponašanje PVC-a, zbog njegove posebne strukture, dovodi do boljih svojstava kompozita od onih na bazi PE-a, čak i s nižim sadržajem punila. Za postizanje dobrih svojstava, jako je važno prijanjanje na međupovršini između polimera i drvene komponente. Rezultati su pokazali da materijal izrađen od PVC-a ima višu temperaturu omekšavanja od onog izrađenog od PE-a. Vicatova točka omekšavanja (VST) ekvivalentna je testu tvrdoće s povećanjem temperature.

Koeficijent linearnog toplinskog širenja (eng. *coefficient of linear thermal expansion, CLTE*) bio je značajno viši u kompozitima na bazi PE-a što pokazuje utjecaj vrste polimera na moguće dimenzionalne varijacije iako obično prirodna punila uzrokuju ograničenje toplinskog širenja u polimerima.

U „testiranju na suncu“, uočen je značajan gubitak svjetline (Slika 6.). Pokazalo se da su kompoziti na bazi PE-a vrsta WPC-a koja je u ovom testu najviše pogođena promjenom boje, tj. da je boja blijedila nakon određenog vremena. Indeks žutoće YI (eng. *yellowness index*) kolorimetrijski je parametar, predstavlja žuti ton plastike i općenito je vrlo relevantan budući da je većina plastike obično bjelkasta ili prozirna. Uzorak prozirnog kompozita na bazi PE-a imao je značajniji pad svjetline od uzorka kompozita na bazi PVC-a. YI se za tamne uzorke održavao na sličnim vrijednostima [17].



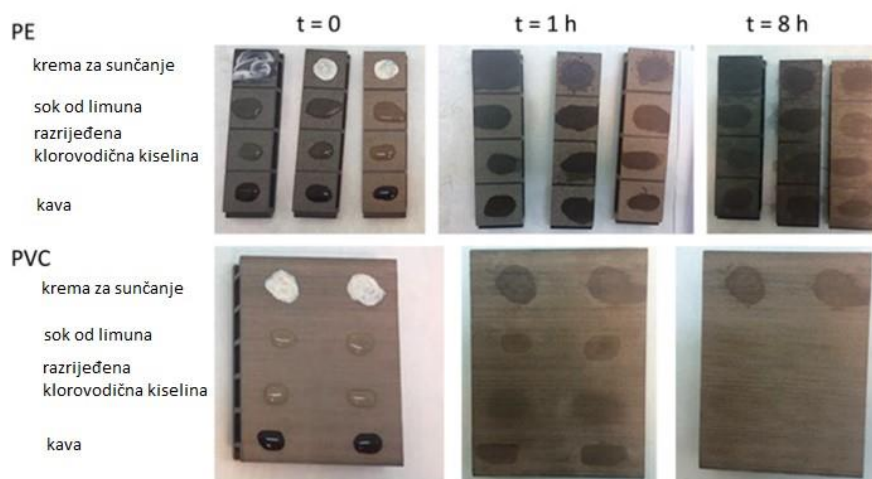
Slika 6. Rezultati „testiranja na suncu“: prozirni uzorci kompozita na bazi:
a) PE-a i b) PVC-a; tamni uzorci kompozita na bazi: c) PE-a i d) PVC-a [17]

Kada su uzorci podvrgnuti ispitivanju ubrzanog starenja u klimatskoj komori, pojavilo se obezbojenje. Do ove promjene boje, dolazi zbog starenja polimera prisutnih u formulaciji drvno-plastičnih kompozita. Ovo obezbojenje slabije se zamjećuje u nekim tonovima kompozita tako da se oni preporučuju u primjenama za duže izlaganje.

Promjene dimenzija bile su praktički beznačajne. Nakon provedbe testa na starenje pomoću slane magle, došlo je do pojave površinskih soli na tamnim uzorcima kompozita na bazi PVC-a. Zbog toga je preporučljivo koristiti svijetle tonove u primjenama koje uključuju izloženost slanoj vodi.

Apsorpcija vode (eng. *water absorption*, *WA*) znatno je viša u drvno-plastičnim kompozitima s drvnim vlaknima u usporedbi s onima koji sadrže ostatke rižine ljuske. Apsorpcija vode u drvno-plastičnim kompozitima izravno je povezana sa sadržajem celuloze i hemiceluloze, koje sadrže veliki broj hidroksilnih skupina pa lako reagiraju s vlagom i vodom, što dovodi do apsorpcije vode. Kako se povećava postotak prirodnih vlakana, dobivaju se veće vrijednosti apsorpcije vode.

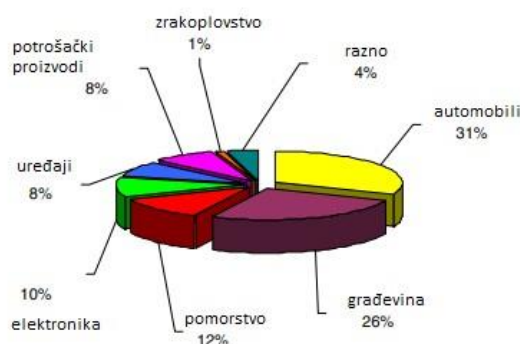
Kako bi se odredila kemijska otpornost, uzorci kompozita testirani su nizom kemijskih sredstava. Neka od tih sredstava nisu imala utjecaj na materijal jer su nakon čišćenja vodom mrlje nestale. Konačna su ispitivanja provedena upotrebom sredstava čije su mrlje ostale: krema za sunčanje, sok od limuna, razrijeđena klorovodična kiselina i kava (Slika 7.). U uzorcima kompozita na bazi PE-a, sva su četiri sredstva ostavila trag. Jedino sredstvo koje je ostalo na uzorku kompozita na bazi PVC-a, bila je krema za sunčanje. Ovo bi moglo biti povezano s činjenicom da je lignocelulozno punilo jako hidrofilno. Kompoziti na bazi PE-a imali su veći udio punila te je zato došlo do prodiranja tekućine kroz čestice prirodnog punila dok je kod kompozita na bazi PVC-a smanjena sposobnost prodiranja kemikalija [17].



Slika 7. Rezultati testiranja kemijske otpornosti kompozita [17]

4.3. PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

U današnje doba, kompozitne industrije traže više ekološki prihvatljivih materijala za svoje proizvode. Sve je veći interes za biorazgradljive obnovljive kompozite ojačane biljnim vlaknima. Drvno-plastični kompoziti koriste se u raznim područjima: u automobilske industriji, građevinarstvu, pomorstvu, elektronici i zrakoplovstvu (Slika 8). Koriste se kao različiti unutarnji dijelovi vozila: ukrasni dijelovi na nadzornim pločama, paneli vrata, police za pakete, jastuci za sjedenje, nasloni i obloge kabine. Do sada je napravljeno vrlo malo vanjskih dijelova automobila od kompozita biljnih vlakana.



Slika 8. Drvno-plastični kompoziti korišteni u 2002. godini [18]

Daimler-Benz istraživao je ideju zamjene staklenih vlakna biljnim vlaknima u automobilske komponentama od 1991. godine. Mercedes je koristio panele vrata na bazi jute u svojim

vozilima E-klase 1996. godine. U rujnu 2000., Daimler Chrysler počeo je koristiti biljna vlakna za proizvodnju svojih vozila. Vlakna od lika pokazuju najveću snagu te se prvenstveno koriste u automobilske industriji. Druge prednosti korištenja vlakana od lika u automobilske industriji uključuju smanjenje mase (10-30 %) i odgovarajuće uštede troškova. Gotovo svi glavni proizvođači automobila u Njemačkoj (Daimler Chrysler, Mercedes, Volkswagen, Audi Group, BMW, Ford i Opel) koriste drvno-plastične kompozite u raznim primjenama.

Istraživanja su pokazala da korištenje drvnih vlakana i/ili raznih vrsta vlakana dobivenih iz poljoprivrede za pripremu kompozita ima mnoge prednosti kod primjene u automobilske industriji. S tehničkog gledišta, ovi polimerni kompoziti s ugrađenim prirodnim vlaknima poboljšavaju mehaničku čvrstoću i akustičnu izvedbu, smanjuju masu materijala, potrošnju energije/goriva i vrijeme obrade, smanjuju troškove proizvodnje, poboljšavaju sigurnost putnika i otpornost na udarce u ekstremnim uvjetima promjene temperature te poboljšavaju biorazgradljivost materijala. Mercedes-Benz E-klase postigao je smanjenje mase od čak oko 20 % i poboljšanje mehaničkih svojstva materijala [18].

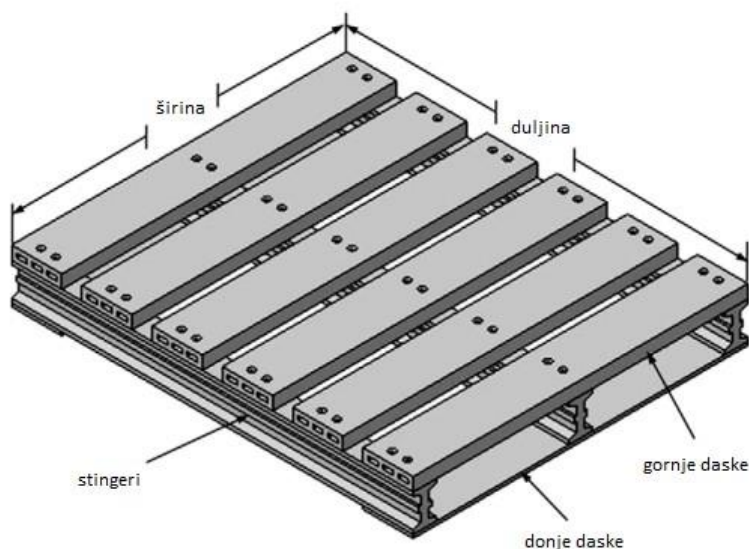
4.4. PRIMJENA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA ZA PROIZVODNJU PALETA

Soury i suradnici 2009. godine proveli su istraživanje primjene drvno-plastičnih kompozita za proizvodnju paleta. Paleta je napravljena sastavljanjem tri profila WPC-a proizvedena u procesu ekstruzije. Zbog karakteristika WPC proizvoda, bio je potreban delikatan dizajn, a time i optimizacija. Cilj istraživanja bio je izdržati maksimalno opterećenje uz minimalni otklon i masu.

Paleta su bitan proizvod u raznim industrijskim sektorima za rukovanje i prijevoz tereta i proizvoda. Godišnje se proizvede gotovo 400 milijuna drvenih paleta što čini 86 % svih paleta prodanih diljem svijeta. Neki od nedostataka drvenih paleta su: degradacija zbog okolišnih čimbenika, nepouzdana izvedba palete tijekom određenog vremenskog razdoblja zbog metode pričvršćivanja dijelova palete i iscrpljivanje šuma zbog pretjeranog korištenja drveća. Zbog ovih nedostataka, neki proizvođači kao sirovinu za proizvodnju paleta koriste metale i plastiku umjesto drva. Plastične palete koje su lagane, prilično čvrste i izdržljive sve se više koriste, ali glavni im je nedostatak nemogućnost biorazgradnje. U proizvodnji paleta izrađenih od drvno-plastičnih kompozita, profili palete proizvode se postupkom ekstruzije. Prednost korištenja procesa ekstruzije mogućnost je projektiranja i optimiziranja profila. Međutim, postojeće

drvno-plastične palete na tržištu uglavnom su velike mase pa nisu povoljne za primjenu. Dakle, bitno je smanjiti masu na prihvatljivu razinu na način da ne bude ugrožena izdržljivost palete.

Tipični dizajn palete prikazan je na slici 9. Vodoravni profili (stringeri) s presjekom u obliku slova I u ovom su istraživanju optimizirani. U paletama od drvno-plastičnih kompozita, koriste se poprečni presjeci kao što su šuplji pravokutni presjeci. U ovom radu, objašnjena je metoda optimizacije I-oblika profila palete od drvno-plastičnih kompozita palete.



Slika 9. Tipični dizajn palete [19]

Pet tipova FEM (eng. *finite element method*) analize provedeno je na profilima, a analiza se odnosi na sljedeća ispitivanja karakteristika važnih prilikom upotrebe:

1. Utovar na gornju dasku
2. Opterećenje na profilu (stringeru)
3. Otpornost na pritisak na ravnoj podlozi i ravnomjerno raspoređeni utovar na palete
4. Ravnomjerno raspoređeno opterećenje duž uzdužnih stranica na dva nosača.
5. Ravnomjerno raspoređeni utovar s dva postolja smještena po širini palete

Rezultat ovih analiza pokazao je da je najprikladniji oblik palete I-oblik, odnosno E-oblik, kako bi se dobio optimalni odnos nosivosti i mase palete. Odabrani dizajn korišten je za proizvodnju matrice i eksperiment je proveden kako bi se proizveo odgovarajući WPC profil koji je zatim mehanički ispitan. Mehanička ispitivanja pokazala su dobro slaganje između empirijskih

rezultata i rezultata analize konačnih elemenata. Utvrđeno je da proizvedena paleta u razumnoj mjeri pokazuje ciljane karakteristike (masu i čvrstoću) [19].

4.5. KARAKTERIZACIJA DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA PROIZVEDENIH OD MJEŠAVINA RECIKLIRANE PLASTIKE

Turku i suradnici 2016. su godine istraživali mogućnost korištenja recikliranog plastičnog otpada za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita. Uzorci su testirani na otpornost na savijanje, rastezanje i otpornost na udar. Također su testirana svojstva tvrdoće i apsorpcija vode. Provedena je i toplinska analiza ovih kompozita.

Uzorci drvno-plastičnih kompozita proizvedeni su od miješanog plastičnog otpada uzetog iz različitih izvora (građevinski i komunalni). Građevinski plastični otpad ručno je odvojen tako da su samo PP i PE bili korišteni zajedno za pripremu kompozita. Iz rezultata provedenih testova mehaničkih svojstava te toplinske analize i analize apsorpcije vode, došlo se do više zaključaka. Čvrstoća kompozita proizvedenih od sekundarnog materijala bila je u nekim pripremljenim uzorcima niža zbog nekompatibilnosti između faza WF i PB (eng. *wood flour*, eng. *polymer blend*). Uzorci proizvedeni injekcijskim prešanjem iz mješavine polimera (PB) imali su veću čvrstoću i krutost u usporedbi s uzorkom proizvedenim od komercijalnog LDPE-a. Drvno brašno u kompozitu utjecalo je pozitivno na vlačnu čvrstoću (eng. *tensile strength*, *TS*) i na vlačni modul (eng. *tensile modulus*, *TM*). Za uzorke proizvedene od reciklirane plastike, drvno je brašno poboljšalo krutost kompozita, povećavajući TM više od dva puta,

Prisutnost PP-a može ojačati mješavinu PP/PE i ukupnu čvrstoću WPC-a zbog prirodno boljih svojstava PP-a (čvrstoća i modul). Pokazalo se da su drvena vlakna bila vrlo učinkovita u poboljšanju modula kompozita, a krutost kompozita od sekundarnog materijala bila je veća u usporedbi s referentnom dok je tvrdoća bila slična referentnoj. Toplinska analiza pokazala je prisutnost PP-a i različitih vrsta PE-a u konstrukciji kompozita. Utvrđeno je da su u mješavinama reciklirane plastike bila prisutna anorganska onečišćenja (2-8 %). SEM analiza pokazala je gubitak veze između čestica drva i polimerne matrice. Važno je napomenuti i da su kompoziti bili pripremljeni uz minimalnu prethodnu obradu sekundarnog materijala. Dodatna obrada može dovesti do poboljšanja svojstava kompozita, ali i povećanja troškova njihove proizvodnje. Ravnoteža između svojstava i troškova mogla bi se pronaći daljnjim istraživanjima [20].

4.6. RECIKLIRANJE DRVNO-PLASTIČNIH KOMPOZITA

Štedljivo korištenje sirovina važna je strategija za očuvanje prirodnih dobara. Doprinos tome može biti i recikliranje WPC otpada. Recikliranjem se smanjuju troškovi jer se ne nabavlja nova sirovina što proizvođačima WPC-a pomaže da steknu ekonomsku prednost, a istovremeno čuvaju okoliš.

Petchwattana i suradnici proveli su 2011. godine istraživanje usmjereno na evaluaciju promjena u mehaničkim i fizičkim svojstvima nakon recikliranja, tj. ponovne obrade termoplastičnog WPC-a proizvedenog od PVC-a i drvnog brašna. Istraživanje se sastojalo od dva dijela: ponovna prerada WPC-a i karakterizacija obrađenih WPC profila nakon procesa ekstruzije provedenog više puta (do sedam prolaza) [21].

Na temelju analize čvrstoće na savijanje, modula savijanja, udarne žilavosti i troškova, utvrđeno je da je omjer WPC otpada i čistog materijala 30:70 najprikladniji omjer miješanja. Ponovna obrada spomenute formulacije rezultirala je padom čvrstoće na savijanje i modula savijanja nakon drugog prolaza kroz ekstruder. Energije udara svježeg materijala WPC-a, WPC otpada i njihove mješavine ostale su relativno nepromijenjene čak i nakon sedam ponovnih procesa ekstruzije. Određivanje molekulske mase PVC matrice pokazalo je da se molekulska masa postupno smanjuje nakon svakog procesa ekstruzije. Pad molekulske mase PVC-a iznosio je čak do 35 % nakon sedam prolaza. Vjeruje se da je do degradacije lanaca PVC-a došlo zbog smičnih naprezanja PVC-a tijekom svakog prolaza kroz ekstruder.

Mješavina WPC otpad / WPC svježi materijal u omjeru 30:70 mogla bi biti korištena za proizvodnju WPC proizvoda bez znatnijeg pada njihovih mehaničkih svojstava [21].

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je proučiti pripremu, svojstva i različite primjene drvno-plastičnih kompozita. Iako su relativno novi proizvodi, drvno-plastični kompoziti u današnje se doba koriste sve češće.

Drvno-plastični kompoziti imaju primjenu u raznim područjima kao što su automobilska industrija, građevina, brodogradnja i zrakoplovstvo.

Upijanje vode drvno-plastičnih kompozita, zbog matrice od polimernog materijala, manje je u odnosu na upijanje vode čistog drva što čini ove materijale prikladnima za upotrebu pri vanjskim uvjetima gdje je upotreba proizvoda od čistog drva često ograničena.

Drvo ugrađeno u plastičnu matricu poboljšava mehanička svojstva.

Za pripremu drvno-plastičnih kompozita, mogu se koristiti i otpadni plastični materijali te različite vrste drvnog i poljoprivrednog otpada. Time se smanjuje odlaganje otpada plastike i drva što dovodi do smanjenja pritiska na okoliš. Drvno-plastični kompoziti mogu se i reciklirati nakon isteka životnog vijeka.

Drvno-plastični kompoziti ujedinjuju dobra svojstva plastike i drva i predstavljaju materijale koji se mogu upotrebljavati za izradu brojnih korisnih proizvoda.

6. LITERATURA

- [1] K. Bhaskar, D. Jayabalakrishnan, M. Vinoth Kumar, S. Sendilvelan, M. Prabhakar, Analysis on mechanical properties of wood plastic composite, *Materials Today: Proceedings*, **45** (2021) 5886–5891.
- [2] N. Španić, V. Jambreković, A. Antonović, Osnovni materijali za proizvodnju drveno plastičnih kompozita, *Drvena industrija*, **61** (2010) 259–269.
- [3] <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/what-is-wood-plastic-composite.html> (pristup 5. 5. 2023.)
- [4] A. H. Elsheikh, H. Panchal, S. Shanmugan, T. Muthuramalingam, A. M. El-Kassas, B. Ramesh, Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment, *Cleaner Engineering and Technology*, **8** (2022) 100460.
- [5] Z. Janović, Polimerizacije i polimeri, HDKI-Kemija u industriji, Zagreb, 1997, 1–8.
- [6] <https://polyexcel.com.br/en/product-news/understand-what-are-polymer-composites/> (pristup 15. 6. 2023.)
- [7] J. Y. Sheikh-Ahmad, *Machining of polymer composites*, Springer Science+Business Media, New York, 2009.
- [8] M. J. Spear, A. Eder, M. Carus, Wood polymer composites, *Wood Composites* (2015) 195–249.
- [9] S. M. Yadav, M. A. Rahandi Lubis, K. Sihag, A Comprehensive Review on Process and Technological Aspects of Wood-Plastic Composites, *Jurnal Sylva Lestari*, **9** (2021) 329–356.
- [10] D. J. Gardner, Y. Han, L. Wang, Wood–Plastic Composite Technology, *Current Forestry Reports*, **1** (2015) 139–150.
- [11] https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-of-a-typical-single-screw-extruder_fig1_304090772 (pristup 8. 7. 2023.)
- [12] O. Hosseinaei, S. Wang, A. M. Taylor, J. Kim, Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of wood–plastic composites, *International Biodeterioration & Biodegradation*, **71** (2012) 29–35.

- [13] R. Montiel, R. Patiño-Herrera, J. A. Gonzalez-Calderón, E. Pérez, Novel Twin Screw Co-Extrusion-Electrospinning Apparatus, *American Journal of Biomedical Engineering*, **6** (2016), 19–24.
- [14] <http://www.xindatr.com/products-Co-Kneader-en.php> (pristup 9. 7. 2023.)
- [15] A. Wechsler, S. Hiziroglu, A. A. Ballerini, Some of the properties of wood–plastic composites, *Society of Wood Science and Technology, Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology*, Concepción, Chile, 2008.
- [16] M. A. Binhussain, M. M. El-Tonsy, Palm leave and plastic waste wood composite for outdoor structures, *Construction and Building Materials*, **47** (2013) 1431–1435.
- [17] J. Vercher, V. Fombuena, A. Diaz, M. Soriano, Influence of fibre and matrix characteristics on properties and durability of wood–plastic composites in outdoor applications, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **33** (2018) 477–500.
- [18] A. Ashori, Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries!, *Bioresource Technology*, **99** (2008) 4661–4667.
- [19] E. Soury, A. H. Behraves, E. Rouhani Esfahani, A. Zolfaghari, Design, optimization and manufacturing of wood–plastic composite pallet, *Materials and Design*, **30** (2009) 4183–4191.
- [20] I. Turku, A. Keskisaari, T. Kärki, A. Puurtinen, P. Marttila, Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends, *Composite Structures*, **161** (2017) 469–476.
- [21] N. Petchwattana, S. Covavisaruch, J. Sanetuntikul, Recycling of wood–plastic composites prepared from poly(vinyl chloride) and wood flour, *Construction and Building Materials*, **28** (2012) 557–560.

7. POPIS SIMBOLA

CLTE	coefficient of linear thermal expansion, koeficijent linearnog toplinskog širenja
DSC	differential scanning calorimetry, diferencijalna pretražna kalorimetrija
FEM	finite element method, metoda konačnih elemenata
HDPE	high density polyethylene, polietilen visoke gustoće
LDPE	low density polyethylene, polietilen niske gustoće
MDF	medium density fiberboard, vlaknasta ploča srednje gustoće
MDPE	medium density polyethylene, polietilen srednje gustoće
MFI	melt flow indeks, indeks tečenja taline
NFC	natural fibre composite, kompozit od prirodnih vlakana
PB	polymer blend, polimerna mješavina
PE	polyethylene, polietilen
PES	polyethersulfone, poli(eter-sulfon)
PET	polyethylene terephthalate, poli(etilen-tereftalat)
PMMA	poly(methyl methacrylate), poli(metil-metakrilat)
PP	polypropylene, polipropilen
PS	polystyrene, polistiren
PVC	polyvinyl chloride, poli(vinil-klorid)
rpm	revolutions per minute, okretaji u minuti
SEM	scanning electron microscopy, skenirajuća elektronska mikroskopija
SMA	styrene maleic anhydride, stiren anhidrid maleinske kiseline
TGA	thermogravimetric analysis, termogravimetrijska analiza
TM	tensile modulus, vlačni modul
TS	tensile strength, vlačna čvrstoća
VST	Vicat's softening point, Vicatova točka omekšavanja
WA	water absorption, apsorpcija vode
WF	wood flour, drvno brašno
WPC	wood plastic composites, drvno-plastični kompoziti
YI	yellowness index, indeks žutoće

8. ŽIVOTOPIS

Osobni podaci:

Ime i prezime: Ivana Prah

██████████

██████████

██████

████████████████████

██████████

████████████████

Obrazovanje:

2018.- studentica preddiplomskog studija, smjer Kemijsko inženjerstvo

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb

2014.-2018. Opća gimnazija

Gimnazija Antuna Gustava Matoša, Samobor

2006.-2014. osnovnoškolsko obrazovanje

Osnovna škola Bogumila Tonija, Samobor

Radno iskustvo:

Učenički servis: etiketiranje: *dm*, Zagreb

Studentski servis: rad u trgovini: *Pittarosso*, King Cross

rad u trgovini: *Takko Fashion*, Samobor

rad na blagajni: *Interspar*, Samobor

rad na blagajni *Eurospin*, Samobor

Stručna praksa:

kolovoz 2023. Chromos d.o.o., Tvornica grafičkih boja, Samobor

Vještine:

Strani jezici: engleski jezik, njemački jezik

Rad na računalu: MS Office, Matlab