MOGUĆNOST IZRADE SLOJEVITIH DRVNO PLASTIČNIH KOMPOZITA

Bridić, Zrinka

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:888569

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

MOGUĆNOST IZRADE SLOJEVITIH DRVNO PLASTIČNIH KOMPOZITA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Oblikovanje proizvoda od drva

Predmet: Pločasti materijali

Ispitno povjerenstvo: 1. prof.dr.sc. Vladimir Jambreković
2. izv.prof.dr.sc. Jaroslav Kljak
3. doc.dr. sc. Nikola Španić

Student: Zrinka Bridić

JMBAG: 0068216936

Broj indeksa: 797/16

Datum odobrenja teme: 20.02.2018.

Datum predaje rada: 06.09.2018.

Datum obrane rada: 21.09.2018.

Zagreb, rujan 2018.

Dokumentacijska kartica

Naslov	Mogućnost izrade slojevitih drvno plastičnih kompozita
Title	Possibility of producing stratified wood plastic composites
Autor	Zrinka Bridić, 12.01.1992. Karlovac, Hrvatska
Adresa autora	Mostanje 85, Karlovac, Hrvatska
Rad izrađen	Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Prof. dr. sc. Vladimir Jambreković
Izradu rada pomagao	Doc.dr. sc. Nikola Španić
Godina objave	2018.
Obujam	32 stranice, 23 slike, 10 tablica i 12 navoda literature
Ključne riječi	Drvno plastični kompozit (WPC), polistiren, fizikalna i mehanička svojstva, metoda uslojavanja
Key words	Wood plastic composite, polystyrene, physical and mechanical properties, stratified method
Sažetak	U suvremenom životu čovjeka recikliranje je postalo nužna potreba za zbrinjavanjem otpada. Istražuju se novi materijali i tehnologije, a upravo je tako istraženo jedno područje koje je povezalo drvnu i plastičnu industriju, s ciljem stvaranja novih kompozita koji će naposljetku imati bolja svojstva od pojedinačnih materijala od kojih je kompozit sačinjen.. Cilj ovog rada bio je izraditi drvno plastični kompozit dosad neistraženom metodom uslojavanja koristeći drvo kao prirodni materijal i polistiren kao vrlo uobičajen polimerni materijal. Rezultati ispitivanja pokazali su da se metodom uslojavanja mogu proizvesti kompozitni materijali vrlo dobrih fizikalno-mehaničkih svojstava. Rezultati ukazuju i na značajan efekt kojeg furnir kao prirodni materijala za oplemenjivanje ima na prvenstveno mehanička svojstva kompozita. S druge strane fizikalna svojstva pod većim su utjecajem granulacije čestica punila.

	IZJAVA **O IZVORNOSTI RADA**	**OB ŠF 05 07** Revizija: 1 Datum: 20.9.2018.

„Izjavljujem da je moj *diplomski rad* izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam *koristila* drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

_____

vlastoručni potpis

Zrinka Bridić

U Zagrebu, *06.09.2018.*

SADRŽAJ

Dokumentacijska kartica I

Izjava o izvornosti rada..... II

Sadržaj…… III

Popis slika..... V

Popis tablica..... VI

1. Uvod..… 1

2. Pregled dosadašnjih istraživanja.....2

2.1. Općenito o drvno plastičnim kompozitima.....2

2.1.1.Polimerna matrica drvno plastičnih kompozita 4

2.1.1.1. Polietilen.....4

2.1.1.2. Polipropilen 5

2.1.2. Drvo kao punilo drvno plastičnih kompozita.....5

2.2. Svojstva i proizvodnja laganog WPC-a 6

2.3. Utjecaj različitih materijala za oblaganje na svojstva prešanog WPC 9

3. Proizvodnja drvno plastičnih kompozita 9

4. Cilj istraživanja.....11

5. Materijali i metode istraživanja 12

5.1. Ispitivani materijal.....12

5.2. Metode istraživanja.....15

5.2.1. Fizikalna svojstva 16

5.2.1.1. Određivanje dimenzija.....16

5.2.1.2. Određivanje gustoće 17

5.2.1.3. Određivanje sadržaja vode 17

5.2.1.4. Ispitivanje debljinskog bubrenja i upijanja vode 18

5.2.2. Mehanička svojstva 19

5.2.2.1. Određivanje savojne čvrstoće.....19

5.2.2.2. Određivanje modula elastičnosti savojne čvrstoće 20

6. Rezultati.....22

6.1. Gustoća 22
6.2. Sadržaj vode 23
6.3. Debljinsko bubrenje – 2 sata 24
6.4. Apsolutno upijanje vode 25
6.5. Relativno upijanje vode 26
6.6. Savojna čvrstoća 27
6.7. Modul elastičnosti savojne čvrstoće 29
7. Zaključak 31
Literatura.... 32

POPIS SLIKA

***Slika 1**. Polietilen (sPE) i punila (WF-drvno brašnno; WP-drvno iverje; WC+SD-sječka+piljevina)* *7*
***Slika 2.** Utjecaj drvnog punila na čvrstoću savijanja* *8*
***Slika 3.** Shematski prikaz faza proizvodnje drvno plastičnih kompozita metodom ekstruzije* *9*
***Slika 4.** Postupak otapanja polistirena u toluenu zagrijavanjem* *12*
***Slika 5**. Otopina polistirena i toluena u tekućem i krutom stanju* *12*
***Slika 6**. Otopina polistirena i toluena s drvnim brašnom* *13*
***Slika 7.** Polukruto stanje drvnog brašna u otopini* *13*
***Slika 8**. Postupci vrućeg i hladnog prešanja* *14*
***Slika 9.** Uzorci WPC pripremljeni za ispitivanje fizikalnih svojstava* *15*
***Slika 10.** Uzorci WPC za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti* *15*
***Slika 11**. Digitalni mikrometar* *16*
***Slika 12.** Pomično mjerilo* *17*
***Slika 13.** Princip ispitivanja i postavke uređaja za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti* *19*
***Slika 14.** Dijagram opterećenja uzorka* *20*
***Slika 15.** Grafički prikaz gustoće pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC* *22*
***Slika 16.** Grafički prikaz sadržaja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC* *23*
***Slika 17.** Grafički prikaz debljinskog bubrenja pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC* *24*
***Slika 18.** Grafički prikaz apsolutnog upijanja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC* *25*
***Slika 19.** Grafički prikaz relativnog upijanja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC* *26*
***Slika 20.** Grafički prikaz savojne čvrstoće uzoraka eksperimentalnih WPC (paralelno sa smjerom vlakanaca furnira)* *27*
***Slika 21.** Grafički prikaz savojne čvrstoće uzoraka eksperimentalnih WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira)* *28*
***Slika 22.** Grafički prikaz modula elastičnosti uzoraka eksperimentalnih WPC (paralelno sa smjerom vlakanaca furnira)* *29*
***Slika 23.** Grafički prikaz modula elastičnosti uzoraka eksperimentalnih WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira)* *30*

POPIS TABLICA

***Tablica 1**. Primjena drvno plastičnih kompozita.....3*
***Tablica 2.** Vrijednosti gustoće ispitnih uzoraka ploča WPC.....22*
***Tablica 3.** Vrijednosti sadržaja vode ispitnih uzoraka WPC.....23*
***Tablica 4.** Vrijednosti debljinskog bubrenja ispitnih uzoraka WPC.....24*
***Tablica 5.** Vrijednosti apsolutnog upijanja vode ispitnih uzoraka WPC.....25*
***Tablica 6.** Relativno upijanje vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC.....26*
***Tablica 7.** Vrijednosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (paralelno sa smjerom vlakanaca furnira).....27*
***Tablica 8.** Vrijednosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira).....28*
***Tablica 9.** Modul elastičnosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (paralelno sa smjerom vlakanaca furnira)...29*
***Tablica 10.** Modul elastičnosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira).....30*

Predgovor

Hvala profesoru Jambrekoviću što je prihvatio temu mog diplomskog rada.

Veliko hvala docentu Španiću što mi je pomagao, usmjeravao me i savjetovao tijekom izrade diplomskog rada.. Hvala na ugodnom društvu za svo vrijeme provedeno u laboratoriju.

Želim se zahvaliti i svim profesorima i asistentima od kojih sam imala priliku učiti tijekom studiranja na Šumarskom fakultetu u Zagrebu. Hvala svim kolegama (posebno kolegi Ivanu, Tinu, Juraju i Harisu) što su upotpunili i uljepšali moje vrijeme studiranja.

Hvala mojim prijateljima i obitelji, posebice mami i sestri Andrini.

Hvala mom Tomislavu.

1. Uvod

Zbog povećane proizvodnje drvna se sirovina u današnje vrijeme uvelike troši. Način ljudskog života ima kao posljedicu onečišćenje okoliša, stoga je recikliranje postalo važan čimbenik u rješavanju problema zbrinjavanja otpada. Zbrinjavanje otpada vrši se u svrhu njegove ponovne uporabe, a sastoji se od prikupljanja, izdvajanja, prerade i izrade novih proizvoda.

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća provedeno je mnogo istraživanja kako bi se stvorio netoksičan drvni kompozit i upravo je drvno plastični kompozit (WPC) jedan od takvih materijala (Lyutyy i sur., 2014).

Drvno plastični kompozit (wood plastic composite - WPC) jedan je od primjera modernih materijala, dobivenih spajanjem dviju supstanci koje su najčešće produkti recikliranja. Radi se o plastici i drvu. Drvo se danas primjenjuje za izradu mnogobrojnih proizvoda, a prilikom njegove prerade ostaje otpadni materijal koji nema značajnu svrhu. Taj „otpadni materijal“ može se iskoristiti za izradu drvno plastičnih kompozita. Plastični materijal također je pogodan za recikliranje, a njegova je najčešća primjena u proizvodnji ambalažnih materijala te se uz to može pronaći u graditeljstvu, tekstilnoj industriji, medicini i sl. (Španić i sur., 2010).

Pojavljuju se problemi odlaganja velike količine otpada zbog dugog vremenskog razgrađivanja u prirodi. Zbog toga je plastični materijal, uz drvo, jedan od vrlo vrijednih sirovina za recikliranje, a time i proizvodnju drvno plastičnih kompozita.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

2.1. Općenito o drvno plastičnim kompozitima

Drvno plastični kompoziti (WPC) relativno su nova generacija kompozitnih materijala i obećavajući sektor u području kompozitne i plastične industrije (Rahman i sur., 2013). To su materijali u kojima je matrica polimerni materijal, a punilo drvni materijal i takvih je svojstava kakve ne posjeduje ni jedna komponenta sama za sebe. Materijali koji ulaze u sastav kompozita daju novi, jedinstveni materijal sa svojstvima koja su posve različita od svojstava polaznih komponenata. Sav se polimerni otpad može koristiti za proizvodnju WPC-a. Stoga su te polimerne sirovine za proizvodnju WPC gotovo neiscrpne (Lyutyy i sur., 2014). Pod pojmom drvo se najčešće smatraju drvni produkti poput drvnog brašna, piljevine ili ostaci drvenastih poljoprivrednih biljaka (Klyosov, 2007). Drvno brašno se dobiva iz piljevine i ostataka drvnih produkata što znači da nije potrebno korištenje dodatnih izvora. Uobičajeno, drvno brašno se koristi kao punilo za izradu WPC (Botros, 2003), iako drva piljevina (Stark, 1997) i drvna vlakna (H'NG i sur., 2008) također imaju široku primjenu. Za kompozite općenito vrijedi da posjeduju vrlo veliku dimenzijsku stabilnost, da se mogu primijeniti pri različitim radnim uvjetima, a mnogi od njih posjeduju izrazito visoku korozijsku otpornost. Osim drvnih čestica kao punilo za izradu WPC se koriste i ostali poljoprivredni ostaci, osobito slama pšenice (Digabel i sur., 2004) i rižina slama (Buzarovska i sur, 2008).

Otpadni produkti su jeftini izvor sirovina i predstavljaju vrijedan materijal. Uz to, recikliranje se smatra i profitabilnim i etičkim jer ne dolazi do uništavanja šuma i korištenja svježih izvora. Plastični materijali mogu se dobiti recikliranjem plastičnih vreća i drugih izvora, iako se u posebnim zahtjevima pri izradi koriste novi polimerni materijali. Plastika je materijal koji se može kombinirati sa različitim materijalima u cilju dobivanja kompozitnih materijala poboljšanih karakteristika.

1970-ih, moderni koncept WPC ploča je razvijen u Italiji i postupno je postao popularan i u drugom dijelu svijeta. Prvi izrađeni kompoziti nisu imali dobra mehanička svojstva. Primjenjivali su se za izradu dekorativnih materijala koji ne zahtijevaju velika mehanička opterećenja. Brzim razvojem novih verzija drvno plastičnih kompozita poboljšala se dimenzijska stabilnost i mehanička svojstva uz mogućnost obrade, oblikovanja u složene oblike i spajanje s drugim materijalima (Lyutyy i sur., 2014).

Uz navedene osnovne komponente WPC, za poboljšanja njegovih svojstava i lakoće izrade kompozita dodaju im se i različiti dodaci. Najčešće upotrebljavani dodaci su usporivači gorenja, različiti pigmenti, UV stabilizatori, omekšivači, punila i dr. (Mali i sur., 2003). Struktura kompozita ima vrlo bitnu ulogu u definiranju njihovih uporabnih svojstava jer i drvo i plastika

imaju svoje nedostatke, a kombiniranjem ta dva materijala postoji mogućnost uklanjanja međusobnih nedostataka. Drvo plastični kompoziti otporni su na vodu, atmosferlije i vlagu što je glavni nedostatak neobrađenog drva. WPC ploče imaju manju snagu i veću savitljivost od drveta. Zbog drvene komponente podložni su napadima gljivica, ali u manjoj mjeri od čistog drveta. Veliki nedostatak ovih materijala je što imaju lošiju otpornost na toplinu od drveta te su samim tim i podložniji požarima.

Bez obzira na činjenicu da ga zbog velikih eksploatacija šumskih sastojina ima sve manje, a da mu je cijena sve veća, drvo zbog izvanrednih svojstava i mogućnosti primjene, postaje neophodna sirovina i zasluženo poprima sve veći značaj. Posljednjih godina je, zbog dobrih osobina i niske cijene, upotreba drvo plastičnih kompozita u neprekidnom porastu.

Područje primjene WPC je široko, a najčešće se primjenjuju u graditeljstvu (podovi, palube brodova, ograde, klupe, prozori, vrata, namještaj), autoindustriji i za opću namjenu (tabl. 1). WPC materijali su našli primjenu kao nenosivi i djelomično opterećeni dijelovi sklopova, podne i zidne obloge, vanjske fasadne obloge, elementi mostova, dijelovi za elemente interijera u avionskoj i automobilskoj industriji (Španić i sur., 2010).

Tablica 1. *Primjena drvno plastičnih kompozita*

INTERIJERI	**EKSTERIJERI**	**JAVNI OBJEKTI**	**TRANSPORT**
namještaj	vanjske vertikale i horizontalne obloge	oprema za dječja igrališta	brodski podovi, dokovi i ograde
stepenice i rukohvati	vrtni namještaj	klupe za parkove	unutrašnje obloge vrata
oplate i profili za podove	vrtna arhitektura	zaštitne ograde	oslonci sjedišta
pregradni zidovi	fasade i zvučne izolacije	pješački mostovi	podovi kamiona i prikolica
radne ploče i kuhinje	ograde	podni profili	poklopci motora
okviri za vrata i prozore	stepeništa	zvučni zidovi na cestama	komandne ploče
			

2.1.1. Polimerna matrica drvno plastičnih kompozita

Zadatak matrice u drvno plastičnom kompozitu je da prianja uz punilo i da kompozitu osigura određenu krutost i stabilnost. Za izradu se primjenjuju sintetički polimerni materijali koji se međusobno razlikuju prema kemijskom sastavu. Dijele se na poliolefine, poliestere, poliamide, poliuretane, a prema strukturnoj građi makromolekule dijele se na linearne razgranate i umrežene. Prema mehaničkim svojstvima dijele se na poliplaste (plastična svojstva) i elastomere (elastična svojstva). Poliplasti se dijele na plastomere (termoplaste) i duromere (termosete). Plastomeri su linearni, razgranati polimeri koji se mogu višestruko prerađivati u taljevini (ekstrudiranjem), dok prerada nema veće posljedice na svojstva. Za razliku od polimera, duromeri se ne mogu preoblikovati i već se izradom dobiju gotovi produkti. Kod proizvodnje drvno plastičnih kompozita koriste se isključivo polimeri, temperature prerade do 200°C (zbog toplinskih svojstava drva). U primjeni se najčešće koriste polietilen, polipropilen i u manjim količinama polistiren. Iako je temperatura od 200°C određena temperatura prerade ona nije apsolutna (Španić i sur., 2014).

2.1.1.1. Polietilen

Polietilen (PE) je najjednostavniji polimerni ugljikovodik, industrijski proizveden polimerizacijom etilena. Spada u žilave materijale, voskastog je izgleda i nepotpune prozirnosti. Struktura njegove makromolekule jednostavnog je sastava, a čine ga ponavljajuće jedinice etilena (–CH2 –CH2 –)n. Spada u polukristalne polimere, a to znači da pri sobnoj temperaturi on sadrži dvije faze: kristalnu i amorfnu. Povećanjem udjela kristalne faze, povećava mu se i gustoća, temperatura taljenja i mehanička svojstva (Španić i sur., 2014). Polietilen visoke gustoće primjenjuje se kod materijala visoke krutosti, žilavosti i visoke kemijske postojanosti, dok se polietilen niske gustoće uglavnom upotrebljava za filmove visoke savitljivosti i prozirnosti.

Za komercijalnu proizvodnju koriste se polietilen visoke gustoće (PE-HD) i polietilen niske gustoće (PE-LD). Polietilen niske gustoće dobiven lančanom polimerizacijom posjeduje svojstva žilavosti, otpornosti na kidanje, otpornosti na kiseline i alkalije. Nedostatak mu je nepotpuna prozirnost. Polietilen visoke gustoće ima linearnu strukturu makromolekula, veću molekulsku masu, velik udio kristalne faze, te visoku gustoću i talište. To mu daje veliku čvrstoću i tvrdoću i znatno veću krutost od PE-LD.

Kako bi se drvno plastični kompozit bolje obradio materijal treba imati manju kristalnost. Ona ovisi o brzini hlađenja izrađenog profila, što utječe na skupljanje, lomljivost i unutarnja naprezanja. Dodatkom drvnog punila amorfnoj strukturi sprečava se slobodno gibanje velikih

molekula i povećava stupanj uređenosti sustava na nadmolekularnoj razini, uz povećanje temperature stakliša koje smanjuje preradivost plastomerne matrice (Španić i sur., 2014).

2.1.1.2. Polipropilen

Polipropilen se sastoji od linearnih molekula s ponavljajućim merima –CH(CH3)-CH2-. Sadrži svojstva slična polietilenu. Visoka čvrstoća, krutost, otpornost na veće temperature, veća prozirnost, visoka otpornost na kidanje, dobra obrada i ravna površina karakteristike su ovog materijala. Pri nižim je temperaturama znatno krhkiji od polietilena. U Europi se za proizvodnju drvno plastičnog kompozita koristi polipropilen u većoj mjeri, dok je za Sjevernu Ameriku karakterističnija uporaba polietilena. Toplinska ekspanzija oba materijala je podjednaka. Zbog toga je drvno plastični kompozit izrađen od bilo kojeg materijala podložan puzanju, posebno u uvjetima većih opterećenja i pri višim temperaturama, ali se to pokušava smanjiti dodatkom aditiva (Španić i sur., 2014).

2.1.2. Drvo kao punilo drvno plastičnih kompozita

Drvni produkti kao što su drvno brašno, piljevina i drvna vlakna osnovne su komponente drvno plastičnih kompozita. Veličina i oblik drvne komponente glavni su utjecajni faktori na uporabna svojstva kompozita. Izrada određenih vrsta vlakna i granulata spada pod najkomercijalnije metode izrade. Drvna se vlakna dobivaju različitim metodama koja najčešće obuhvaćaju neku vrstu mehaničkog ili kemijskog razdvajanja cjelovitog drva. Tim postupcima mijenjaju se svojstva drva, a time i svojstva drvno plastičnih kompozita. Drvna vlakna spadaju u jedna od boljih punila za drvno plastične kompozite zbog velikog omjera duljine i promjera što uvjetuje visoku čvrstoću i mogućnost dobrog prijenosa naprezanja unutar matrice, ali zbog tehnoloških problema izrade WPC-a primjenom drvnih vlakna kao punila, ona se rijetko primjenjuju. Glavni nedostatak je njihova duljina koja smanjuje mogućnost tečenja drvom ispunjenog plastičnog materijala pri preradi. Upravo zbog tih razloga primjenjuje se drvno brašno. Drvno brašno predstavlja drvo svedeno na sitne, razdvojene čestice koje izgledom, veličinom i strukturom podsjećaju na čestice brašna. To je relativno jeftin materijal i čini proces proizvodnje kompozita jednostavnim. Drvno je brašno otpadni produkt iz pilanskih procesa koji je usitnjen. Ne postoji standardna metoda dobivanja drvnog brašna, već se korištenjem mlinova različitih promjera oka sita, prosijavanjem dobivaju različite veličine zrna (Španić i sur., 2014).

Za proizvodnju drvno plastičnih kompozita upotrebljavaju se različite vrste drvnog brašna, a njihov izbor ponajviše ovisi o dostupnosti sirovine karakteristične za geografski položaj. Najčešće korišteni materijali su bor, smreka, javor i hrast, ali se mogu koristiti i druge vrste drva. Prednost se daje drvima sa manje tanina zbog podložnosti toplinske degradacije. Kompoziti se

proizvode pri temperaturi oko 200°C što je i temperatura razgradnje lignina i akcesornih tvari. One mogu uzrokovati nastajanje mikro šupljina što smanjuje gustoću kompozita, te njihova fizikalno-mehanička svojstva. Također postaju podložni biološkom propadanju. Uz to akcesorne tvari su lako topive u vodi, pa se migracijskim i sorpcijskim procesima mogu izlučiti na površinu kompozita i stvoriti tamne mrlje. Tanini u kombinaciji sa solima željeza mogu uzrokovati tamnjenje na površini kompozitima pa kontakti s npr. čavlima mogu uzrokovati tamnjenje površine. Takve mrlje mogu se ukloniti oksidacijom (Bekhta i sur., 2016).

Svojstva drvnog brašna dosta se razlikuju od svojstava cjelovitog drva od kojeg su izrađeni. Postupak proizvodnje provodi se pri povišenom tlaku i/ili temperaturi. Mijenjaju se kemijska svojstva površine drva, njegova gustoća i sadržaj vode, te higroskopnost drvne tvari. Npr. drvna vlakna proizvedena termo-mehaničkim putem imaju površinu obogaćenu ligninom, dok ona dobivena kemijskim putem imaju površinu bogatu ugljikohidratima.

Higroskopnost drva je jedan od problema pri proizvodnji WPC. Drvno brašno upija vlagu prije miješanja s polimerom, dok gotovi kompoziti dodatno upijaju vlagu iz okoline. Drvo u strukturi drvno plastičnog kompozita nije potpuno zaštićeno od vlage. Utezanje i bubrenje su posljedice djelovanja vlage, a ono je uvjetovano količinom drva u strukturi. Način proizvodnje drvnog brašna utječe na promjene u sadržaju vode i higroskopnosti. S većim postotkom vlage drvnog brašna postoji i veća mogućnost opasnih spojeva, poroznosti, smanjenja gustoće i mogućnost daljnjeg upijanja vlage gotovog kompozita. Ako dolazi do bubrenja drva u kompozitu, veze između matrice i ojačala pucaju i stvaraju se mikropukotine. Reduciranjem udjela drvne tvari u ukupnoj masi drvno plastičnog kompozita može se regulirati vlaga.

2.2. Svojstva i proizvodanja laganog WPC-a

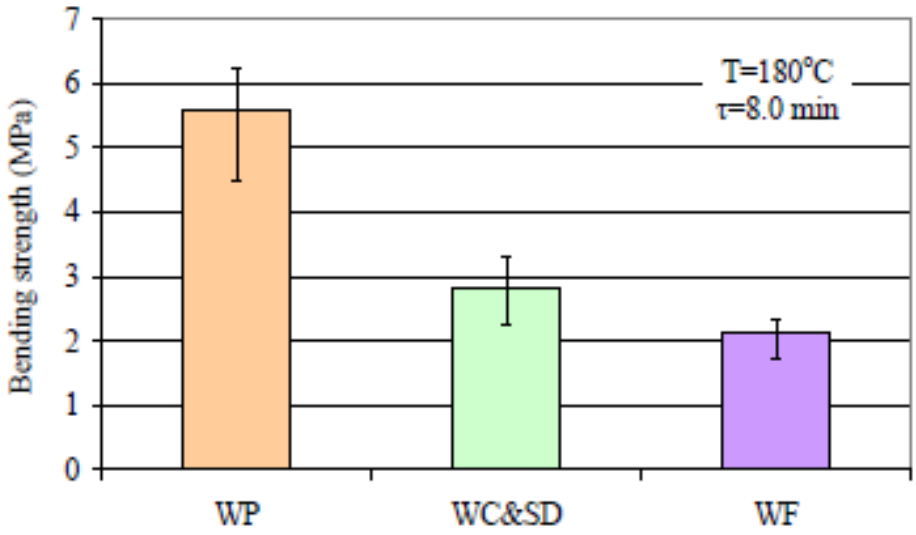
Malo je istraživanja bilo posvećeno proizvodnji WPC-a metodom ravnog prešanja. Razlog tome je kompleksno tj. kompliciranо dobivanje homogenih smjesa. Lyutty i sur. (2014) u svojem su radu analizirali koliko i kako drvno punilo, gustoća ploče, temperatura i vrijeme prešanja utječu na svojstva drvno plastičnih kompozita koji su izrađeni metodom prešanja. Koristili su polietilen i punila raznih vrsta listača i četinjača u obliku brašna, iverja i mješavinu sječke i piljevine (u omjeru 10:90) sa sadržajem vlage 2-3% (sl.1).



Slika 1. *Polietilen (sPE) i punila (WF-drvno brašno; WP-drvno iverje; WC+SD-sječka+piljevina) (Izvor: Lyutty i sur., 2014)*

Eksperimenti su provedeni u dvije serije, koristeći pritom 12 uzoraka za svako ispitivanje. Prvi test koji su odradili bazirao se na učinku drvnog punila. Smjesa punila i polietilena u čvrstom stanju bila je miješana rukom 10 minuta, a zatim formirana na podložak. Formirane ploče dimenzija 250 x 230 x 8 mm prešale su se pod tlakom od 3,5 MPa na temperaturi od 180°C u vremenu od 8 minuta. Nakon vrućeg prešanja, ploča se hladila na 30-40°C. Drugi test odnosio se na utjecaj čimbenika prešanja na svojstva WPC. Sastav WPC bio je isti kao u testu broj 1, a čimbenici prešanja su bili: gustoća ploče- 800, 900 ili 1000 kg/m³; udio čestica- 20, 40 ili 60%; temperatura prešanja 160, 180 ili 200°C i vrijeme prešanja 6,4; 8 ili 9,6 minuta.

Rezultati su pokazali kako su veće vrijednosti čvrstoće na savijanje zamijećene u kompozitu čije je punilo bile drvno iverje (WP). Točnije, čvrstoća na savijanje bila je dvostruko veća kod ploče izrađene od drvnog iverja u usporedbi kada se kao punilo koristila mješavina sječke i piljevine (WC + SD) te 2,76 puta veća u usporedbi s pločom za koju se koristilo drvno brašno (WF). Vrijednost čvrstoće na savijanje WPC ploča sa svim tipovima drvnih punila nisu zadovoljila standarde za ploče iverica (minimalno 12,5 MPa za EN 312), MDF ploče (minimalno 23 MPa za EN 622-5) i OSB ploče (minimalno 20 MPa za EN 300).



Slika 2. *Utjecaj drvnog punila na čvrstoću savijanja (Izvor: Lyutty i sur., 2014)*

Vrijednosti bubrenja, odnosno apsorpcije vode i debljina WPC ploča koje su izrađene pomoću sječke i piljevine bile su 1,56 puta veće od onih WPC ploča koje su načinjene od drvnog iverja. Debljina WPC ploča izrađenih od drvnog brašna bila je 1,49 puta veća nego debljina WPC ploča izrađenih od drvnog iverja. Dokazano je kako temperatura prešanja i vrijeme također imaju bitan utjecaj na svojstva prešane WPC ploče. Povećanjem temperature prešanja od 160 do 200°C i vremena od 6,4 do 9,6 min dovodi do povećanja savojne čvrstoće.

Tamrakar i sur. (2012) istraživali su fizikalna i mehanička svojstva također ravno prešanih drvno plastičnih kompozita sačinjenih od drvnog brašna i recikliranog polietilen tereftalata (PET). Nakon miješanja komponenti, uslijedio je postupak ravnog prešanja te je zaključeno kako svojstva tog drvno plastičnog kompozita ovise o sirovini i omjeru miješanja. Također je ustanovljeno da sadržaj PET smanjuje sadržaj vlage, apsorpciju i debljinu bubrenja.

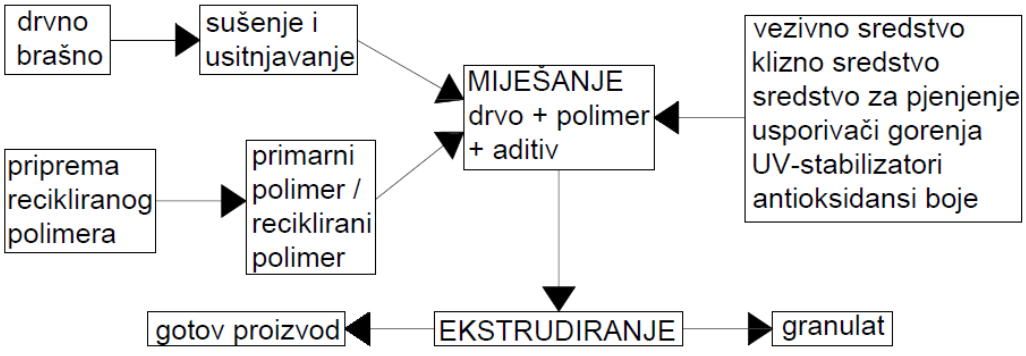
2.3. Utjecaj različitih materijala za oblaganje na svojstva prešanog WPC

Bekhta i sur. (2014) u svojem radu opisuju rezultate istraživanja utjecaja različitih vrsta materijala za oblaganje na svojstva ravno prešanih drvno-plastičnih kompozitnih (WPC). Za oblaganje ploča primijenjeni su ljušteni brezov furnir, rezani hrastov furnir, fenolni impregnirani papir, polietilenska (PE) folija i reciklirani polietilen (RPE). Utvrđeno je da su svojstva ravnih prešanih WPC ploča poboljšana oblaganjem bilo kojim navedenim ispitivanim materijalom. Najveće vrijednosti modula loma (MOR) zabilježene su za WPC ploče obložene ljuštenim brezovim furnirom. MOR vrijednosti bile su veće uzduž vlakanaca furnira nego okomito na njihov smjer . Najveća otpornost na vodu zabilježena je u ploča obloženih polietilenskom folijom i recikliranim polietilenskim slojem. Oblaganje WPC ploče prirodnim furnirom utječe na smanjenje otpornosti na vodu. Osim toga, otpornost na vodu WPC ploča obloženih s jedne strane prirodnim furnirom bila je veća nego WPC ploča obloženih prirodnim furnirom s obje strane. Dvostrano oblaganje WPC ploča fenolnim impregniranim papirom, polietilenskom folijom i recikliranim polietilenskim slojem pridonosi smanjenju apsorpcije vode i debljinskog bubrenja.

3. Proizvodnja drvno plastičnih kompozita

Drvno plastični kompoziti izrađuju se miješanjem drvnog brašna i polimera. Drvno brašno se dobiva iz piljevine i ostataka drvnih produkata.

WPC ploče se mogu proizvesti na nekoliko načina: ekstrudiranjem, injekcijskim prešanjem, kalandriranjem, toplim oblikovanje i pultrudiranjem. Najčešće način izrade je ekstruzija gdje se granulat miješanjem i grijanjem stlačuje i istiskuje te oblikuje. Proces proizvodnje drvno polimernog kompozita ekstrudiranjem sastoji se od faza shematski prikazanih na slici 3. Ekstrudiranjem WPC moguće je dobiti pune ili šuplje profile i taj proces povećava efikasnost i omogućuje fleksibilan dizajn. To su proizvodi koji ne trebaju daljnju obradu, dok su mehanička i druga svojstva finalnih proizvoda zadovoljavajuća.



Slika 3. *Shematski prikaz faza proizvodnje drvno plastičnih kompozita metodom ekstruzije*

Injekcijsko prešanje se primjenjuje rjeđe i to za oblikovanje proizvoda složenijih oblika. Sastojci se prvo pomiješaju, griju i tale, a zatim se od smjese oblikuje konačni proizvod. Osim miješanja u miješalici, ono se može provesti ekstrudiranjem nakon čega se pravi granulat. Tako pripravljen granulat injekcijski se preša. Prednosti ekstrudiranja u odnosu na injekcijsko prešanje su manja osjetljivost na vlažnost materijala i dobivanje gotovog proizvoda u jednom koraku jer se miješanje komponenata može obaviti u istom ekstruderu kojim se oblikuje profil, ali to zahtijeva ekstruder s dva pužna vijka, a njegova cijena je viša od jednopužnoga.

Još manje korištene metode izrade WPC-a su kalandriranje s toplim oblikovanjem i pultrudiranje, Kod kalandriranja polimer se propušta između valjaka podesivog zazora koji određuje debljinu proizvoda. Pri prolasku materijala između valjaka prisutno je miješanje materijala čime se postiže homogenost strukture materijala. Kalandriranjem se najviše proizvode ploče koje se koriste za oblaganje u građevinarstvu. Pultrudiranjem se proizvode razni puni profili provlačenjem kroz matricu.

4. Cilj istraživanja

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je uslojavanjem izraditi kompozit na bazi drva i polistirena. Drvno plastični kompoziti se komercijalno proizvode ekstruzijski (istiskivanjem) ili injekcijskim prešanjem. Izrada drvno plastičnih kompozita uslojavanjem vrlo je zanimljiva, ali zanemarena metoda. Na dobivenim kompozitima ispitana su sljedeća svojstva: gustoća, sadržaj vode, debljinsko bubrenje nakon dva sata, apsolutno i relativno upijanje vode, savojna čvrstoća i modul elastičnosti savojne čvrstoće.

Cilj istraživanja i razvoja eksperimentalne ploče realiziran je kroz nekoliko međusobno povezanih faza:

- otapanje polistirena u toluenu,
- dodavanje drvnog brašna crne johe (dvije veličine granulacija) u otopinu,
- izrada ploča - ploča izrađena od polimera i prirodnog punila,
- krojenje ploča na dimenzije uzoraka 25 x 25 x d (mm) za ispitivanje gustoće, sadržaja vode i debljinskog bubrenja,
- krojenje ploča na dimenzije uzoraka 160 x 25 x d (mm) za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti,
- mjerenje dimenzija i mase uzoraka – potrebnih za izračun gustoće, sadržaja vode, debljinskog bubrenja i savojne čvrstoće,
- sušenje uzoraka u sušioniku i potapanje uzoraka u vodu kroz 2 sata,
- ispitivanje debljinskog bubrenja, relativnog i apsolutnog upijanja vode, te (relativnog) sadržaja vode uzoraka nakon sušenja i potapanja u vodu,
- statistička obrada i tumačenje dobivenih podataka, zaključci o svojstvima WPC ploče.

5. Materijali i metode istraživanja

5.1. Ispitivani materijal

Istraživanje je provedeno na višeslojnim drvno plastičnim kompozitima koji su izrađeni od drvnog brašna i polimera postupkom prešanja. Napravljene su dvije skupine drvno plastičnih kompozita. Jedna skupina uzoraka izrađena je primjenom drvnog brašnom krupnije granulacije (0,355 mm – 0,50 mm), a druga s drvnim brašnom sitnije granulacije (< 0,25 mm).

Postupak izrade listova za prešanje sastojao se od nekoliko faza. Prvi korak bio je zagrijavanjem otopiti oko 4g polistirena u 100 ml toluena (sl. 4). Kada se kroz 10 do 15 minuta polistiren u potpunosti rastopio, otopina se izlila su keramičke tanjuriće i ostavila na abmijentalnom tlaku i temperaturi kako bi otapalo u potpunosti isparilo i kako bi se formirao sloj (list) čistog polimera (sl. 5).

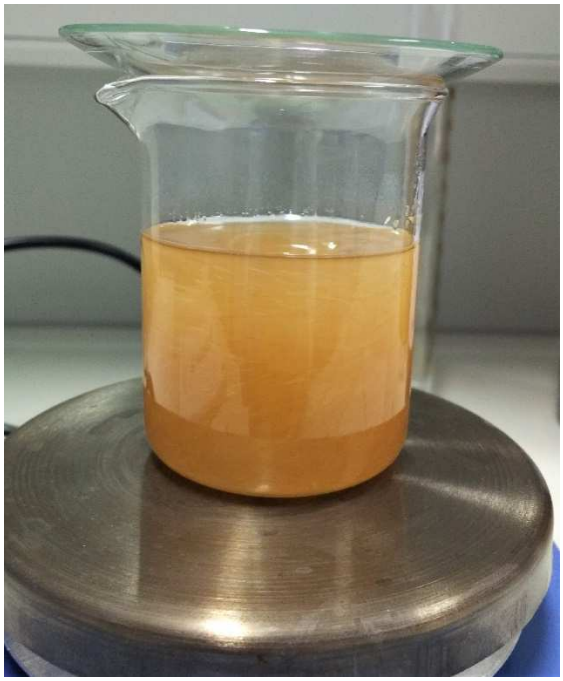


Slika 4. *Postupak otapanja polistirena u toluenu zagrijavanjem*



Slika 5. *Otopina polistirena i toluena u tekućem i krutom stanju*

Drugi korak je identičan prvome, samo što se u otopinu polistirena i toluena dodavalo drvno brašno (sl. 6) u duplo manjoj količini nego polistiren (oko 2g). Pripremljena otopina opet se izlijevala u keramički tanjurić i ostavljena kako bi otapalo u potpunosti isparilo i kako bi se formirao sloj (list) polimera pomiješanog s drvnim brašnom (sl. 7).



Slika 6. *Otopina polistirena i toluena s drvnim brašnom*



Slika 7. *Polukruto stanje drvnog brašna u otopini*

Listovi komponenti naslagani su u slojevima sljedećeg redoslijeda:

1. Furnir topole orijentiran u smjeru paralelno s vlakancima
2. Čisti polimer
3. Polimer + drvno brašno
4. Polimer + drvno brašno
5. Polimer + drvno brašno
6. Čisti polimer
7. Furnir topole orijentiran u smjeru okomito na vlakanca

Tako pripremljeni „sendvič“ sastavljen iz više slojeva u adekvatnom kalupu zatim je stavljen u vruću (sl. 8) prešu i prešan kroz 8 minuta na temperaturi od 140 °C i tlaku od 0,5 N/mm^2. Nakon vrućeg prešanja slijedilo je hladno prešanje (sl. 8) koje je trajalo 5 minuta pod tlakom od 5 N/mm^2.



Slika 8. *Postupci vrućeg i hladnog prešanja*

Krojenje uzoraka obavljeno je djelomično u skladu s odrednicama HRN EN normi vezanih uz ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava drvnih ploča. Ispitivani uzorci prije ispitivanja bili su kondicionirani tj. prilagođeni uvjetima od 65 ± 5 % relativne vlage zraka pri temperaturi 20 ± 2 °C. Uzorci su kondicionirani sve dok nisu postigli konstantnu masu. Konstantna masa se postigla kada rezultati dva uzastopna vaganja, provedena u razmaku od 24 sata, nisu odstupala više od 0,1 % mase ispitnog uzorka. U ovom radu za ispitivanje koristio se veći broj uzoraka za svako ispitano svojstvo (10 uzoraka) u svrhu dobivanja što preciznijih i vjerodostojnijih rezultata mjerenja.

5.2. Metode istraživanja

Ispitni uzorci su podijeljeni u 2 skupine po 10 uzoraka za ispitivanje gustoće, sadržaja vode (tzv, suhi uzorci), te debljinskog bubrenja i apsolutnog i relativnog upijanja vode (tzv. mokri uzorci). Prema istoj analogiji pripremljeni su uzorci kompozita dimenzija 25 x 25mm izrađeni sa sitnijim drvnim brašnom (0,25 mm) (sl. 9) i krupnijim drvnim brašnom (0,355-0,50 mm)



Slika 9. *Uzorci WPC pripremljeni za ispitivanje fizikalnih svojstava*

Uzorci koji su služili za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti bili su podijeljeni u 4 kategorije; uzorci ploča izrađenih primjenom sitnijeg/krupnijeg drvnog brašna krojeni tako da je smjer vlakanaca vanjskih listova furnira orijentiran u smjeru duljine uzoraka, odnosno uzorci ploča izrađenih primjenom sitnijeg/krupnijeg drvnog brašna krojeni tako da je smjer vlakanaca vanjskih listova furnira orijentiran okomito na smjer duljine uzoraka. Pri krojenju uzoraka pazilo se na lice/naličje ploče i uzorci su pripremani tako da je pri krojenju lice ploče uvijek bilo okrenuto prema gore. Dimenzije uzoraka u sve četiri skupine su bile 160 x 25 mm (sl. 10).



Slika 10. *Uzorci WPC za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti*

Svojstva ispitana na uzorcima ploča mogu se podijeliti u dvije skupine:

<u>fizikalna svojstva</u>:

- dimenzije,
- gustoća,
- sadržaj vode,

- debljinsko bubrenje,
- apsolutno i relativno upijanje vode.

mehanička svojstva:
- savojna čvrstoća,
- modul elastičnosti savojne čvrstoće.

5.2.1. Fizikalna svojstva

Od fizikalnih svojstava ispitana je gustoća, određene su dimenzije te je izmjereno debljinsko bubrenje (Q-2) i apsolutno i relativno upijanje vode. Ispitivanja su provedena prema normama:

- dimenzije – HRN EN 324-1:1993 Ploče na osnovi drva – Određivanje dimenzija ploča-1. dio: određivanje debljine, širine i duljine (EN 324-1:1993),
- gustoća – HRN EN 323:1997 Ploče na osnovi drva – Određivanje gustoće (EN 323:1993),
- debljinsko bubrenje – HRN EN 317:2000 Ploče iverice i vlaknatice – Određivanje debljinskog bubrenja nakon potapanja u vodu (EN 317:1993).

5.2.1.1. Određivanje dimenzija

Pri određivanju dimenzija, potrebno je odrediti debljinu, duljinu i širinu uzoraka. Za mjerenje vrijednosti debljine koristi se mikrometarski vijak (u ovom radu digitalni mikrometarski vijak) (sl.11). To je mjerni instrument koji mjeri s točnošću od stotinke milimetra. Mjerenje debljine vrši se umetanjem uzorka i laganim pritezanjem ploha mjernog instrumenta, najprije pomoću kraja vijka za grubo okretanje, a zatim finim pritezanjem čegrtaljke.



Slika 11. *Digitalni mikrometar*

Za mjerenje duljine i širine služi pomično mjerilo (sl.12). Pomično mjerilo je mjerni instrument kojim je ostvarena mogućnost mjerenja s točnošću od desetinke milimetara. Mjerenje duljine pomičnim mjerilom vrši se pomicanjem i laganim stezanjem ploha mjernog instrumenta na mjerni uzorak. Na ljestvici tijela očitavaju se puni milimetri, dok se na skali noniusa očitavaju desetinke milimetra.



Slika 12. *Pomično mjerilo*

5.2.1.2. Određivanje gustoće

Gustoća je određena na kondicioniranim uzorcima. Ispitano je 10 uzoraka, kvadratnog oblika sa dimenzijama 25 x 25 mm. Svakom ispitnom uzorku izmjerena je masa preciznom vagom s točnošću od 0,01 g. Masa uzoraka je mjerena po kondicioniranju. Uz masu, izmjerene su dimenzije i izračunata je gustoća. Gustoća se izražava kao omjer mase i volumena ploče, prema formuli:

$$\rho = \frac{m_u}{V} \qquad ....(1)$$

ρ – gustoća ispitnog uzorka, g/cm³
m_u – masa ispitnog uzorka, g
V – volumen ispitnog uzorka, cm³

5.2.1.3. Određivanje sadržaja vode

Ispitni uzorci koji su se koristili za mjerenje sadržaja vode su dimenzija su 25 x 25 mm, pri čemu se koristilo 10 ispitnih uzoraka za svaku vrstu ploče. Cilj je ispitivanja utvrditi količinu vode u ploči u trenutku ispitivanja. Kod pločastih materijala na bazi drva primjenjuje se gravimetrijska metoda (metoda vaganja). Masa ispitnih uzoraka izmjeri se vagom s dopuštenim odstupanjem od ± 0,05 g. Ispitni uzorci zatim se stavljaju u sušionik i suše pri konstantnoj temperaturi od 103 ± 2°C, dok sva voda ne ispari iz uzorka, odnosno do konstantne mase. Uzorci se nakon 24 sata vade iz sušionika te im se ponovno mjeri masa. Sadržaj vode u uzorcima izrazit će se kao relativna vlažnost (u_r) i izračunava se na osnovi razlike mase uzorka u zrakosuhom stanju i apsolutno suhom stanju prema:

$$u_r = \frac{m_u - m_0}{m_0} \times 100 \qquad ....(2)$$

u_r – relativna vlažnost, %

m_u – masa klimatiziranog uzorka prije sušenja, g
m_0 – masa klimatiziranog uzorka nakon sušenja, g

5.2.1.4. Ispitivanje debljinskog bubrenja i upijanja vode

Debljinsko bubrenje i upijanje vode utvrđuje se zbog spoznaje o ponašanju ploča pri promjenama vage zraka ili direktnog utjecaja vode, u uvjetima uporabe. Za ispitivanje je potrebna oprema: kada s vodom, uređaj za potapanje u vodu, sito zacijeđenje, mjerila (pomično mjerilo, mikrometar i vaga).

Određivanje debljinskog bubrenja vršilo se potapanjem 10 uzoraka svake od izrađenih ploča dimenzija 25 x 25 mm u vodu. Prije samog ispitivanja, uzorci se podvrgavaju klimatizaciji, te se njima izmjeri masa i debljina i nakon toga se uzorci potapaju u kadu s vodom. Klimatizirani uzorci se potapaju u okomitom položaju u vodu temperature 20 ± 1°C i drže se potopljeni u vodi 2 sata. Uzorci se međusobno ne smiju dodirivati, pa niti sa stjenkom posude i moraju čitavom svojom površinom biti potopljeni pod vodom (ne smiju isplivati). Razina vode iznad uzoraka mora biti oko 25 mm. Nakon propisana vremena uzorci se vade iz vode i stavljaju na žičanu mrežicu na cijeđenje kroz 10 minuta. Uzorci se zatim važu te im se mjeri dimenzija.

Debljinsko bubrenje (Q-2) je razlika debljine ispitanog uzorka nakon klimatizacije (prije tretmana) i njegove debljine nakon potapanja u vodu. Izražava se s točnošću od 0,1 mm, a računa se prema formuli:

$$Q-2=\frac{d_o-d_u}{d_u}\times 100 \qquad \text{....(3)}$$

Q-2 – debljinsko bubrenje nakon 2 sata izlaganja, %
d_o – debljina ispitnog uzorka nakon tretmana, mm
d_u – debljina klimatiziranog ispitnog uzorka, mm

Apsolutno upijanje vode (U_a) odnos je mase ispitanog uzorka nakon tretmana u vodi i mase klimatiziranog uzorka prije tretmana. Rezultat se izražava s točnošću od 0,1 g, a izračunava se prema formuli:

$$U_a=m_v-m_u \qquad \text{....(4)}$$

U_a – apsolutno upijanje vode, %
m_v – masa ispitnog uzorka nakon izlaganja, g
m_u – masa ispitnog uzorka prije izlaganja, g

Relativno upijanje vode (Ur) odnos je apsolutnog upijanja vode i mase ispitanog uzorka prije tretmana, a računa se prema formuli:

$$U_r = \frac{m_v - m_u}{m_u} \times 100 \quad \text{....(5)}$$

U_r – relativno upijanje vode, %
m_v – masa ispitnog uzorka nakon izlaganja, g
m_u – masa ispitnog uzorka prije izlaganja, g

5.2.2. Mehanička svojstva

Od mehaničkih svojstava ispitala se savojna čvrstoće i modul elastičnosti savojne čvrstoće; prema normi:

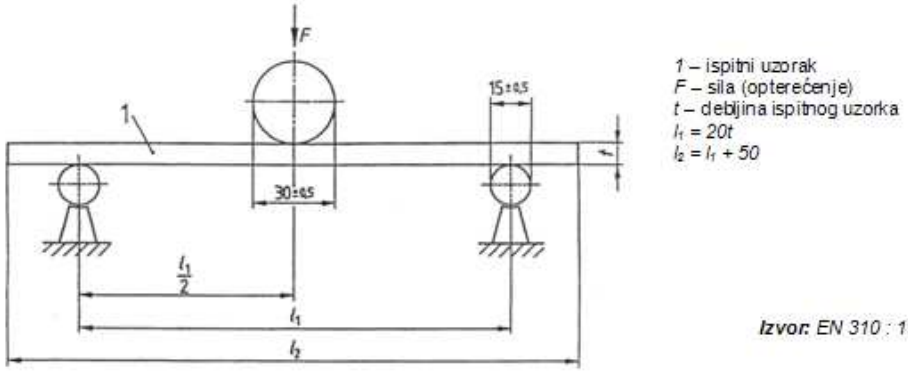
- savojna čvrstoća – HRN EN 310:1999 Ploče na osnovi drva – Određivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti savojne čvrstoće.

5.2.2.1. Određivanje savojne čvrstoće

Savojna čvrstoća i modul elastičnosti ispitani su na kidalici Laboratorija za drvne ploče Šumarskog fakulteta. Ona je izražena kao odnos maksimalnog savojnog momenta prije loma i momenta otpora. Dimenzije ispitnih uzoraka za utvrđivanje savojne čvrstoće normom su određene i iznose:

- širina 25 ± 1 mm
- duljina 16 x d + 25 mm (minimalno 150 mm; maksimalno 1050 mm)

Mjernoj duljini uvijek se dodaje isti iznos nadmjere od 50 mm (sa svake strane po 25 mm), čime se uzorak osigurava od proklizavanja ili deformacije slojeva, koji bi mogli ugroziti valjanost rezultata mjerenja.



Slika 13. *Princip ispitivanja i postavke uređaja za ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti*

Prilikom ispitivanja uzorak se postavlja na dva oslonca ispitnog uređaja (kidalice), s mogućnošću pomaka u ravnini paralelnoj s površinom ispitnog uzorka, čime se može regulirati otvor među osloncima. Širina oslonaca i pritiskivača ne smije biti manja od širine ispitnog

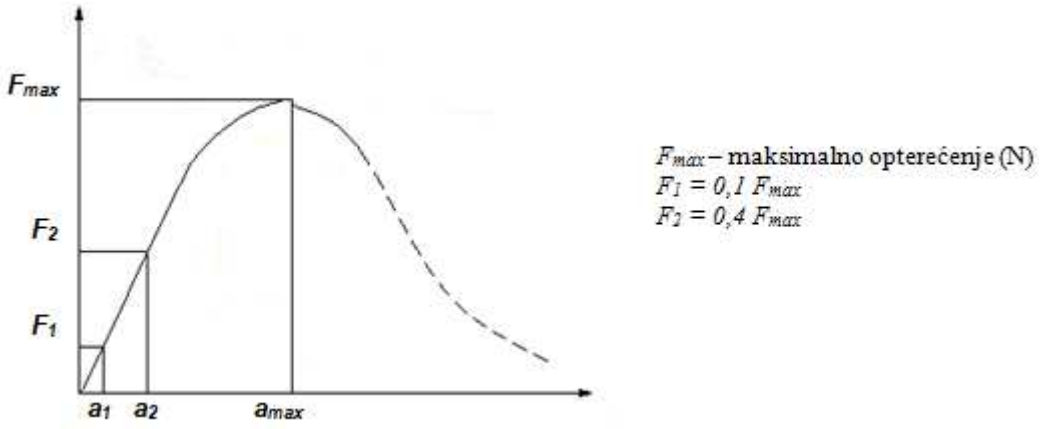
uzorka. Dodirne površine oslonaca i pritiskivača s ispitnim uzorkom moraju biti zaobljene radijusom zaobljenosti 15 ± 5 mm. Brzina pomicanja vertikalnog pritiskivača mora se podesiti tako da lom nastupi u vremenu od oko jedne minute. 10 ispitnih uzoraka od svake ploče postavljaju se na ispitni uređaj. Za vrijeme opterećivanja sila djeluje u sredini mjerne duljine po cijeloj širini ispitnog uzorka. Na osnovi tako izmjerene sile, savojna čvrstoća se izračunava po formuli:

$$\sigma_s = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times d^2} \qquad ....(6)$$

σ_s *– savojna čvrstoća, MPa*
F – maksimalna pritisna sila, N
l – razmak između oslonaca, mm
b – širina ispitnog uzorka, mm
d – debljina ispitnog uzorka, mm

5.2.2.2. Određivanje modula elastičnosti savojne čvrstoće

Modul elastičnosti savojne čvrstoće odnos je normalnog naprezanja u poprečnom presjeku ispitnog uzorka, u području proporcionalnosti i odgovarajućeg pojedinačnog progiba. Određivanje modula elastičnosti najčešće se vrši paralelno sa ispitivanjem savojne čvrstoće, na istim uzorcima, ali može i zasebno, na uzorcima istih dimenzija. Neovisno o tome, ispituje li se modul elastičnosti zasebno ili paralelno s ispitivanjem savojne čvrstoće, uvjeti ispitivanja su identični onima kod ispitivanja savojne čvrstoće. Za ispitivanje korišten je isti ispitni uređaj (kidalica), opremljen uređajem za registraciju progiba na sredini ispitnog uzorka (točnost mjerenja od 0,01 mm).



Slika 14. *Dijagram opterećenja uzorka*

Vrijednosti sila i progiba odčitane su sa dijagrama opterećenja (sl. 14). Područje elastične deformacije drvnih pločastih materijala određeno je eksperimentalno. To je područje djelovanja

sile od F_1 do F_2, gdje se uzorak nakon naprezanja pod opterećenjem vraća u prvobitni položaj. Progib (a) nam pokazuje koliko se ispitni uzorak može opteretiti, a da pritom ne nastupi trajna deformacija. Ispitni uzorak počinje se naprezati pri 10 % maksimalnog opterećenja, a nakon 40 % maksimalnog opterećenja prelazi u zonu plastičnosti i dolazi do zaostalih trajnih deformacija. Područje plastičnosti je područje djelovanja sile od F_2 do F_{max}. Maksimalno opterećenje (F_{max}) je točka loma, tj. točka u kojoj je naprezanje veće od čvrstoće materijala. Modul elastičnosti (E_s) izračunava se prema formuli:

$$E_s = \frac{(F_2 - F_1) \times l^3}{4 \times b \times d^3 \times (a_2 - a_1)} \quad \text{....(7)}$$

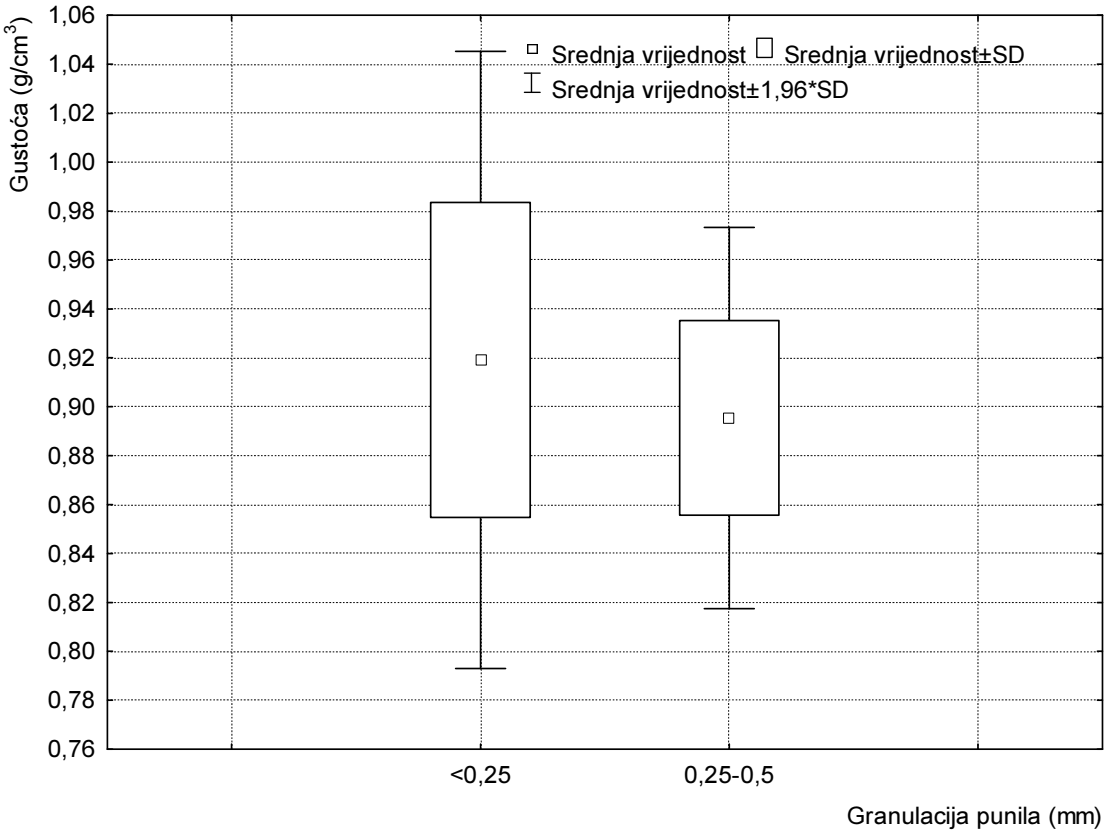
Es – modul elastičnosti savojne čvrstoće, MPa
(F_2-F_1) – porast sile na pravocrtnom dijelu krivulje, MPa
l – razmak oslonaca, mm
b – širina ispitnog uzorka, mm
d – debljina ispitnog uzorka, mm
(a_2-a_1) – povećanje progiba na sredini duljine ispitnog uzorka, mm

6. Rezultati

6.1. Gustoća

Tablica 2. *Vrijednosti gustoće ispitnih uzoraka ploča WPC*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (g/cm³)	**Minimum** (g/cm³)	**Maksimum** (g/cm³)	**Standardna devijacija**
< 0,25	10	0,919	0,808	1,001	0,064
0,25 - 0,5	10	0,895	0,829	0,937	0,039



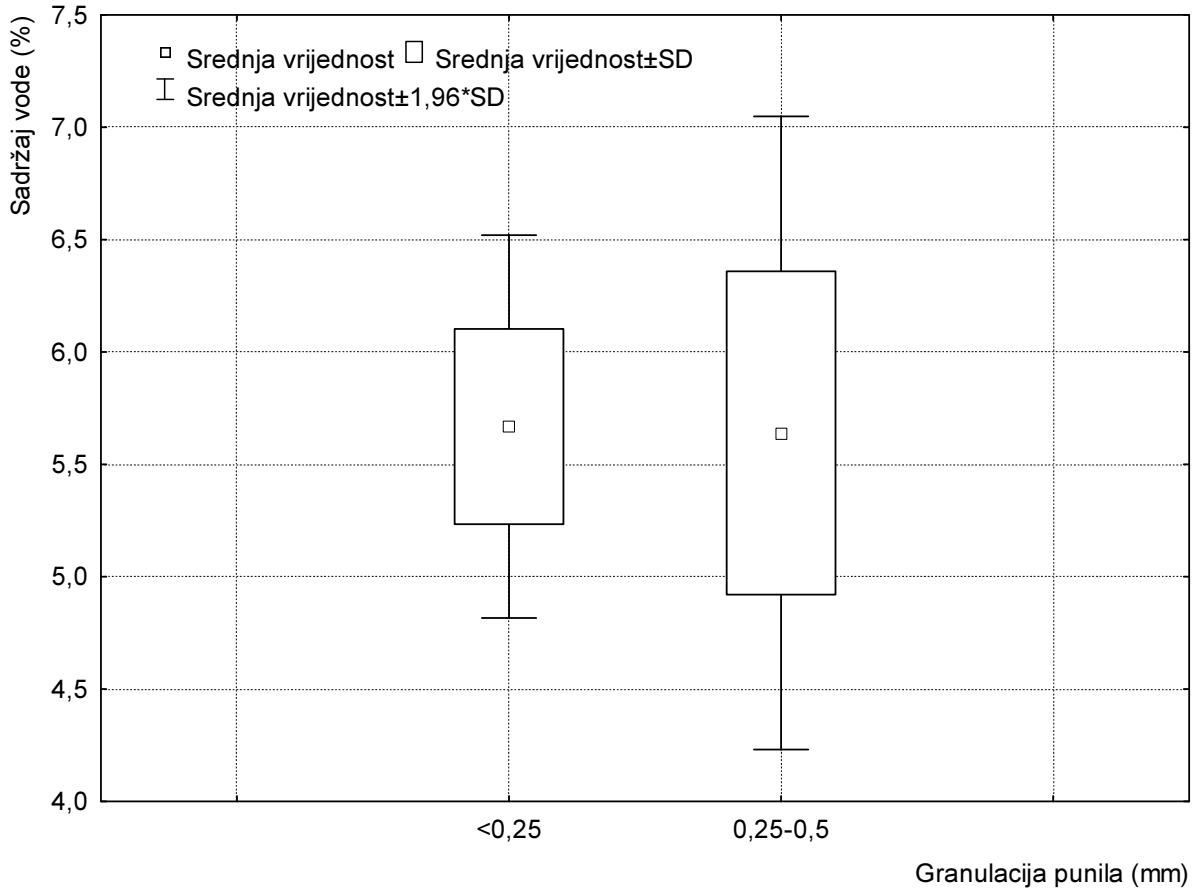
Slika 145. *Grafički prikaz gustoće pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC*

Ispitivanje gustoće ispitnih uzoraka pokazuje kako su srednje vrijednosti približno slične. Srednja vrijednost gustoće WPC koji je izrađen sa sitnijim drvnim brašnom (0,25 mm) iznosi 0,919 g/cm³ i veća je nego srednja vrijednost gustoće uzorka koji je sačinjen od krupnijeg drvnog brašna (0,355-0,5 mm), čija gustoća iznosi 0,895 g/cm³. Logično je da uzorak sa sitnijim drvnim brašnom posjeduje veću gustoću zbog tanjeg sloja i zbijenosti čestica. Srednja vrijednost debljine uzoraka WPC sa sitnijim drvnim brašnom bila je manja (3,027 mm) nego kod uzoraka sa krupnijim drvnim brašnom (3,122 mm), stoga je i logično da je gustoća uzoraka sa sitnijim brašnom veća jer su gustoća i debljina uzorka u obrnuto proporcionalnom odnosu.

6.2. Sadržaj vode

Tablica 3. *Vrijednosti sadržaja vode ispitnih uzoraka WPC*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (%)	**Minimum** (%)	**Maksimum** (%)	**Standardna devijacija**
< 0,25	10	5,67	4,97	6,63	0,43
0,25 - 0,5	10	5,64	3,94	6,67	0,72



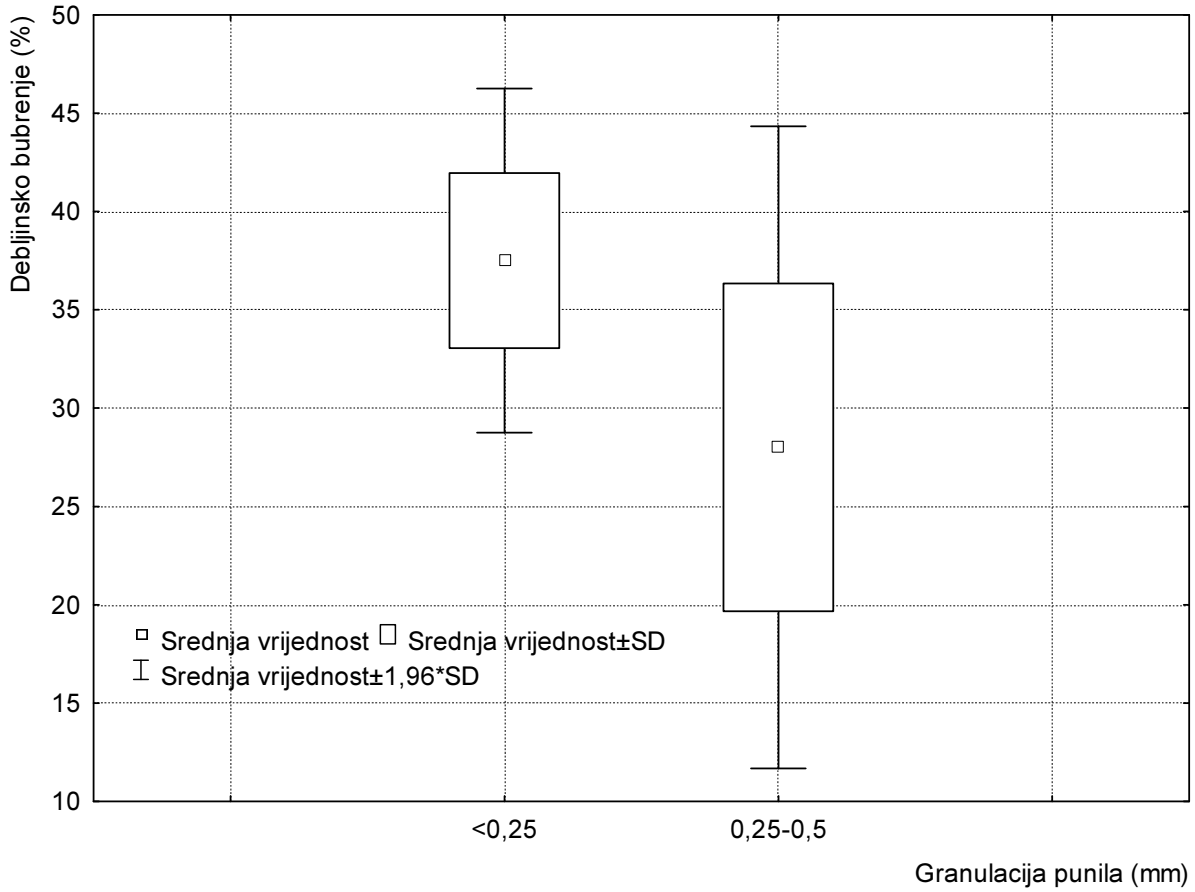
Slika 156. *Grafički prikaz sadržaja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC*

Nakon sušenja ispitnih uzoraka 24 sata u sušioniku pri konstantnoj temperaturi od 103 ± 2°C, oni se vade iz sušionika. Na osnovi razlike mase uzorka u zrakosuhom sranju i apsolutno suhom stanju, odnosno prije i poslije tretmana u sušioniku, rezultati pokazuju kako u vrijednostima sadržaja vode nema prevelike razlike. Prosječna vrijednost sadržaja vode za uzorke WPC koji su izrađeni od sitnijeg brašna neznatno je veća od prosjeka sadržaja vode kod uzoraka izrađenih primjenom drvnog brašna veće granulacije čestica te iznosi 5,67%.

6.3. Debljinsko bubrenje – 2 sata

Tablica 4. *Vrijednosti debljinskog bubrenja ispitnih uzoraka WPC*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (%)	**Minimum** (%)	**Maksimum** (%)	**Standardna devijacija**
< 0,25	10	37,507	29,543	42,236	4,461
0,25 - 0,5	10	28,010	16,808	40,718	8,333



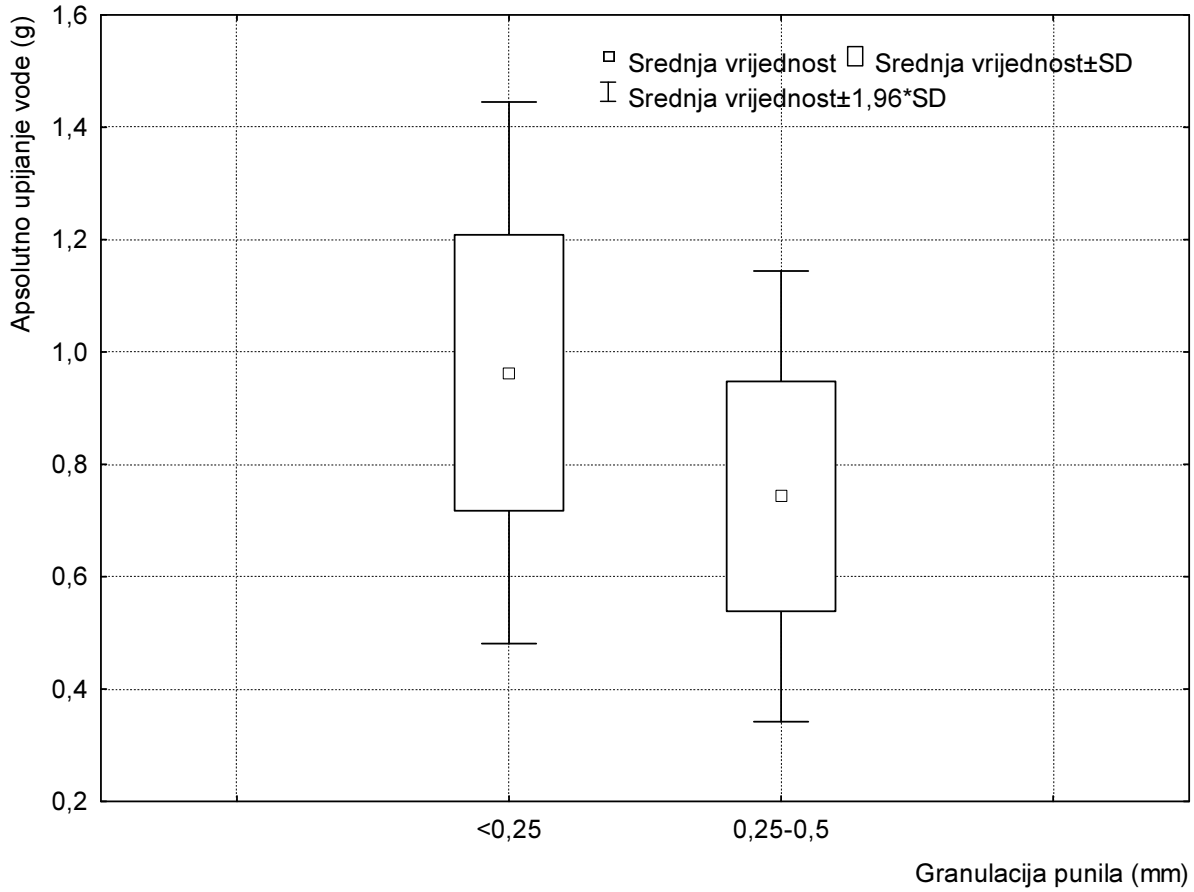
Slika 167. *Grafički prikaz debljinskog bubrenja pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC*

Nakon izlaganja uzoraka WPC djelovanju vode kroz 2 sata, uzorcima se izmjerila debljina, a rezultati ispitivanja su pokazali kako je bubrenje uzoraka izrađenih primjenom sitnijeg drvnog brašnom veće nego na uzorcima izrađenima od krupnijeg brašna. Iznosi debljinskog bubrenja za uzorke izrađene sa sitnijim brašnom skoro su za 10% veći nego od uzoraka sa krupnijim brašnom. Razlog tomu je najvjerojatnije činjenica što sitnije drvno brašno ima daleko veću specifičnu površinu preko koje se može odvijati proces sorpcije vode, a uz to razlog je svakako i brojnost čestica u ukupnoj masi punila dodanoj u rastopljenu polimernu masu koja je veća u slučaju čestica manje debljine.

6.4. Apsolutno upijanje vode

Tablica 5. *Vrijednosti apsolutnog upijanja vode ispitnih uzoraka WPC*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (g)	**Minimum** (g)	**Maksimum** (g)	**Standardna devijacija**
< 0,25	10	0,96	0,67	1,45	0,246
0,25 - 0,5	10	0,74	0,56	1,24	0,205



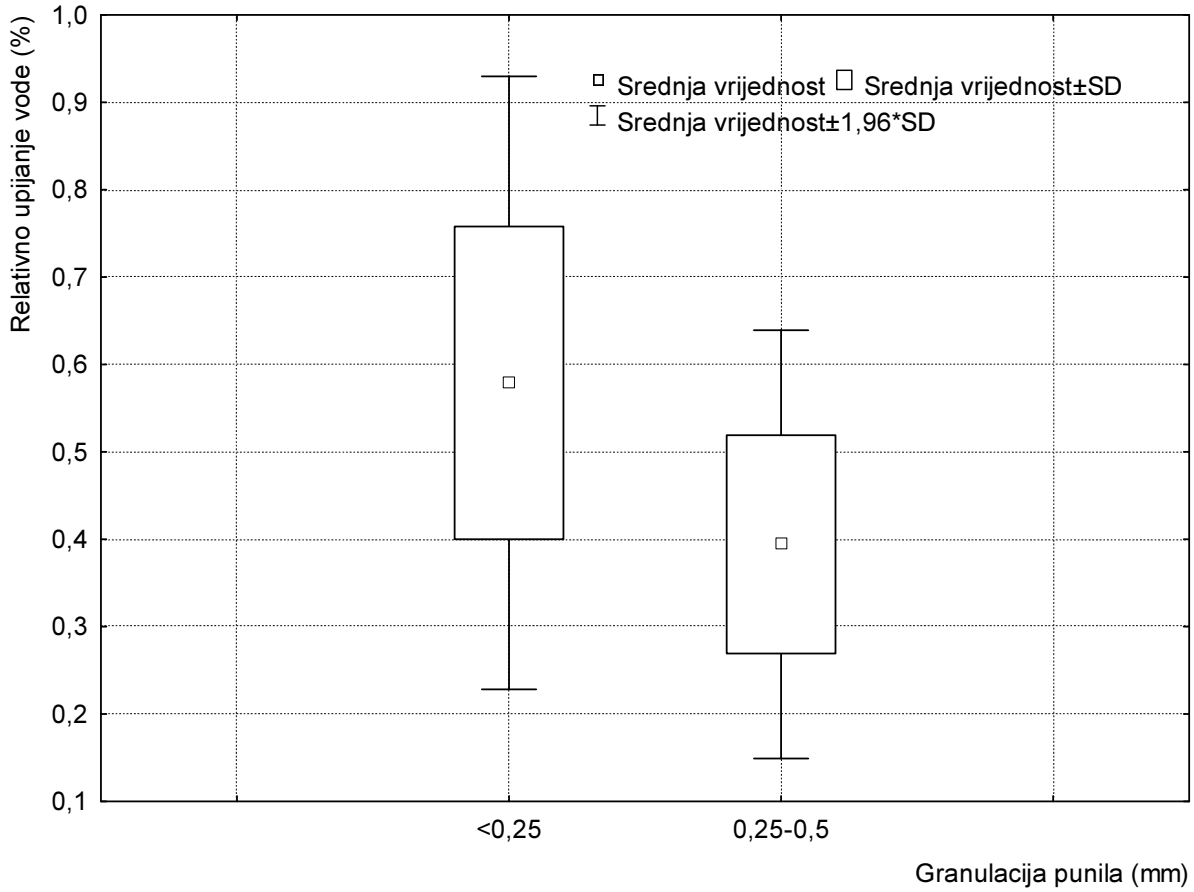
Slika 178. *Grafički prikaz apsolutnog upijanja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC*

Vrijednosti apsolutnog upijanja vode smo dobili razlikom masa uzoraka prije i poslije potapanja u vodi, te je ispitivanjem utvrđeno da su vrijednosti upijanja vode veći kod ispitnih uzoraka izrađenih sa sitnijim drvnim brašnom iako vrijednosti ne odstupaju previše jedna od druge. Vrijednosti apsolutnog upijanja vode kod uzoraka izrađenih sa sitnijim brašnom iznosi 0,96%, dok je kod uzoraka od krupnijeg brašna taj iznos bio 0,74%. Ovi rezultati u skladu su sa rezultatima debljinskog bubrenja.

6.5. Relativno upijanje vode

Tablica 6. *Relativno upijanje vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (%)	**Minimum** (%)	**Maksimum** (%)	**Standardna devijacija**
< 0,25	10	0,58	0,37	0,97	0,179
0,25 - 0,5	10	0,39	0,28	0,71	0,125



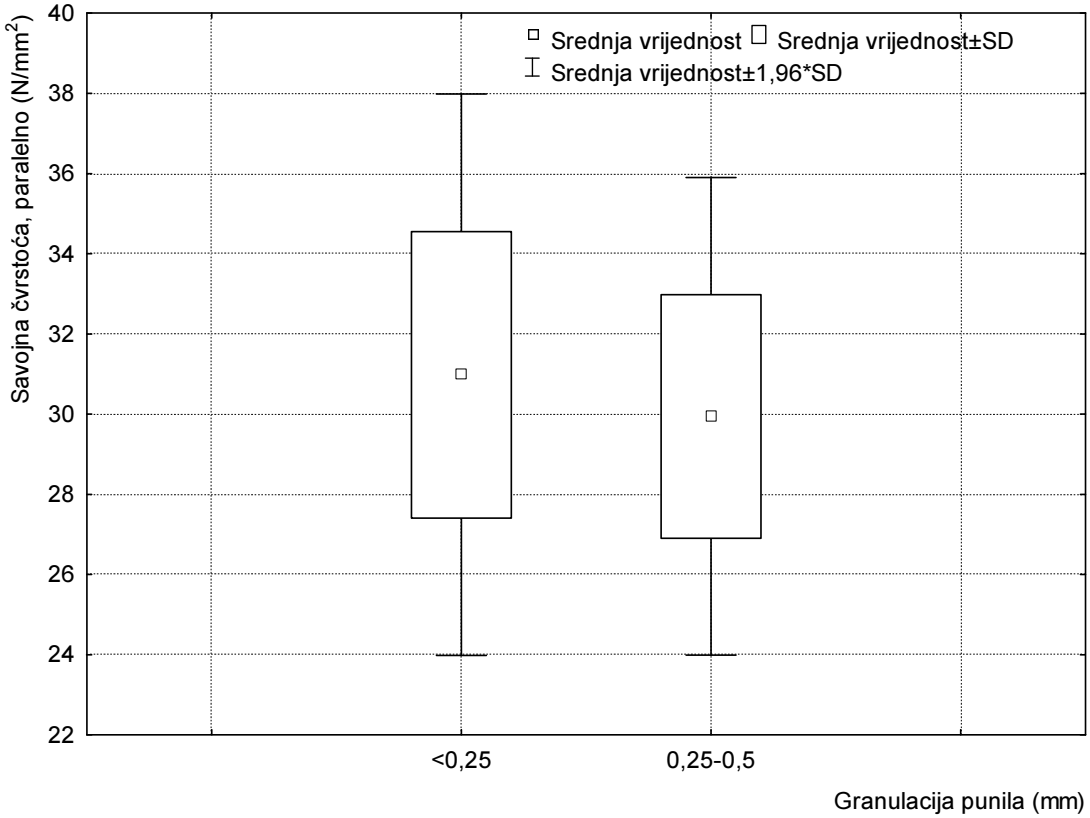
Slika 189. *Grafički prikaz relativnog upijanja vode pojedinih grupa uzoraka eksperimentalnih WPC*

Vrijednosti relativnog upijanja vode pokazuju kako su vrijednosti u istom omjeru kao i rezultati apsolutnog upijanja vode, te pokazuju kako je relativno upijanje vode veće kod uzoraka koju su izrađeni sa sitnijim drvnim brašnom kao punilom. Razlog tome je već navedena povećana sorpcija vode u slučaju čestica drvnog brašna granulacije ispod 0,25 mm. Promatrajući vrijednosti debljinskog bubrenja i oba ispitivana svojstva upijanja vode, lako se može zaključiti da čestice drva u središnjem sloju uslojene konstrukcije WPC nisu u potpunosti inkapsulirane u plastiku. Naime, da je tome tako i navedene vrijednosti bile bi daleko niže. No u narednima ispitivanjima trebalo bi utvrditi i koliki je utjecaj sorpcije vode furnira korištenog za izradu WPC na promatrana svojstva.

6.6. Savojna čvrstoća

Tablica 7. *Vrijednosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (paralelno sa smjerom vlakanaca furnira)*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (MPa)	**Minimum** (MPa)	**Maksimum** (MPa)	**Standardna devijacija**
< 0,25	5	30,98	24,93	34,28	3,57
0,25 - 0,5	5	29,94	27,36	34,62	3,04

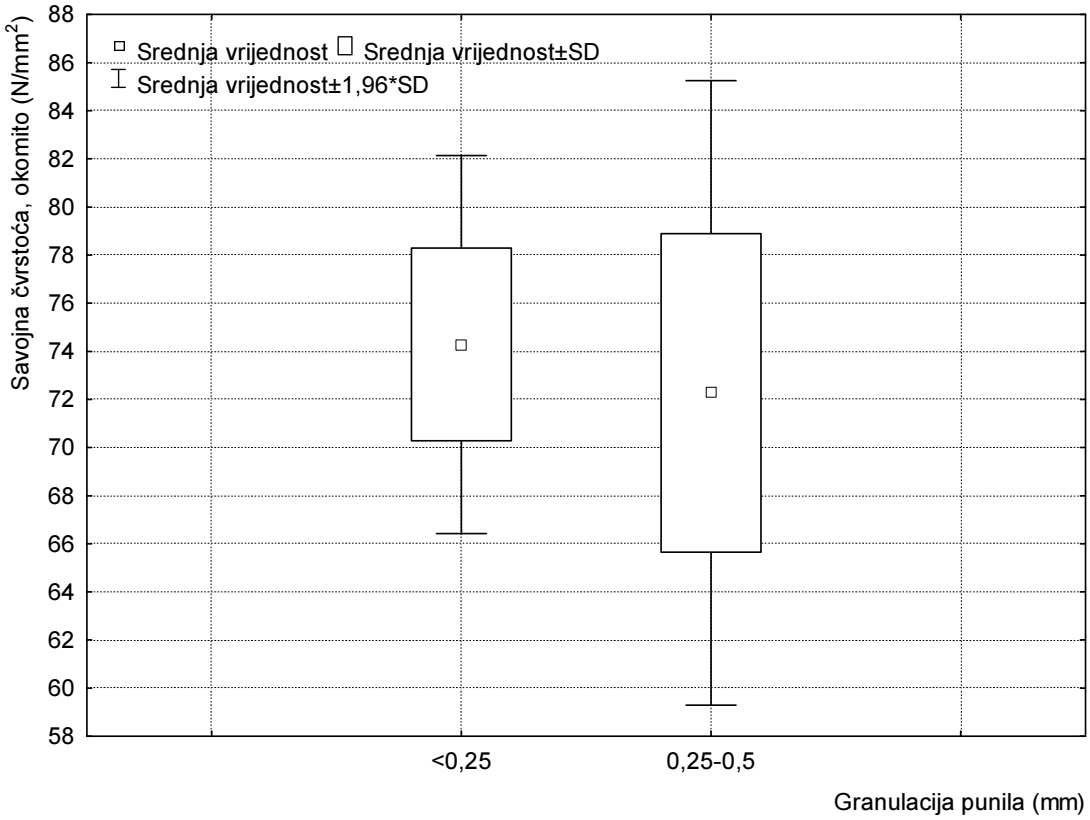


Slika 19. *Grafički prikaz savojne čvrstoće uzoraka eksperimentalnih WPC (paralelno sa smjerom vlakanaca furnira)*

Ispitivanje savojne čvrstoće odrađeno je na uzorcima WPC sa sitnim i krupnijim drvnim brašnom iskrojenima u dva smjera. Točnije u smjeru paralelno sa smjerom drvnih vlakanaca na furniru lica i okomito na taj smjer. U slučaju ispitivanja uzoraka iskrojenih u smjeru paraleleno rezultati pokazuju kako je srednja vrijednost savojne čvrstoće na uzorku koji je izrađen od sitnijeg brašna veća nego na uzorku drvno plastičnog kompozita izrađenog primjenom krupnijeg drvnog brašna. Iako se vrijednosti razlikuju za otprilike 1%, ovakvi rezultati sugeriraju da je u procesu lijevanja smjese drvnog brašna i polimera i kasnijeg prešanja kompozita, u slučaju kompozita izrađenih primjenom sitnijeg drvnog brašna, ostvarena bolja veza na relaciji polimer-punilo.

Tablica 8. *Vrijednosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira)*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (MPa)	**Minimum** (MPa)	**Maksimum** (MPa)	**Standardna devijacija**
< 0,25	5	74,28	70,17	80,91	4,01
0,25 - 0,5	5	72,23	64,21	78,39	6,62



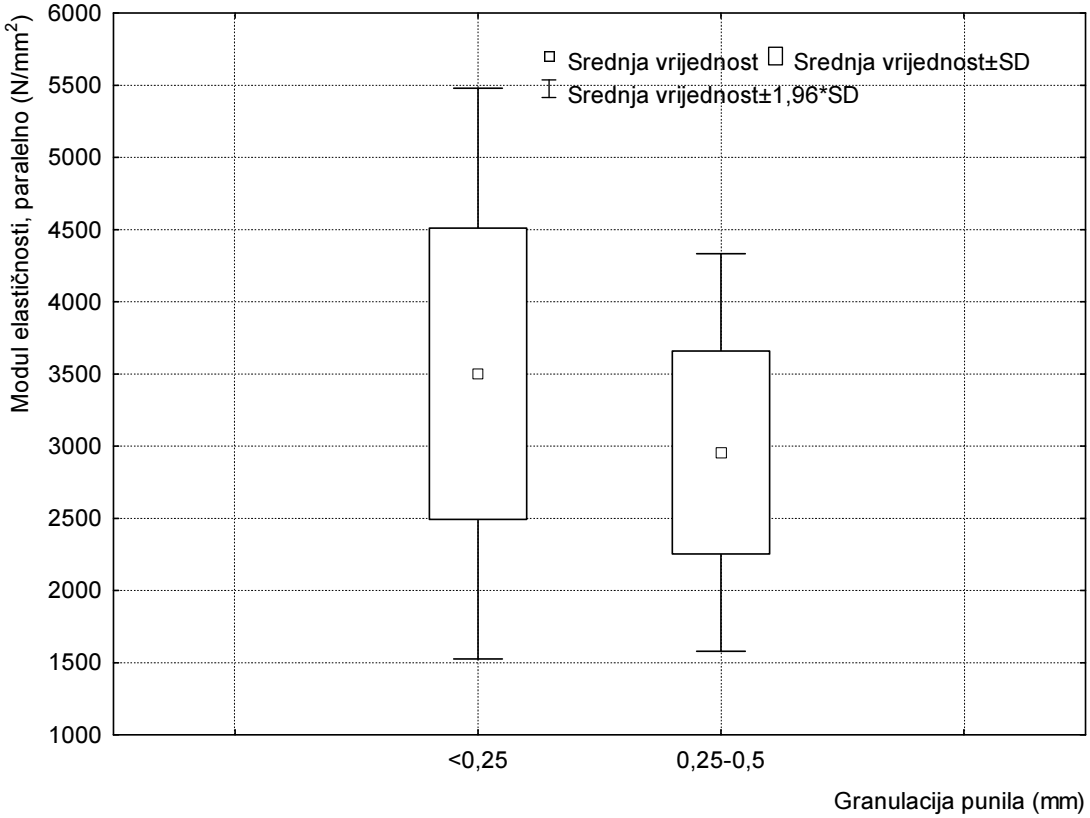
Slika 20. *Grafički prikaz savojne čvrstoće uzoraka eksperimentalnih WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira)*

U slučaju izračunavanja savojne čvrstoće na uzorcima eksperimentalnih WPC ispitanih u smjeru okomito na smjer vlakanaca furnira također su zabilježene podjednake srednje vrijednosti savojne čvrstoće te se razlikuju u samo 2% vrijednosti. Uspoređujući sva 4 slučaja, vrijednosti pokazuju kako uzorci koji su s gornje strane (na koju izravno djeluje sila) bili obloženi furnirom čija su vlakanca položena u smjeru širine uzorka, dok su s donje strane imali furnir čija su vlakanca položena u smjeru duljine uzorka, imali skoro 2,5 puta veću savojnu čvrstoću. Uzorci kod kojih je orijentacija furnira bila suprotna imaju manju savojnu čvrstoću jer dolazi prije do loma po godu, dok se uzorci koji imaju uzdužni furnir na donjoj strani mogu jače savinuti zbog rastezljivosti pa će i lom nastupiti kasnije.

6.7. Modul elastičnosti savojne čvrstoće

Tablica 9. *Modul elastičnosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (paralelno sa smjerom vlakanaca furnira)*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (MPa)	**Minimum** (MPa)	**Maksimum** (MPa)	**Standardna devijacija**
< 0,25	5	3502,2	2075	4872	1008,85
0,25 - 0,5	5	2957	2586	4207	702,75

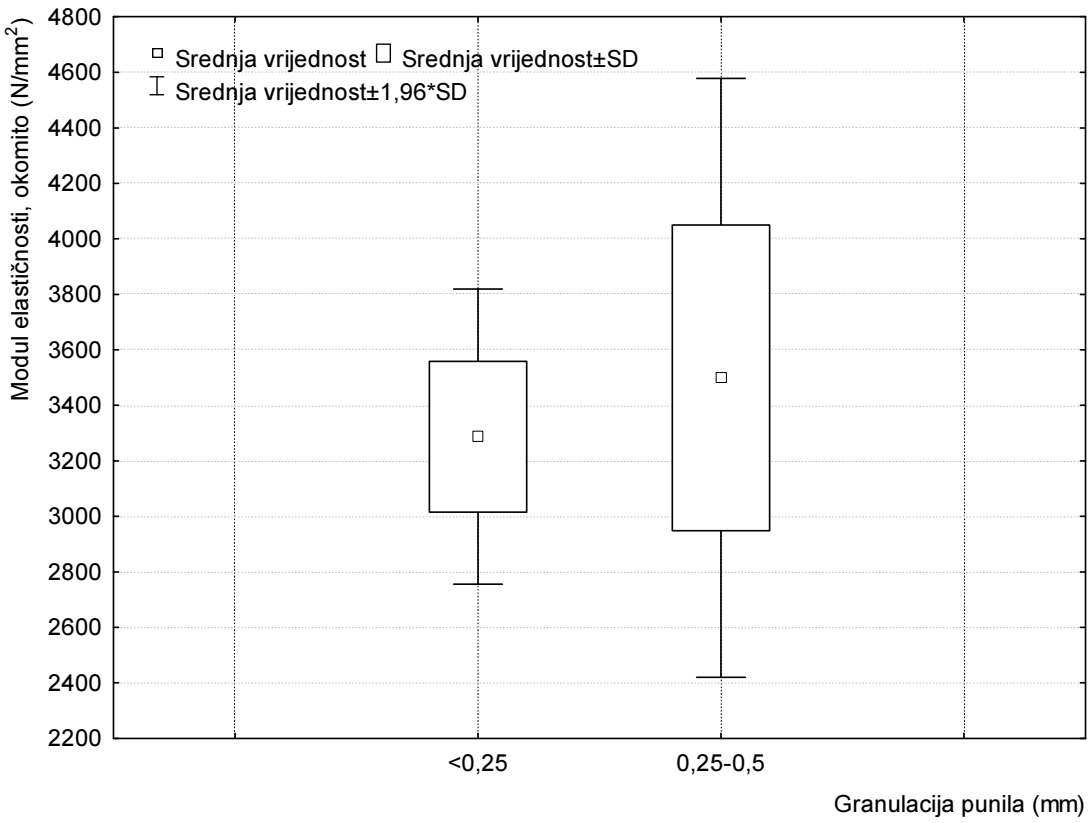


Slika 21. *Grafički prikaz modula elastičnosti uzoraka eksperimentalnih WPC (paralelno sa smjerom vlakancima furnira)*

Što se tiče vrijednosti modula elastičnosti, gledajući uzorke koji su s donje strane imali furnir orijentiran u smjeru širine uzorka, odnosno gdje je sila direktno djelovala na furnir koji je bio postavljen u smjeru duljine uzoraka, veća prosječna vrijednost zabilježena je kod uzorka sa sitnijim drvnim brašnom. Prosječna vrijednost uzoraka sa sitnijim drvnim brašnom iznosila je 3502,2 MPa, dok je kod uzoraka sa krupnijim drvnim brašnom srednja vrijednost modula elastičnosti iznosila 2957 MPa. Vrlo visoke vrijednosti modula elastičnosti u oba slučaja mogu se povezati direktno sa savojnim svojstvima obložnih furnira, a razlika pripisati isključivo boljoj ili lošijoj kohezijsko-adhezijskoj čvrstoći središnjeg sloja iz polimera punjenog drvnim brašnom.

Tablica 10. *Modul elastičnosti savojne čvrstoće ispitnih uzoraka WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira)*

Granulacija punila (mm)	**Broj uzoraka** (n)	**Aritmetička sredina** (MPa)	**Minimum** (MPa)	**Maksimum** (MPa)	**Standardna devijacija**
< 0,25	5	3287,4	3004	3682	271,54
0,25 - 0,5	5	3499	2859	4047	550,46



Slika 22. *Grafički prikaz modula elastičnosti uzoraka eksperimentalnih WPC (okomito na smjer vlakanaca furnira)*

U slučaju ispitivanja modula elastičnosti okomito na smjer vlakanaca furnira veća prosječna vrijednost modula elastičnosti zabilježena je kod uzorka sa krupnijim brašnom. Iznos modula elastičnosti za uzorke izrađene primjenom sitnije granulacije drvnog brašna iznosi 3287,4 MPa, dok taj iznos kod uzorka izrađenih primjenom krupnijeg brašna iznosi 3499 MPa. Ako usporedimo rezultate za sva 4 seta uzoraka, možemo primjetiti da najveću prosječnu vrijednost modula elastičnosti ima grupa uzoraka WPC ispitana u smjeru paralelno sa vlakancima furnira izrađena od sitnijih frakcija čestica drvnog punila.

7. Zaključak

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata mogu se donjeti slijedeći zaključci:

- drvno plastične kompozitne materijale moguće je izraditi metodom uslojavanja,
- gustoća ispitanih WPC uzoraka niža je od gustoće komercijalnih WPC izrađenih ekstruzijom ($\approx 1{,}0$ g/cm^3),
- mehanička svojstva izrađenih drvno plastičnih kompozita vrlo su visoka,
- veličina čestica punila većim dijelom utječe na fizikalna, a manjim dijelom na mehanička svojstva,
- smjerovi vlakanaca na materijalima za oblaganje kompozita uvelike diktiraju vrijednosti ispitanih mehaničkih svojstava,
- ispitanom metodom izrade WPC moguće je izraditi materijale poboljšanih estetskih svojstava, budući da se u procesu izrade na površine materijala direktno aplicira furnir, a ista se dodatno može bojiti, močiti ili naknadno obložiti dodatnim listom plemenitog furnira.

Literatura

1. Bekhta, P.; Lyutyy P., Ortynska G., 2016: Effects of Different Kinds of Coating Materials on Properties of Flat Pressed WPC Panels. Drvna industrija 67(2): 113-118.
2. Botros, M., 2003: Development of new generation coupling agents for wood-plastic composites. In: „Intertech Conference: The global outlook for natural and wood composites“, p.17.
3. Buzarovska, A.; Bogoeva-Gaceva, G.; Grozdanov, A.; Avella, M,; Gentile, G.; Errico, M., 2008: Potential use of rice straw as filler in eco-composite materials. Australian Journal of Crop Science 1(2): 37-42
4. Digabel, F. L.; Boquillion, N.; Dole, P.; Monties, B.; Averous, L., 2004: Properties of thermoplastic composites based on wheat-straw lignocellulosic fillers. Journal of Applied Polymer Science 93: 428-436.
5. H'NG, P. S.; Lee, A. N.; Meng, H. C., 2008: Physical and bending properties of injection moulded wood plastic composite boards. Journal of Engineering and Applied Sciences 3(5): 13-19.
6. Klyosov, A. A., 2007: Wood-Plastic Composites, John Wiley & Sons, Inc., New York.
7. Lyutyy, P.; Bekhta, P.; Sedliacik, J.; Ortynska, G., 2014: Properties of flat-pressed wood-polymer composites made using secondary polyethylene." Acta Facultatis Xylologiae Zvolen 56(1): 39-50.
8. Mali, J.; Sarsama, P.; Suomi-Lindberg, L.; Metsa-Kortelainen, S.; Peltonen, J.; Vilkki, M.; Koto, T.; Tiisala, S., 2003: Woodfibre-plastic composites. 1-70
9. Rahman, K. S.; Islam, M. N.; Rahman, M. M.; Hannan, M. O.; Dungani, R.; Khalil, H. A., 2013: Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties. SpringerPlus, 2(1), 629-635.
10. Stark, N. M., 1997: Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites. In „Intertech Conference: Functional fillers for thermoplastics & thermosets“, p. 16.
11. Španić N.; Jambreković, V.; Antonović, A., 2010: Basic Materials for Manufacturing Wood-Plastic Composites. Drvna industrija 61(4): 259-269.
12. Tamrakar, S., Shaler, S. M., Lopez-Anido, R. A., Gardner, D. J., West, C. H., Han, Y., Edgar, R., 2012: Mechanical Property Characterization of Fiber-Reinforced Polymer Wood-Polypropylene Composite Panels Manufactured Using a Double Belt Pressing Technology. Journal of Materials in Civil Engineering, 24(9), 1193-1200.