

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dalibor MRŠIČ

**VPLIV VELIKOSTI IN DELEŽA IVERI NA
LASTNOSTI LESNO-POLIMERNIH KOMPOZITOV**

MAGISTRSKO DELO

Magistrski študij lesarstva - 2. stopnja

Ljubljana, 2013

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dalibor MRŠIČ

**VPLIV VELIKOSTI IN DELEŽA IVERI NA LASTNOSTI LESNO-
POLIMERNIH KOMPOZITOV**

MAGISTRSKO DELO
Magistrski študij lesarstva - 2. stopnja

**INFLUENCE OF SIZE AND PERCENTAGE OF WOOD PARTICLES
ON PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITES**

M. SC. THESIS
Master Study Programmes

Ljubljana, 2013

Magistrsko delo je zaključek Magistrskega študija Lesarstvo – 2. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za Lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Sergeja Medveda, za recenzentko pa doc. dr. Ido Poljanšek.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr.
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo

Član: prof. dr.
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo

Član: prof. dr.
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo

Datum zagovora:

Magistrsko delo je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega magistrskega dela na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je delo, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identično tiskani verziji.

Dalibor Mršić

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 630*862.9
KG	les/iveri/plastika/LDPE/WPC/kompozit/polimer
AV	MRŠIĆ, Dalibor
SA	MEDVED, Sergej(mentor)/POLJANŠEK, Ida (recenzentka)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2013
IN	VPLIV VELIKOSTI IN DELEŽA IVERI NA LASTNOSTI LESNO-POLIMERNIH KOMPOZITOV
TD	Magistrsko delo (Magistrski študij - 2. stopnja)
OP	VII, 35 str., 27 pregl., 14 sl., 10 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	V zadnjih 10 letih je uporaba lesno plastičnih kompozitov (wood plastic composites - WPC) za mnogo različnih izdelkov, tako za zunanjo kot tudi notranjo uporabo, zelo narasla. Proizvodnja le-teh poteka na več različnih načinov: izdelujemo jih naprimer s stiskanjem, z ekstrudiranjem, z vbrizgavanjem v kalup, itd.; poleg tega pa lahko s spreminjanjem komponent v mešanici vplivamo na lastnosti kompozita. Z različnimi dodatki/primesmi kot so lepila, barvila, polnila, itd., lahko še dodatno vplivamo na lastnosti kompozita. Spreminjali smo velikosti lesnih iveri ter njihov delež, nato pa z različnimi testi ugotavljali, kako te spremembe vplivajo na lastnosti WPC-ja. Ugotovili smo, da lahko na mehanske in fizikalne lastnosti vplivamo tako z velikostjo iveri kot tudi z njihovim deležem. Z višjim deležem lesnih iveri in večjimi dimenzijami iveri izboljšamo mehanske lastnosti kot so: upogibna trdnost, modul elastičnosti in tlačna trdnost; a s tem izgubimo na dimenzijski stabilnosti, nabreku in navzemu vode. Z višjim deležem lesa in večjimi frakcijami lesa omogočimo boljšo sorpcijo vode v notranjost kompozita; zato sta delež in velikost iveri pomembna za specifične proizvode, glede na namen uporabe lesno plastičnega kompozita.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du2

DC UDC 630*862.9

CX wood/particles/plastic/LDPE/WPC/composite/polymer

AU MRŠIĆ, Dalibor

AA MEDVED, Sergej (supervisor)/POLJANŠEK, Ida (co-advisor)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2013

TI INFLUENCE OF SIZE AND PERCENTAGE OF WOOD PARTICLES
ON PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITES

DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)

NO VII, 35 p., 27 tab., 14 fig., 10ref.

LA sl

AL sl/en

AB In the past 10 years, wood plastic composites gained high rise of use for wide range of products for both interior and exterior. There are many different ways of their production, such as: pressing, extrude system, mold injection, etc. Next to different production systems we can also effect the properties of WPC by changing the material used in the mixture. With different additives we can influence the properties of the composite even more. We used different sizes and percentages of wood particles to build a composite. Then we performed different tests and monitored the influence of wood particles on properties of WPC. We found out that we can have influence on mechanical and physical properties with both variables. Using higher percentage and bigger sizes of wood particles we improve mechanical properties such as bending strength, module of elasticity and compressive strength, but we deteriorate the dimension stability, swelling and uptake of water. Using higher percentage and bigger wood particles we get better sorption of water in the interior of composite. That is why the percentage and particle size are very important for specific products regarding the purpose of use of a wood plastic composite.

KAZALO VSEBINE

str.

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	Napaka! Zaznamek ni definiran.
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VII
1 UVOD.....	1
1.1 PROBLEM	1
1.2 PREDPOSTAVKA.....	2
1.3 CILJI.....	2
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1.1 Tipi proizvodnje.....	4
2.1.1.1 Izdelava s stiskanjem	4
2.1.1.2 Izdelava z ekstrudorjem.....	5
2.1.1.3 Izdelava z vbrizgavanjem v kalup	6
2.1.2 Prednosti lesno plastičnih kompozitov	7
3 MATERIALI IN METODA DELA	8
3.1 PRIPRAVA IVERI.....	8
3.2 PRIPRAVA MEŠANICE	9
3.3 IZDELAVA PLOŠČ.....	10
3.4 DOLOČANJE MEHANSKIH IN SORPCIJSKIH LASTNOSTI PLOŠČ	12
3.4.1 Določanje upogibne trdnosti.....	12
3.4.2 Ugotavljanje gostote in gostotnega profila	13
3.4.2.1 Ugotavljanje gostote	13
3.4.2.2 Merjenje gostotnega profila.....	13
3.4.3 Ugotavljanje debelinskega nabreka	14
3.4.4 Ugotavljanje nabreka pri povišani vlažnosti.....	15
3.4.5 Testiranje lezenja.....	15
3.4.6 Ugotavljanje tlačne trdnosti.....	16
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	17
4.1 UPOGIBNA TRDNOST	17
4.2 GOSTOTNI PROFIL, GOSTOTA IN NABREK	20
4.3 NAVZEM VLAGE.....	23
4.4 LEZENJE.....	26
4.5 TLAČNA TRDNOST.....	29
4.6 RAZPRAVA VSEH POVPREČNIH VREDNOSTI.....	31
5 SKLEPI.....	33
6 VIRI	34

KAZALO SLIK

str.

Slika 1: Delež uporabe WPC-jev glede na sektor industrije iz leta 2008 (Jin Kuk Kim in P. Kaushik 2010).....	4
Slika 2: Shema industrijske izdelave WPC-ja s stiskalnico (Pallmann 2010).....	5
Slika 3: Shematičen prikaz proizvodnje WPC-ja z ekstrudorjem (Medved 2010).....	5
Slika 4: Shematski prikaz dvojnega rotacijskega sistema z vijakoma, ki sta postavljena konično	6
Slika 5: Shematičen prikaz vbrizgavanje v kalup (Jin Kuk Kim in P. Kaushik 2010).....	6
Sliki 6 in 7: Laboratorijski sejalec in peč za sušenje iveri.	8
Slika 8: Lesen kalup z mešanico lesenih iveri in plastične mase	10
Slika 9: Lesno plastična mešanica v stiskalnici obdana s furnirjem pred stiskanjem	11
Sliki 10 in 11: Testiranje upogibne trdnosti na napravi Zwick Roell.....	13
Slika 12: Shema naprave za meritev gostotnega profila (Benedičič 2007).....	14
Slika 13: Na sliki lahko vidimo razlike v površinah, kjer so nekatere povsem »zaprte« s plastično maso, nekatere pa nekoliko manj. To se pozna pri nabreku, ki je pri slednjih seveda višji.	15
Slika 14: Testiranje tlačne trdnosti vzorcev z napravo Zwick Roell.....	16

KAZALO PREGLEDNIC

str.

Preglednica 1: Pregled vseh izdelanih lesno plastičnih kompozitov z zgradbo	9
Preglednica 2: Meritve upogibne trdnosti kompozita 1 s povprečnimi vrednostmi.....	17
Preglednica 3: Meritve upogibne trdnosti kompozita 2 s povprečnimi vrednostmi.....	17
Preglednica 4: Meritve upogibne trdnosti kompozita 3 s povprečnimi vrednostmi.....	18
Preglednica 5: Meritve upogibne trdnosti kompozita 4 s povprečnimi vrednostmi.....	18
Preglednica 6: Meritve upogibne trdnosti kompozita 5 s povprečnimi vrednostmi.....	18
Preglednica 7: Meritve upogibne trdnosti kompozita 6 s povprečnimi vrednostmi.....	19
Preglednica 8: Gostota plošč 1, 2 in 3 pri sestavi 50% lesa + 50% LDPE.....	21
Preglednica 9: Gostota plošč 4, 5 in 6 z različnim deležem lesni iveri in LDPE	21
Preglednica 10: Debelinski nabrek kompozitov 1, 2 in 3 iz 50% lesa + 50% LDPE po 24 urni potopitvi	22
Preglednica 11: Debelinski nabrek kompozitov 4,5 in 6 po 24 urni potopitvi z različnim deležem lesnih iveri in LDPE	22
Preglednica 12: Sprememba debeline in mase pri kompozitih 1,2 in 3 iz 50% lesa + 50% LDPE v važi klimi	23
Preglednica 13: Izračuni povprečnih vrednosti deleža vode v kompozitih 1,2 in 3 s 50% lesa + 50% LDPE izraženi z maso in deležem po končanem sušenju.....	24
Preglednica 14: Sprememba debeline in mase kompozitov 4, 5 in 6 z različnim deležem lesnih iveri in LDPE, ter različno velikostjo lesnih frakcij po izpostavitvi klimi ...	24
Preglednica 15: Izračuni povprečnih vrednosti deleža vode v kompozitih 4,5 in 6 z različnim deležem lesnih iveri in LDPE, ter različno velikostjo lesnih frakcij po končanem sušenju.....	24
Preglednica 16: Meritve lezenja kompozita 1	26
Preglednica 17: Meritve lezenja kompozita 2	26
Preglednica 18: Meritve lezenja kompozita 3	27
Preglednica 19: Meritve lezenja kompozita 4	27
Preglednica 20: Meritve lezenja kompozita 5	27
Preglednica 21: Meritve lezenja kompozita 6	28
Preglednica 22: Meritve tlačne trdnosti kompozita 1	29
Preglednica 23: Meritve tlačne trdnosti kompozita 2	29
Preglednica 24: Meritve tlačne trdnosti kompozita 3	29
Preglednica 25: Meritve tlačne trdnosti kompozita 4	29
Preglednica 26: Meritve tlačne trdnosti kompozita 5	30
Preglednica 27: Meritve tlačne trdnosti kompozita 6	30
Preglednica 28: Povprečne vrednosti vseh meritev po posameznih kompozitih.....	31

1 UVOD

1.1 PROBLEM

Lesno plastični kompoziti so kompromis med naravnim materialom lesom in umetnim materialom plastiko/polimerom. Tako les kot plastika imata dobre in slabe lastnosti, ki jih lahko pri uporabi za lesno plastičen kompozit izkoristimo glede na namen uporabe. Z izdelavo lesno plastičnega kompozita lahko dobimo okolju prijazen efekt z uporabo lesa, poleg tega pa tudi dobre mehanskih lastnosti glede na gostoto. Z dodatkom polimerne mase pa pridobimo druge lastnosti, ki jih sam les nima. Te lastnosti so dimenzijska stabilnost, odpornost proti delovanju vodi/vlagi in elastičnost materiala. Uporaba lesno plastičnih kompozitov je v porastu in optimalna sestava kompozita, glede na željene lastnosti, lahko pomeni velik prihranek. Lesno plastični kompoziti se uporabljajo predvsem za izdelke, ki jih lahko uporabljamo izven stavb in so izpostavljeni vremenskim vplivom. Na trgu lahko najdemo produkte kot so zunanje talne obloge za terase in vrtove, zunanje talne obloge na javnih kopališčih oz. plažah ob morju, zunanje vrtno pohištvo, itd.. Trenutno je uporaba lesno plastičnih kompozitov za izdelke za notranjo uporabo zelo nizka. S primerno optimizacijo kompozita, bi lahko delež izdelkov za interier povečali. Lesno plastični kompoziti imajo boljšo dimenzijsko stabilnosti in nižji debelinski nabrek v primerjavi z ivernimi ploščami, zato bi jih lahko uporabljali tudi v okolju, kjer je običajno višja relativna zračna vlažnost. Lastnosti lesno plastičnih kompozitov so odvisne od številnih dejavnikov, med katerimi so najpomembnejše lastnosti sintetičnega polimera oz. plastika ter lesa. S pravilnim razmerjem med deležem lesnih frakcij in polimerom lahko zagotovimo fizikalne in mehanske lastnosti kompozita glede na potrebe produkta, saj delež posameznega gradnika (les, polimer) določa njegovo ceno in tako prihranimo pri stroških proizvodnje.

1.2 PREDPOSTAVKA

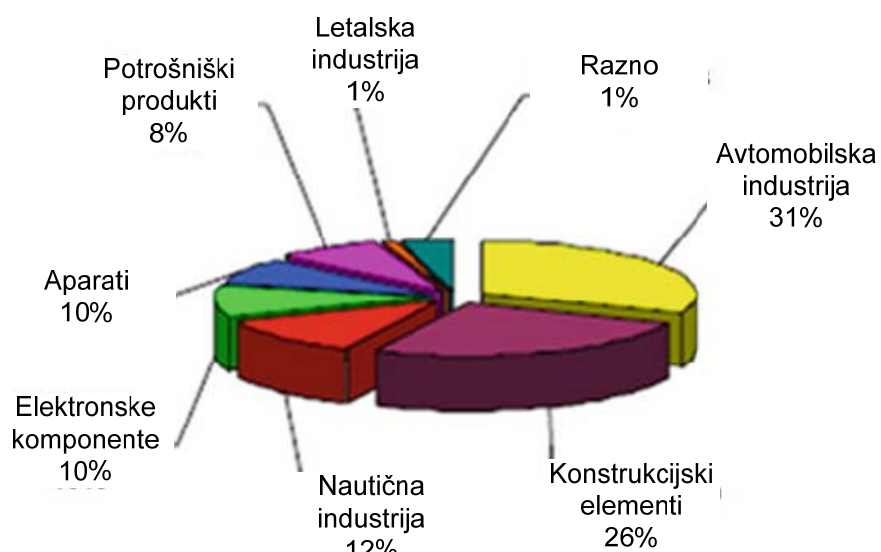
Predvidevamo, da bodo imele plošče z višjim deležem polimera boljše fizikalne lastnosti, kot so odpornost proti vodi/vlagi, dimenzijska stabilnost itd., ter da bodo elastične lastnosti boljše. Prav tako pa menimo, da bodo plošče na ta način izgubile mehanske lastnosti kot so tlačna in upogibna trdnost. Vica versa pa predvidevamo, da bodo plošče z višjim deležem lesnih frakcij pridobile na mehanskih lastnostih in izgubile na fizikalnih lastnostih.

1.3 CILJI

Primarni cilj je bil izdelava lesno plastičnega kompozita s stiskanjem v obliki plošče z uporabo lesnih iveri in polietilena nizke gostote (LDPE – low density polyethylene), ter brez uporabe drugih dodatkov. S študijo smo želeli določiti kako sestava vpliva na fizikalne in mehanske lastnosti lesno plastičnega kompozita. Primerjati želimo več različnih fizikalnih in mehanskih lastnosti kompozita in ugotoviti ali je kakšna povezava s sestavo kompozita.

2 SPLOŠNI DEL

Wood plastic composite oz. splošno znan kot kratica WPC je lesno plastični kompozit izdelan iz lesnih frakcij, plastične mase/polimera in drugih dodatkov. Najbolj običajna proizvodnja je izdelava panelov iz lesne mase in plastike tako, da jih izdelujejo povsem enako kot 100% plastične produkte (Ballerini 2004, Charrier 1999, Groom, Shaler, Mott.1996, Simonsen 1995). Predstavlja kompozit, ki ga trenutno ne reciklirajo, a je vseeno okolju bolj prijazen kot sama plastična masa, saj za njegovo proizvodnjo uporabljajo že reciklirano plastiko in lesne ostanke. Lesni ostanki pa predstavljajo okolju bolj prijazen biološki del lesno plastičnega kompozita. Teoretično je možno reciklirati lesno plastični kompozit, če bi izdelke pri povišani temperaturi pretopili in jih ponovno oblikovali v nov izdelek. Vendar pa bi za uporabo že odrabljenih izdelkov najverjetneje potrebovali preveč časa in denarja za ponovno zbiranje materiala, čiščenje, transport in ponovno proizvodnjo. Zato trenutno recikliranje WPC-jev ekonomsko še ni sprejemljivo. Reciklirajo se zgolj ostanki, ki nastanejo že med samo proizvodnjo prvotnega izdelka in se nato ponovno uporabijo. WPC je v zadnjem desetletju postal eden izmed najbolj dinamičnih sektorjev proizvodnje plastične mase, saj se izdelki iz lesno plastičnih kompozitov uporabljajo za zunanje talne obloge, ograje, razne obloge, robne elemente, klopi v parkih, okna, okvirji vrat, notranje pohištvo, itd.. Končnim izdelkom se lahko površina izdelka v barvah, ki simulirajo izgled lesa, a imajo še vedno zaradi polimera povsem prepoznavno barvo WPC-ja, ki jo je lahko ločiti od pravega lesa. Uporaba WPC-ja glede na različne sektorje industrije kaže na to, kako raznovrstne so možnosti za proizvajalce. Glede na analize uporabe WPC iz leta 2008 je imela najvišji delež avtomobilska industrija in sicer 31% , takoj za njo pa elementi za konstrukcije s 26% tržnega deleža (slika 1).

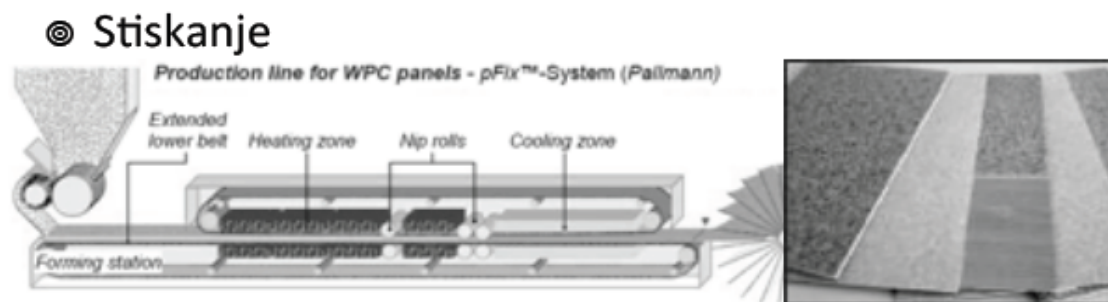


Slika 1: Delež uporabe WPC-jev glede na sektor industrije iz leta 2008 (Jin Kuk Kim in P. Kaushik 2010)

2.1.1 Tipi proizvodnje

2.1.1.1 Izdelava s stiskanjem

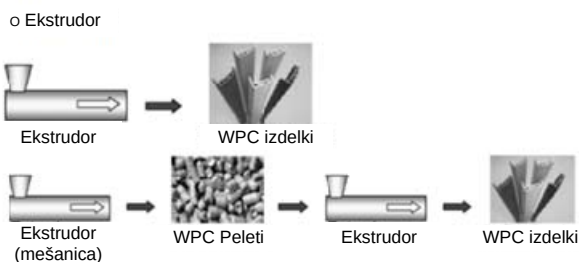
Sistem izdelave WPC plošč je zelo redek in ni veliko primerov s proizvodnjo s stiskanjem. Eno izmed redkih podjetij, ki izdeluje WPC plošče s stiskanjem je Pallmann s patentirano proizvodnjo pFixTM-system. Običajna proizvodnja takih plošč poteka tako, da se sprva zmešajo vse komponente, ki jih želijo v lesno plastičnem kompozitu, nato pa jih postavijo v rotacijski mešalnik z bobnom. Po 10 minutah mešanja zatehtajo pravilno maso mešanice in jo postavijo v kalupni obroč z aluminijastim dnom, prevlečenim s povoskanim papirjem, da se prepreči direkten kontakt mešanice z aluminijem. Nato tudi z zgornje strani postavijo povoskan papir in z aluminijem prevlečenim zgornjim delom stisnejo ploščo. Postopek je laboratorijski, ki simulira proizvodnjo v podjetjih. Seveda v industrijski proizvodnji ne uporabijo kalup za formiranje plošče ampak poteka nanos mešanice s potrebno količino iz mešalnega bobna direktno na transportni trak, ki »neskončno« pogačo pelje proti vroči stiskalnici (Medved 2010).



Slika 2: Shema industrijske izdelave WPC-ja s stiskalnico (Pallmann 2010)

2.1.1.2 Izdelava z ekstrudorjem

Uporaba sistema z ekstrudorjem je tehnika, ki je prevzeta iz proizvodnje običajne plastične mase in plastičnih produktov. Poznamo dva načina izdelave WPC-ja z ekstrudiranjem, prvi je direktna izdelava končnega produkta, drugi pa je vmesna izdelava lesno plastičnih peletov in nato s ponovno fazo ekstrudiranja še končni produkt iz peletov (Slika 3 Medved 2010).



Slika 3: Shematičen prikaz proizvodnje WPC-ja z ekstrudorjem (Medved 2010)

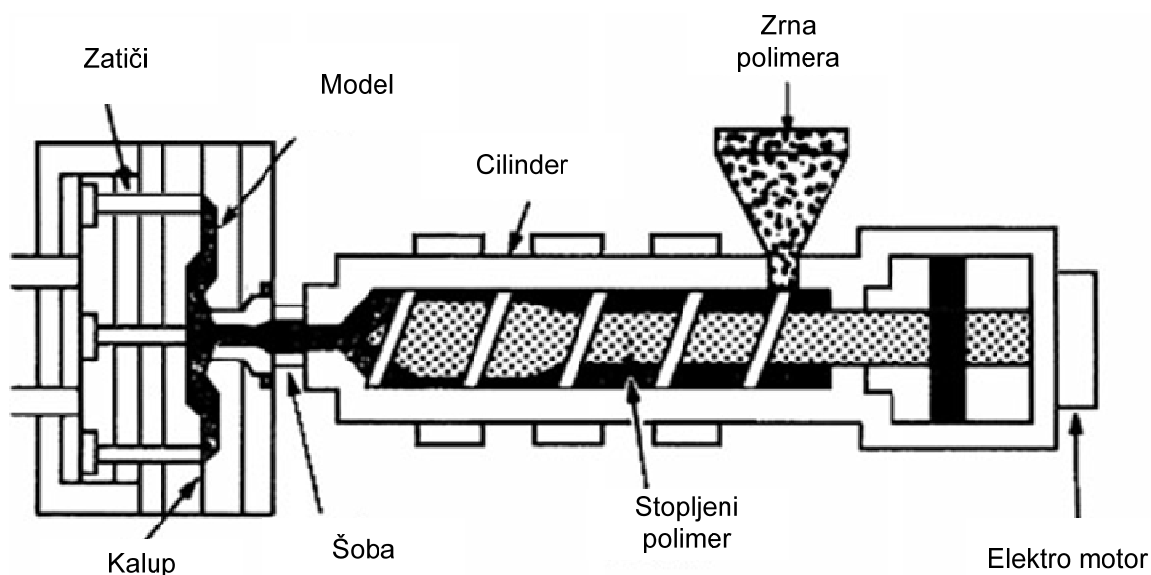
Primarni namen ekstrudorja je taljenje in nato mešanje polimera z lesom ter ostalimi uporabljenimi dodatki v procesu. Poleg tega pa je naloga ekstrudorja tudi transport lesno plastične mešanice skozi matrico. Poznamo štiri primarne različice sistema z ekstrudorjem, ki se uporabljajo za proizvodnjo lesno plastičnih kompozitov. Prvi sistem je sistem z enim vijakom (»single screw«), nato sistem z dvojnim rotacijskim vijakom (»co-rotating twin screw«), sistem z dvojnim nasprotivrtčim vijakom (»counter-rotating twin screw«), in WoodtruderTM. Sistem z enim vijakom je najbolj preprost in s tem sistemom proizvajajo zgolj lesno plastične pelete, kar je pomankljivost tega sistema. Ima pa vsak izmed teh sistemov prednosti in pomanjkljivosti. Sistemi lahko stanejo od 150,000 \$ za sistem z enim vijakom pa tudi preko 1 miliona \$ za popoln ekstruzijski sistem (Jin Kuk Kim in P. Kaushik 2010).



Slika 4: Shematski prikaz dvojnega rotacijskega sistema z vijakoma, ki sta postavljena konično

2.1.1.3 Izdelava z vbrizgavanjem v kalup

Vbrizgavanje v kalup je ena izmed najbolj pogostih tehnik izdelave produkta v proizvodnji plastike, zato ni presenečenje, da se v večini uporablja tudi pri izdelavi lesno plastičnih kompozitov, saj je mešanica na nek način podobna plastični masi pred obdelavo. Idealno proizvodnjo WPC-ja je težko doseči, saj je odvisna od veliko dejavnikov v kalupni napravi, materialu in obliki samega kalupa. Tipičen sistem vbrizgavanja v kalup je shematično prikazan na sliki 7.



Slika 5: Shematičen prikaz vbrizgavanje v kalup (Jin Kuk Kim in P. Kaushik 2010)

Sistem vbrizgavanja je povezan z veliko področji znanosti in tehnike kot so reologija, prenos toplote, dinamika tekočin, trenje in znanost polimerov. Zato je proces

zelo kompleksen in ima veliko parametrov, ki so medsebojno močno povezani in vplivajo na končno kakovost produkta. Prav zaradi teh razlogov je rezultat sistema vbrizgavanja zelo odvisen od operaterja in njegovih izkušenj (Jin Kuk Kim in P. Kaushik 2010).

2.1.2 Prednosti lesno plastičnih kompozitov

Lesno plastični kompozit združuje dobre lastnosti lesa in plastike, prav to pa so največje prednosti WPC-ja v primerjavi s samim lesom ali samim polimerom. Lesno plastične kompozite lahko povsem poljubno oblikujemo in 100% izkoristimo vhodno surovino kot sta les in polimerni material. Ker jih lahko oblikujemo v končno obliko že s proizvodnjo ne potrebujejo nadaljnje obdelave. Pa vendar je nadaljnja obdelava (žaganje, spajanje, itd.) WPC-jev zelo enostavna. Uporabimo lahko običajne stroje, ki so namenjeni obdelavi lesa. Izdelki iz WPC-ja so dimenzijsko stabilni, ter delno odporni proti vlagi in vodi, kar nam omogoča, da jih uporabljamo za izdelke za zunanjo uporabo. V primerjavi s plastiko ima WPC boljše mehanske lastnosti zaradi uporabe lesa. Seveda pa so mehanske lastnosti v primerjavi s samim lesom slabše.

Lesno plastične kompozite lahko izdelujemo tudi iz recikliranega lesa in plastike, kar je prednost predvsem z okoljevarstvenega vidika. Z lahkoto jih obarvamo v poljubne barve, možno pa je tudi izboljšati nekatere druge lastnosti. Z dodajanjem raznoraznih dodatkov lahko izboljšamo odpornost proti napadom gliv, odpornost proti ognju itd.. Z estetskega vidika WPC seveda ne more nadomestiti naravnega videza lesa.

3 MATERIALI IN METODA DELA

Za izvedbo eksperimenta smo uporabili sveže iveri:

- 75% iglavcev (predvsem smreka) in
- 25% listavcev (predvsem bukev).
- Iveri smo dobili iz Lesne TIP Otiški Vrh.
- Kot polimer smo uporabili polietilen z nizko gostoto (LDPE) v obliki peletov, ki smo ga dobili od podjetja Petkim Petrokimya. Komercialno ime: Petilen G03-21T s povprečno gostoto $919\text{-}923\text{ kg/m}^3$

3.1 PRIPRAVA IVERI

Sveže iveri smo, s pomočjo laboratorijskega sejalniki ločili po frakcijah. Postopek separacije je trajal 6 minut.



Sliki 6 in 7: Laborijski sejalnik in peč za sušenje iveri.

Separirane iveri smo nato združili v tri frakcije in sicer:

- Frakcija A (največje iveri): to so iveri, ki so ostale na sitih z odprtinami 1,27 mm in več
- Frakcija B (srednje velike iveri): to so iveri, ki so ostale na sitih z odprtinami 0,6 in 1,0 mm
- Frakcija C (najmanjše iveri): to so iveri ki so ostale na dnu in situ z odprtinami 0,237 mm

Presejane in separirane iveri smo nato posušili v laboratorijskem sušilniku (slika 7) pri temperaturi $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Postopek sušenja je potekal 24h, ciljna vlažnost pa je bila pod 1%.

3.2 PRIPRAVA MEŠANICE

Za izdelavo prvih treh plošč smo najprej na tehtnici natehtali 1180 g iveri največjih, srednjih in najmanjših velikosti iz različnih posod. S tem smo pridobili 50% delež materiala za izdelavo vsake od prvih treh plošč, ki pa so imele različne velikosti frakcij iveri. Nato smo na isti tehtnici natehtali 3-krat po 1180g LDPE in natehtani polimerni material dodali v posamezno posodo s poprej pripravljenimi ivermi. S tem smo pridobili še drugih 50% za izdelavo prvi treh lesno plastičnih kompozitov. Iveri in dodan polimerni material smo nato v posodi z lopatko mešali tako dolgo, da smo bili zadovoljni s prepletenostjo obeh materialov v mešanici. Ker smo za prve tri kompozite natehtali 50% iveri in 50% polimernega materiala, a nato za vsakega uporabili različno velikost frakcij iveri, smo lahko primerjali lastnosti glede na velikost iveri ob enakem deležu osnovnih gradnikov. Skupna teža materiala za izdelavo enega kompozita je znašala 2360g.

Preglednica 1: Pregled vseh izdelanih lesno plastičnih kompozitov z zgradbo

KOMPOZIT ŠT.1	KOMPOZIT ŠT.2	KOMPOZIT ŠT.3	KOMPOZIT ŠT.4	KOMPOZIT ŠT.5	KOMPOZIT ŠT.6
Frakcija C	Frakcija B	Frakcija A	Frakcija B	Frakcija B	Frakcija A
50% lesa + 50%	50% lesa + 50%	50% lesa + 50%	40% lesa + 60%	60% lesa + 40%	55% lesa + 45%
LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE

Za izdelavo četrtega kompozita smo uporabili 40% delež lesnih iveri in 60% delež polimernega materiala LDPE. Da bi bila primerjava lažja, smo za izdelavo tega kompozita uporabili velikost frakcij B iz sejalnika. Ker smo želeli uporabiti enako količino materiala, kot pri izdelavi prvih treh plošč smo maso potrebnih iveri za izdelavo četrte plošče izračunali s 40% deležem skupne potrebne mase 2360g, ki znaša 944g. Maso potrebnih iveri smo ponovno natehtali na isti tehtnici, po istem izračunu pa smo izračunali tudi potrebno maso polimernega materiala, ki za 60% kompozita znaša 1417g. Za naslednji kompozit smo deleža osnovnih gradnikov zgolj obrnili. Uporabili smo 60% lesnih iveri frakcij B in 40% polimera. Za zadnji šesti kompozit pa smo natehtali 55% lesnih iveri (1298 g) največjih frakcij A in 45% polimera (1062g), ter pripravili mešanico.

3.3 IZDELAVA PLOŠČ

Uporabili smo laboratorijski kalup v obliki kvadrata, ki je izdelan iz vezane plošče. Na mizo smo postavili furnir debeline 1,5 mm, ki je deloval kot »dno posode« in opora za izdelavo same plošče. Prvi poskus izdelave plošče zgolj s peka papirjem se je izkazal kot neuspešen, saj je ob odprtju stiskalnice ploščo dobesečno razneslo. Zato smo se odločili, da uporabimo kot oporo na spodnji in zgornji strani furnir. Nato smo kalup postavili na furnir in vzeli prvo mešanico lesnih frakcij in LDPE s točno določeno maso (slika 10).



Slika 8: Lesen kalup z mešanico lesenih iveri in plastične mase

Najprej smo mešanico premešali in kar se da dobro homogeno razporedili, ter jo z ročnim teptalcem poravnali v obliko plošče. Ko je bila površina v kalupu ravna smo kalup odstranili in »stisnjena« mešanica lesnih frakcij ter LDPE je ostala na furnirju. Nato smo tudi z zgornje strani dodali furnir debeline 1,5 mm. Na ta način smo dobili mešanico, ki je bila obdana s furnirjem zaradi večjih razlogov. Prvi razlog je bil lažji prenos mešanice z mize v stiskalnico, drugi je bila lažja odstranitev plošče iz stiskalnice po končanem postopku stiskanja. Kot tretji in najbolj pomemben razlog pa je bil seveda ta, da je plošča

uspela ostati v enem kosu. Furnir smo po končani stabilizacije plošče odstranili. Na ta način smo izdelali prve tri plošče s 50% lesnih frakcij in 50% LDPE. Za vse tri plošče je bila stiskalnica nastavljena na 190°C in tlak 90 barov, čas stiskanja pa je bil 20 min. Enake nastavitve stiskalnice smo uporabili tudi za plošči 4 in 5 s srednjo velikostjo frakcij lesa in deležem 40% oz. 60%. Za ploščo z največjimi frakcijami lesa ter deležem 55% pa smo uporabili kombiniran postopek stiskanja s tlakom 50 barov prvih 5 min in 30 barov drugih 5 minut. Temperatura stiskanja je ostala enako kot pri ostalih ploščah torej 190°C. Na ta način smo izdelali 6 plošč, ki smo jih nato klimatizirali 7 dni pri normalnih pogojih. Nato je sledil razrez na dimenzije preskušancev za ugotavljanje mehanskih in sorpcijskih lastnosti. Temperatura izdelave plošče ne sme biti višja kot 200°C saj ta temperatura že termično modificira lesene iveri in jim znižuje mehanske lastnosti.



Slika 9: Lesno plastična mešanica v stiskalnici obdana s furnirjem pred stiskanjem

3.4 DOLOČANJE MEHANSKIH IN SORPCIJSKIH LASTNOSTI PLOŠČ

3.4.1 Določanje upogibne trdnosti

Za določanje upogibne trdnosti smo uporabili standard SIST EN 310. Uporabili smo univerzalno laboratorijsko napravo Zwick Roell (slika 10). Za določanje upogibne trdnosti smo izmerili debelino preizkušanca z mikrometrom na dve decimali natančno, širino pa s kljunastim merilom prav tako na dve decimali natančno (na mestu loma). Izvedli smo tritočkovni preskus.

Za izračun upogibne trdnosti smo uporabili enačbo 1, za modul elastičnosti pa enačbo 2.

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{loma} \cdot l_1}{2 \cdot w \cdot t^2} \dots \quad (1)$$

kjer je:

- o F_{loma} sila loma v N
- o l_1 oporiščna razdalja v mm
- o w širina preizkušanca v mm
- o t debelina preizkušanca v mm
- o f_m upogibna trdnost v N/mm²

Modul elastičnosti pa izračunamo po enačbi :

$$E_m = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_1^3}{(a_2 - a_1) \cdot 4 \cdot w \cdot t^3} \dots \quad (2)$$

kjer je:

- o F_1 sila pri 10% sile loma v N
- o F_2 sila pri 40% sile loma v N
- o l_1 oporiščna razdalja v mm
- o a_1 poves pri 10% sile loma v mm
- o a_2 poves pri 40% sile loma v mm
- o w širina preizkušanca v mm
- o t debelina preizkušanca v mm
- o E_m modul elastičnosti v N/mm²



Sliki 10 in 11: Testiranje upogibne trdnosti na napravi Zwick Roell

3.4.2 Ugotavljanje gostote in gostotnega profila

3.4.2.1 Ugotavljanje gostote

Gostoto smo določili po standardu SIST EN 323 na preskušancih velikosti 50x50 mm. Debelino vzorca smo izmerili na sredini, na presečišču diagonal. Nato smo natančno izmerili dolžino in širino vzorca. Na koncu smo jih še stehtali in izračunali gostoto po enačbi:

$$\rho = \frac{m}{d \cdot a \cdot b} \dots \quad (3)$$

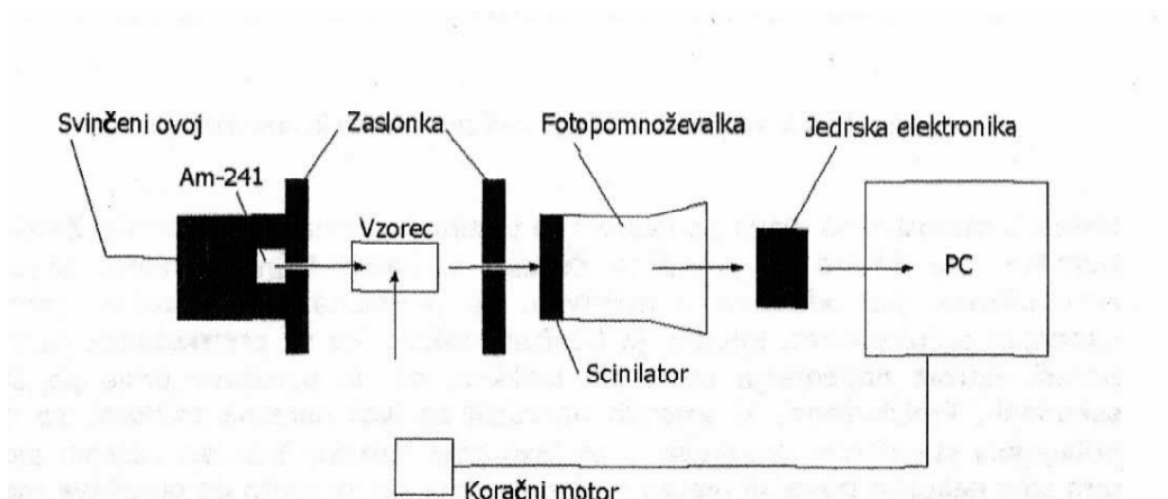
kjer je:

- o d je debilna vzorca v metrih
- o a je dolžina vzorca v metrih
- o b je širina vzorca v metrih
- o m je masa v kg
- o ρ je gostota

3.4.2.2 Merjenje gostotnega profila

Za vsako ploščo smo uporabili 3 vzorce dimenzij 50x50mm. Seveda smo lahko nato vzorce uporabili še za druga testiranja saj metoda ni destruktivna. Gostotni profil smo izmerili s pomočjo naprave za merjenje vertikalne porazdelitve prostorninskih mas. Deluje s presevanjem ozkousmerjenih gama žarkov radioaktivnega izvora. Med presevanjem

vzorca se del žarkov absorbira v vzorcu, zato dobimo na izhodu nižjo intenziteto žarkov, kar je merilo za prostorninsko maso v tej točki. Nato s povprečjem vseh točk meritev iz ene plošče določimo povprečni gostotni profil.



Slika 12: Shema naprave za meritev gostotnega profila (Benedičič 2007)

3.4.3 Ugotavljanje debelinskega nabreka

Za ugotavljanje debelinskega nabreka smo uporabili 8 preskušancev velikosti 50×50 mm. Debelinski nabrek smo ugotavljali po standardu SIST EN 317. Debelino preskušancev (na sredini preskušanca) smo merili pred in po potopitvi v vodo. Preskušance smo potopili v vodno kopel vertikalno tako, da so bili med seboj in od robov posode dovolj oddaljeni in v celoti potopljeni v vodi. Po 24h vodne kopeli smo vzeli vzorce iz vode (slika 13) in jim še enkrat izmerili debelino na identičnem mestu kot pred testom. Potem smo s spremembo debeline izračunali debelinski nabrek in ga izrazili v %.

Enačba:

$$\Delta d = \frac{(d_2 - d_1) * 100}{d_1} \dots \quad (4)$$

kjer je:

- o Δd je debelinski nabrek (sprememba debeline) v %
- o d_2 je debelina po 24h v vodni kopeli
- o d_1 je debelina pred vodno kopeljo



Slika 13: Na sliki lahko vidimo razlike v površinah, kjer so nekatere povsem »zaprte« s plastično maso, nekatere pa nekoliko manj. To se pozna pri nabreku, ki je pri slednjih seveda višji.

3.4.4 Ugotavljanje nabreka pri povišani vlažnosti

Za ugotavljanje nabreka pri povišani vlagi smo uporabili iz vsake izdelane plošče po 5 preizkušancev velikosti 50x50 mm. Preskušance smo izpostavili kontrolirani klimi pri 20°C in 95% relativne zračne vlažnosti, dokler masa vzorcev ni bila konstantna. Merili smo debelino in maso preskušancev pred in po izpostavitvi. Izračunali smo spremembo mase in debeline.

Po končani izpostavitvi smo ugotavljali tudi vlažnost preskušancev po končani izpostavitvi povišani vlažnosti. Za določanje rezidualnega nabreka, smo preskušance po izpostavitvi delovanju vode izpostavili še visoki temperaturi ($103\pm 2^{\circ}\text{C}$) do konstantne mase. Merili smo maso pred in po sušenju.

3.4.5 Testiranje lezenja

Za ugotavljanje lezenja smo uporabili standard SIST EN 1156, pri čemer smo preskus izvedli na majhnih preskušancih velikosti 150x25 mm. Preskus lezenja smo izvedli pri obremenitvi 25% sile preloma in sicer 60 minut. Silo obremenitve smo dosegli po 5 sekundah, nato smo beležili poves in silo po 1, 3, 6, 12 30 in 60 minutah. Koeficient lezenja smo izračunali po spodnji enačbi.

$$k_c = \frac{(a_\tau - a_0) - (a_1 - a_0)}{(a_1 - a_0)} = \frac{(a_\tau - a_1)}{(a_1 - a_0)}$$

kjer je:

- o a_τ ...upogib v času τ
- o a_1 ...upogib v času $\tau = 1$ min
- o a_0 ...upogib v času $\tau = 0$ min

3.4.6 Ugotavljanje tlačne trdnosti

Tlačno trdnost smo ugotavljali na osmih preskušancih velikosti 50×50 mm. Hitrost obremenitve do loma je bila 4 mm/min. Prikaz ugotavljanja tlačne obremenitve je prikazan na sliki 14.

Tlačno trdnost smo izračunali po enačbi:

$$f_c = \frac{F}{A} \dots \quad (5)$$

kjer je:

- o f_c je tlačna trdnost (v MPa)
- o F je porušna sila
- o A je površina na katero je delovala tlačna sila (v mm²)



Slika 14: Testiranje tlačne trdnosti vzorcev z napravo Zwick Roell

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 UPOGIBNA TRDNOST

V preglednicah od 1 do 6 so rezultati meritev vzorcev posameznih plošč za upogibno trdnost z maksimalno silo, upogibno trdnostjo in modulom elastičnosti z vrednostmi posameznih meritev in povprečnimi vrednostmi.

Preglednica 2: Meritve upogibne trdnosti kompozita 1 s povprečnimi vrednostmi

Nr	d [mm]	b2 [mm]	Fmax. [N]	fm [N/mm ²]	E- Modulus [N/mm ²]
KOMPOZIT ŠT.1					
1	8,13	50,26	57	4,12	404
2	8,09	50,36	40	2,9	422
3	8,2	50,47	55	3,89	493
4	8,18	50,46	52	3,69	620
5	8,11	50,47	54	3,91	499
POVPREČJE			51,6	3,70	488

Preglednica 3: Meritve upogibne trdnosti kompozita 2 s povprečnimi vrednostmi

Nr	d [mm]	b2 [mm]	Fmax. [N]	fm [N/mm ²]	E- Modulus [N/mm ²]
KOMPOZIT ŠT.2					
6	8,41	50,2	126	8,53	578
7	8,15	50,41	126	9,06	675
8	8,27	50,46	129	8,96	653
9	8,26	50,44	125	8,74	635
10	8,16	50,42	130	9,3	645
POVPREČJE			127,2	8,92	637

Preglednica 4: Meritve upogibne trdnosti kompozita 3 s povprečnimi vrednostmi

Nr	d [mm]	b2 [mm]	Fmax. [N]	fm [N/mm ²]	E- Modulus [N/mm ²]
KOMPOZIT ŠT.3					
16	10,33	50,34	96	5,35	718
17	10,44	50,26	155	8,5	822
18	10,52	50,42	180	9,67	740
19	10,55	50,34	43	2,28	275
20	10,52	50,34	37	1,99	268
POVPREČJE			143,7	7,8	760

Preglednica 5: Meritve upogibne trdnosti kompozita 4 s povprečnimi vrednostmi

Nr	d [mm]	b2 [mm]	Fmax. [N]	fm [N/mm ²]	E- Modulus [N/mm ²]
KOMPOZIT ŠT.4					
11	9,18	50,31	92	5,21	497
12	9,28	50,36	94	5,18	567
13	9,45	50,39	54	2,87	500
14	9,44	50,37	77	4,13	468
15	9,54	50,32	59	3,1	468
POVPREČJE			75,2	4,10	500

Preglednica 6: Meritve upogibne trdnosti kompozita 5 s povprečnimi vrednostmi

Nr	d [mm]	b2 [mm]	Fmax. [N]	fm [N/mm ²]	E- Modulus [N/mm ²]
KOMPOZIT ŠT.5					
21	11,17	50,27	78	3,71	591
22	11,18	50,34	53	2,51	450
23	11,09	50,41	12	0,57	174
24	11,1	50,4	16	0,76	170
25	11,8	50,44	58	2,48	317
POVPREČJE			43,4	2,01	340

Preglednica 7: Meritve upogibne trdnosti kompozita 6 s povprečnimi vrednostmi

Nr	d [mm]	b2 [mm]	Fmax. [N]	f _m [N/mm ²]	E- Modulus [N/mm ²]
KOMPOZIT ŠT.6					
26	11,12	50,32	164	7,93	834
27	11,2	50,39	143	6,77	837
28	11,23	50,32	150	7,07	846
29	10,8	50,22	131	6,73	833
30	11,2	50,13	53	2,52	498
POVPREČJE			147,0	7,1	837,5

Iz rezultatov je razvidno, da se je v vseh treh lastnostih najslabše odrezal kompozit št. 5, ki je imel 60% delež lesnih iveri frakcij B. Upogibna trdnost, pri tej plošči je znašala 2,01 N/mm², modul elastičnosti pa 340 N/mm². Dva vzorca tega kompozita sta bila občutno slabša, a tudi, če ju vzamemo iz povprečja so rezultati tega kompozita še vedno najslabši. Najboljšo upogibno trdnost smo ugotovili pri plošči izdelani iz iveri frakcij B in sicer 8,92 N/mm², najvišji modul elastičnosti pa pri plošči z ivermi frakcij A (760 N/mm²).

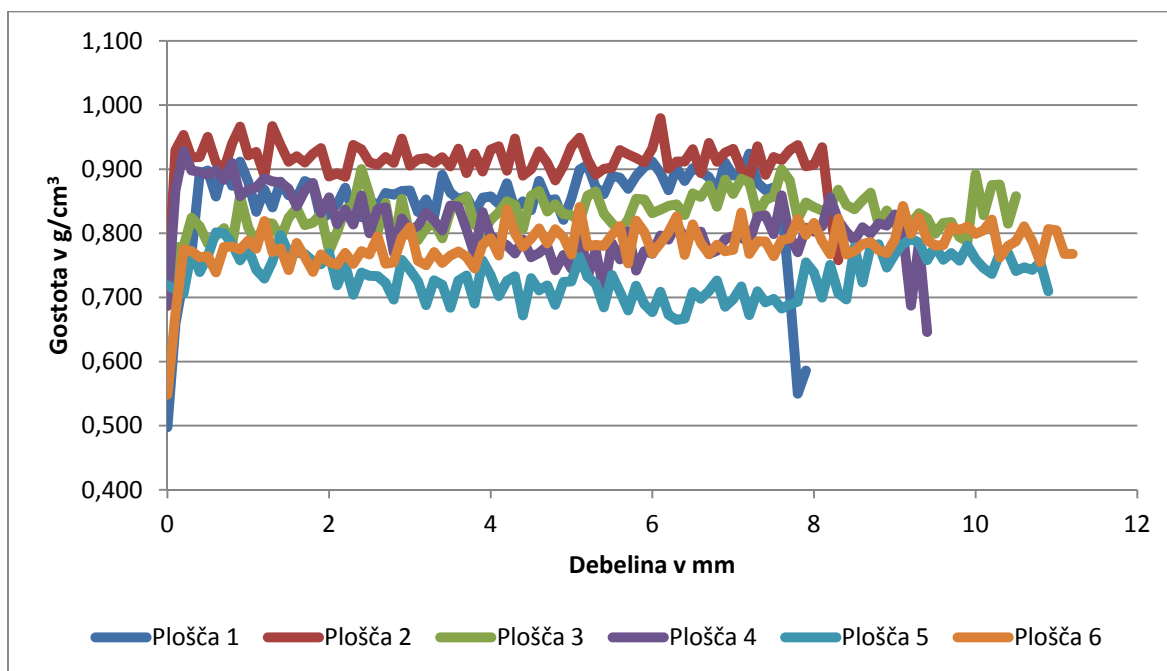
Vemo, da na mehanske lastnosti bolj vplivajo lastnosti lesnih frakcij kot lastnosti polimera. Poleg plošče 5 je bila plošča 1 lesnimi frakcijami C prav tako pri testiranjih slaba, ker tako majhne lesne frakcije ne nudijo mehanske podpore plošči. Večje/daljše lesne frakcije nam omogočijo boljše mehanske lastnosti, kar vemo že iz področja lesnih plošč kot so npr. iverne in OSB plošče, kjer imajo OSB plošče večje/daljše osnovne gradnike in so zato tudi mehanske lastnosti boljše. V splošnem velja, da z zmanjševanjem osnovnih gradnikov lesnih plošč negativno vplivamo na mehanske lastnosti.

Če primerjamo še rezultate kompozitov 4, in 5 z različnimi deleži osnovnih dveh gradnikov (les in polimer) lahko ugotovimo, da sta upogibna trdnost in modul elastičnosti večja pri plošči z manjšim deležem lesa (primerjava kompozita št. 4 s 40% in kompozita št. 5 s 60% deležem lesnih iveri frakcij B). V splošnem, naj bi bile plošče z višjim deležem iveri boljše, a naši rezultati se nekoliko razlikujejo od teh trditev. Menimo, da je tu prišlo do slabših lastnosti pri kompozitu št. 5 s 60% lesa zato, ker ni bilo prisotnega aditiva v obliki lepila. To pa je pomenilo, da je bilo nekaj področij v kompozitu, ki niso bili zlepljeni, kar vpila na poslabšanje mehanske lastnosti. Kompozit št. 6 nam nakazuje, da je

očitno prav okoli 55% lesnih iveri zgornji limit za tak tip proizvodnje, saj v nasprotnem primeru ni dovolj polimera, da bi zlepil celotno ploščo.

Pri uporabi velikih iveri (frakcije A) v kompozitu št. 6 (55%) smo ugotovili višji modul elastičnosti in upogibno trdnost, kot pri kompozitoma št. 4 s 40% deležem iveri frakcij B. Povprečna vrednost upogibne trdnosti je znašala $7,1 \text{ N/mm}^2$, modula elastičnosti pa $837,5 \text{ N/mm}^2$. To predstavlja za naš tip proizvodnje glede na rezultate optimalno vrednost deleža posameznega osnovnega gradnika. Kompozit št. 6 je imel tudi v primerjavi s kompozitov št. 3 višje vrednosti, kar nam potrjuje dejstvo, da višji delež lesnih frakcij izboljšuje mehanske lastnosti (a zgolj do 55% mase, saj višji odstotek ob neuporabi dodatka lepila zaradi nezlepljenosti ni smiseln).

4.2 GOSTOTNI PROFIL, GOSTOTA IN NABREK



Slika 15: Prikaz profilov gostot v odvisnosti od strukture plošče.

Kot vidimo je gostotni profil drugačen kot tisti, ki ga lahko zasledimo pri lesnih kompozitih iz iveri in vlaken (M oz. U obliko).

Razlogi:

- delci približno enake velikosti in vlažnosti
- iz granulotov v tekočo obliko in enakomerno utrjevanje v fazi ohlajanja
- ni zgoščevanja oz. je minimalno

Preglednica 8: Gostota plošč 1, 2 in 3 pri sestavi 50% lesa + 50% LDPE

VZOREC		NAJMANJŠA VELIKOST (1)	SREDNJA VELIKOST (2)	NAJVEČJA VELIKOST (3)
1	ρ (kg/m ³)=	916,88	847,36	764,76
2	ρ (kg/m ³)=	864,99	790,22	914,67
3	ρ (kg/m ³)=	928,85	877,89	894,69
4	ρ (kg/m ³)=	885,61	831,58	840,48
5	ρ (kg/m ³)=	849,71	865,41	807,65
6	ρ (kg/m ³)=	849,72	900,11	734,91
POVPREČJE	ρ (kg/m ³)=	882,63	852,10	826,19

Preglednica 9: Gostota plošč 4, 5 in 6 z različnim deležem lesni iveri in LDPE

VZOREC		SREDNJA V., 40% LES	SREDNJA V., 60% LES	NAJVEČJA V. 55% LES
1	ρ (kg/m ³)=	820,63	818,59	691,06
2	ρ (kg/m ³)=	860,32	888,53	844,69
3	ρ (kg/m ³)=	747,67	807,85	865,40
4	ρ (kg/m ³)=	845,58	716,70	608,73
5	ρ (kg/m ³)=	846,97	743,45	726,46
6	ρ (kg/m ³)=	818,65	647,78	852,29
POVPREČJE	ρ (kg/m ³)=	823,30	770,48	764,77

Ugotovimo lahko, da struktura plošč vpliva na gostoto plošč. Če primerjamo podatke v preglednici 8 lahko ugotovimo, da gostota plošč pada z naraščajočo velikostjo lesnih iveri, v preglednici 9 pa da narašča z naraščanjem deleža dodanega polimera. To je seveda pričakovano saj je gostota uporabljenega polimera LDPE v povprečju glede na dokumentacijo dobavitelja znašala 919-923 kg/m³. Pri ploščah 5 in 6 (z deležem lesa 60% oz. 55%) lahko ugotovimo minimalne razlike v gostoti, čeprav smo za izdelavo uporabili gradnike različnih velikosti (srednje velike oz. velike). Zmanjšanje gostote pri plošči 6 je posledica uporabe največjih iveri (frakcije A) in rahla nehomogenost plošče 6. Če bi zaradi nehomogenosti zanemarili meritve gostote vzorca 4 iz plošče 6 (gostota zgolj 608,73 kg/m³) in meritve gostote vzorca št.6 iz plošče 5 bi imeli obe plošči v povprečju gostoto 795 kg/m³. S tem potrdimo trditve, da z uporabo večjih frakcij iveri znižujemo gostoto a jo nato z uporabo višjega deleža polimera ponovno povečamo. Na ta način lahko dosežemo končen izdelek s podobno gostoto z uporabo različnih osnovnih gradnikov (velikosti in delež).

Preglednica 10: Debelinski nabrek kompozitov 1, 2 in 3 iz 50% lesa + 50% LDPE po 24 urni potopitvi

VZOREC		NAJMANJŠA VELIKOST (1)	SREDNJA VELIKOST (2)	NAJVEČJA VELIKOST (3)
1	Δm (%)=	20,05	17,44	39,52
	Δd (%)=	15,10	3,06	11,38
2	Δm (%)=	32,32	28,95	15,45
	Δd (%)=	21,10	8,11	5,36
3	Δm (%)=	23,06	17,87	21,92
	Δd (%)=	19,29	6,89	9,70
4	Δm (%)=	23,00	17,77	21,70
	Δd (%)=	7,73	1,78	4,98
5	Δm (%)=	24,78	10,91	34,43
	Δd (%)=	12,69	2,90	10,71
6	Δm (%)=	22,34	12,48	37,01
	Δd (%)=	1,66	2,88	5,87
7	Δm (%)=	41,89	9,87	34,68
	Δd (%)=	0,77	2,12	4,55
8	Δm (%)=	32,50	13,19	24,56
	Δd (%)=	5,48	3,55	9,22
POVPREČJE	m (%)	27,49	16,06	28,66
	d (%)	10,48	3,91	7,72

Preglednica 11: Debelinski nabrek kompozitov 4,5 in 6 po 24 urni potopitvi z različnim deležem lesnih iveri in LDPE

VZOREC		SREDNJA V., 40% LES	SREDNJA V., 60% LES	NAJVEČJA V. 55% LES
1	Δm (%)=	25,04	35,82	40,05
	Δd (%)=	7,15	15,06	10,57
2	Δm (%)=	15,54	29,23	22,12
	Δd (%)=	0,30	11,59	4,57
3	Δm (%)=	30,73	35,48	26,50
	Δd (%)=	0,90	9,15	13,24
4	Δm (%)=	22,90	48,04	55,81
	Δd (%)=	5,66	9,12	17,13
5	Δm (%)=	31,32	44,83	43,84
	Δd (%)=	12,66	11,87	8,14
6	Δm (%)=	23,42	52,16	23,92
	Δd (%)=	4,70	7,70	13,56
7	Δm (%)=	15,05	52,52	29,88
	Δd (%)=	4,16	15,67	5,60
8	Δm (%)=	17,16	46,80	43,13
	Δd (%)=	7,54	9,85	15,65
POVPREČJE	m (%)	22,65	43,11	35,66
	d (%)	5,39	11,25	11,06

Najmanjši debelinski nabrek smo opazili pri kompozitu št. 2 s srednjo velikostjo iveri in 50% deležem dveh osnovnih gradnikov (les in polimer). Prav tako je bila tudi sprememba mase pri temu kompozitu najmanjša. V povprečju so imele plošče kjer smo uporabili lesne frakcije velikosti B najmanjši debelinski nabrek in spremembo mase. Pri

ploščah iz najmanjših in največjih iveri pa lahko opazimo približno enako spremembo mase, vendar različen debelinski nabrek. Kompozit z najmanjšimi lesenimi ivermi je imel debelinski nabrek v povprečju 10,48% in kompozit z največjimi ivermi 7,72%. Razlog:

- velikost in število iveri
- nehomogena prepletenost med LDPE in ivermi
- "zalitje" iveri s polimerom

Kompozit 4: pokritost oz. "zalitost" gradnikov s polimerom je višja zaradi višjega deleža polimera. Tako je debelinski nabrek in sprememba mase nizka. Kompozit številka 5 s 60% lesa nam potrjuje dejstvo, da večji kot je delež lesa večji je nabrek. V primerjavi s ploščo 2 se je debelina vzorcev v povprečju povečala s 3,91% na 11,25%. Te trditve nam potrdi tudi primerjava plošče 3 in 6, kjer je trend povečanja debeline vzorcev s povečanim deležem lesnih iveri v kompozitu.

4.3 NAVZEM VLAGE

V preglednicah 12, 13, 14 in 15 so prikazane vrednosti sprememb debeline in mase po izpostavitvi klimi (20°C in 95% relativne zračne vlažnosti).

Preglednica 12: Sprememba debeline in mase pri kompozitih 1,2 in 3 iz 50% lesa + 50% LDPE v važni klimi

VZOREC		NAJMANJŠA VELIKOST (1)	SREDNJA VELIKOST (2)	NAJVEČJA VELIKOST (3)
1	Δm (%)	2,9	2,9	3,8
	Δd (%)	0,5	2,0	3,8
2	Δm (%)	4,0	1,6	6,3
	Δd (%)	6,6	0,7	3,5
3	Δm (%)	3,7	3,0	4,2
	Δd (%)	1,1	0,4	3,6
4	Δm (%)	3,7	4,2	4,2
	Δd (%)	3,7	3,8	2,6
5	Δm (%)	4,7	1,5	4,5
	Δd (%)	0,7	1,0	4,6
Povprečje	m (%)	3,80	2,63	4,63
	d (%)	2,53	1,55	3,62

Preglednica 13: Izračuni povprečnih vrednosti deleža vode v kompozitih 1,2 in 3 s 50% lesa + 50% LDPE izraženi z maso in deležem po končanem sušenju

VZOREC		NAJMANJŠA VELIKOST (1)	SREDNJA VELIKOST (2)	NAJVEČJA VELIKOST (3)
1	m3 (g)	18,53	18,8	23,43
	mv (g)	0,74	0,71	1,35
2	m3 (g)	17,49	19,23	20,95
	mv (g)	1,07	0,36	1,67
3	m3 (g)	18,7	17,05	23,07
	mv (g)	0,93	0,68	1,28
4	m3 (g)	18,26	16,68	22,2
	mv (g)	0,91	0,98	1,24
5	m3 (g)	15,87	18,18	22,19
	mv (g)	1	0,37	1,37
Povprečje lesa	m3 (g)	17,77	17,99	22,37
Povprečje vode	mv (g)	0,93	0,62	1,38
	mv (%)	5,23	3,45	6,18

Preglednica 14: Sprememba debeline in mase kompozitov 4, 5 in 6 z različnim deležem lesnih iveri in LDPE, ter različno velikostjo lesnih frakcij po izpostavitvi klimi

VZOREC		SREDNJA V., 40% LES	SREDNJA V., 60% LES	NAJVEČJA V. 55% LES
1	Δm (%)	4,2	5,0	4,1
	Δd (%)	5,0	6,5	4,5
2	Δm (%)	4,2	4,2	3,9
	Δd (%)	2,9	3,7	1,7
3	Δm (%)	4,1	4,0	4,4
	Δd (%)	4,3	4,7	5,5
4	Δm (%)	3,0	3,8	4,7
	Δd (%)	1,5	2,5	3,7
5	Δm (%)	3,9	3,4	3,8
	Δd (%)	3,7	3,1	4,7
Povprečje	m (%)	3,87	4,07	4,19
	d (%)	3,50	4,10	4,01

Preglednica 15: Izračuni povprečnih vrednosti deleža vode v kompozitih 4,5 in 6 z različnim deležem lesnih iveri in LDPE, ter različno velikostjo lesnih frakcij po končanem sušenju

VZOREC		SREDNJA V., 40% LES	SREDNJA V., 60% LES	NAJVEČJA V. 55% LES
1	m3 (g)	20,25	20,28	22,77
	mv (g)	1,25	1,52	1,43
2	m3 (g)	20,01	23,66	23,66
	mv (g)	1,14	1,43	1,33
3	m3 (g)	19,67	20,07	18,35
	mv (g)	1,12	1,61	1,26
4	m3 (g)	20,64	20,42	20,91
	mv (g)	0,84	1,52	1,39
5	m3 (g)	20,02	20,3	18,1
	mv (g)	1,09	1,46	1,17
Povprečje lesa	m3 (g)	20,12	20,95	20,76
Povprečje vode	mv (g)	1,09	1,51	1,32
	mv (%)	5,41	7,20	6,34

Z meritvami in izračuni lesno plastičnih kompozitov 1, 2 in 3 z različnimi velikostmi lesnih iveri, ter 50% deležem iveri in LDPE smo ugotovili, da sta se pri kompozitu št. 2 s frakcijami iveri B masa in debelina najmanj spremenili ob izpostavitvi vlažni klimi pri 20°C in 95% relativne zračne vlažnosti. Tudi delež vode v vzorcih je imela plošča 2 najmanjši s povprečno vrednostjo 0,62g oz. 3,45% mase pred sušenjem. Plošča 3 z največjimi ivermi frakcij A je imela največjo spremembo mase 4,63% in debeline za 3,62% po izpostavitvi klimi. Po sušenju na absolutno suho stanje pa je imela ta plošča tudi najvišji delež vode s povprečno vrednostjo 6,18%. Predvidevamo, da je imela plošča z največjimi ivermi največji navzem, spremembo mase in delež vode zato, ker so imele lesne iveri na površini vzorcev večje stične površine s klimo v okolici in so lahko vpile več vlage(vode). Kompozit št. 4 (40% iveri frakcij B) ter kompozit št. 5 (60% iveri frakcij B) lahko primerjamo s kompozitov št. 2(50% iveri frakcij B). Primerjava meritev je pokazala, da je sprememba mase večja pri plošči s 40% deležem lesa v primerjavi s tisto s 50% deležem, največja pa pri plošči s 60% deležem lesa (preglednica 12 in 14). Podobno kot pri navzemu je imela nepričakovano plošča s 40% lesa večji delež vode (5,41%) kot plošča z enakimi ivermi in 50% deležem le teh. Predvidevamo, da je manjša sprememba mase pri 50% deležu lesa predvsem posledica enakomernejše porazdelitve polimera in iveri v primerjavi s kompozitom s 40% deležem iveri frakcij B. Kompozit št. 5 s 60% lesa je pričakovano vseboval najvišji odstotek vode v vzorcih s povprečno vrednostjo 7,2% mase. Za navzem vlage menimo, da bi lahko pri vseh ploščah izboljšali lastnosti z boljšim sistemom priprave oz. bolj homogeno mešanico. Drugi način bi bila uporaba dodatkov/aditivov, ki bi ali izboljšali povezavo iver-polimer, ali pa povečali odpornost proti delovanju vode/vlage.

Rezultati nam kažejo da se z višjim deležem lesa v kompozitu navzem in delež vode višata. Prav zato ne smemo pretiravati z deležem lesa, saj lahko občutno poslabšamo dimenzijsko stabilnost kompozita in povečamo navzem vode. Prav tako lahko rečemo, da velikost lesnih iveri ne sme biti prevelika ali premajhna saj lahko v obeh primerih kompozit navzame več vlage/vode kot pa v primeru srednje velikosti iveri (frakcije B), kjer so vrednosti navzemov najnižje. Seveda so ti zaključki primerni zgolj za naš tip proizvodnje lesno plastičnega kompozita, saj lahko z različnimi tehnikami izboljšamo homogenost plošč in oblepljenost, ki pripomore k boljšim rezultatom. Poleg tega pa lahko

tudi z uporabo dodatkov vplivamo na lastnosti, a mi smo se odločili na izdelavo brez njih. V teh primerih bi morda dobili drugačne vrednosti.

4.4 LEZENJE

V spodnjih tabelah so rezultati meritev lezenja in izračuni koeficientov lezenja za posamezno ploščo s povprečnimi vrednostmi.

Preglednica 16: Meritve lezenja kompozita 1

KOMPOZIT ŠT. 1								
		a	b	s	fm	Em	a	kc
Nr	Index	mm	mm	mm ²	MPa	N/mm ²	mm	
2	1	7,5	24,88	186,6	1,65	563,53	0,32	0,00
	2				1,65	481,53	0,37	0,16
	3				1,65	435,75	0,41	0,28
3	1	8,31	25,12	208,75	1,33	445,4	0,29	0,00
	2				1,33	390,19	0,34	0,17
	3				1,33	357,19	0,37	0,28
POVPREČJE KOEFICIENTA LEZENJA								0,28

Preglednica 17: Meritve lezenja kompozita 2

KOMPOZIT ŠT. 2								
		a	b	s	fm	Em	a	kc
Nr	Index	mm	mm	mm ²	MPa	N/mm ²	mm	
4	1	8,46	25,08	212,18	2,28	569,28	0,39	0,00
	2				2,28	507,49	0,43	0,10
	3				2,28	469,95	0,47	0,21
5	1	8,4	25,1	210,84	2,31	636	0,35	0,00
	2				2,31	572,86	0,39	0,11
	3				2,31	535,67	0,42	0,20
6	1	8,19	25,13	205,81	2,43	586,85	0,41	0,00
	2				2,43	523,27	0,46	0,12
	3				2,43	484,82	0,5	0,22
POVPREČJE KOEFICIENTA LEZENJA								0,21

Preglednica 18: Meritve lezenja kompozita 3

KOMPOZIT ŠT. 3								
		a	b	s	fm	Em	a	kc
Nr	Index	mm	mm	mm ²	MPa	N/mm ²	mm	
7	1	10,41	25,05	260,77	2,51	421,27	0,47	0,00
	2				2,52	381,24	0,52	0,11
	3				2,52	356,29	0,55	0,17
8	1	10,55	25,04	264,17	2,45	599,64	0,32	0,00
	2				2,45	551,7	0,34	0,06
	3				2,45	521,3	0,36	0,13
9	1	10,53	24,71	260,2	2,49	614,35	0,31	0,00
	2				2,49	561,7	0,34	0,10
	3				2,49	529,06	0,37	0,19
POVPREČJE KOEFICIENTA LEZENJA								0,16

Preglednica 19: Meritve lezenja kompozita 4

KOMPOZIT ŠT. 4								
		a	b	s	fm	Em	a	kc
Nr	Index	mm	mm	mm ²	MPa	N/mm ²	mm	
10	1	9,28	25	232	1,41	581,21	0,21	0,00
	2				1,41	518,5	0,24	0,14
	3				1,41	480,27	0,26	0,24
11	1	9,64	25,07	241,67	1,31	616,06	0,18	0,00
	2				1,31	546,87	0,2	0,11
	3				1,31	504,4	0,22	0,22
12	1	9,63	25,25	243,16	1,3	534,88	0,21	0,00
	2				1,3	476,79	0,23	0,10
	3				1,3	441,14	0,25	0,19
POVPREČJE KOEFICIENTA LEZENJA								0,22

Preglednica 20: Meritve lezenja kompozita 5

KOMPOZIT ŠT. 5								
		a	b	s	fm	Em	a	kc
Nr	Index	mm	mm	mm ²	MPa	N/mm ²	mm	
13	1	11,05	25	276,25	1,51	438,65	0,26	0,00
	2				1,51	402,4	0,28	0,08
	3				1,51	379,67	0,29	0,12
14	1	11,18	25,12	280,84	1,47	359,13	0,3	0,00
	2				1,47	328,09	0,33	0,10
	3				1,47	308,16	0,35	0,17
15	1	11,29	25,06	282,93	1,45	296,77	0,35	0,00
	2				1,45	271,28	0,39	0,11
	3				1,45	255,64	0,41	0,17
POVPREČJE KOEFICIENTA LEZENJA								0,15

Preglednica 21: Meritve lezenja kompozita 6

KOMPOZIT ŠT. 6								
		a	b	s	f _m	E _m	a	k _c
Nr	Index	mm	mm	mm ²	MPa	N/mm ²	mm	
16	1	11,11	25,01	277,86	1,9	506	0,28	0,00
	2				1,9	469,04	0,3	0,07
	3				1,9	445,96	0,31	0,11
17	1	11,35	24,96	283,3	1,83	536,65	0,25	0,00
	2				1,83	493,33	0,27	0,08
	3				1,83	466,09	0,28	0,12
18	1	11,36	24,93	283,2	1,83	485,68	0,27	0,00
	2				1,83	450,51	0,29	0,07
	3				1,83	428,48	0,31	0,15
POVPREČJE KOEFICIENTA LEZENJA								0,13

S primerjavo rezultatov koeficienta lezenja kompozitov št. 1, 2 in 3 v preglednicah 16, 17 in 18 lahko pridemo do zaključkov, da se lastnosti kompozitov izboljšujejo z večanjem lesnih frakcij. Kompozit št. 1 s frakcijami velikosti C je dosegel najslabši koeficient lezenja s povprečno vrednostjo 0,28, med tem ko je bil kompozit št. 3 z istim deležem osnovnih gradnikov veliko boljši s povprečno vrednostjo koeficienta lezenja 0,16. Kompozit št. 4 je imel boljše rezultate kot kompozit št. 1, čeprav je bil delež lesnih frakcij le 40% a pri tem kompozitu smo uporabili večje iveri kot pri kompozitu št. 1. Iz tega lahko sklepamo, da je možno z večanjem delcev lesnih iveri nekoliko nadomestiti delež iveri. Rezultati kompozita št. 5 in 6, kjer smo uporabili višji delež lesnih frakcij nam ponovno potrjujejo, da koeficient lezenja na ta način izboljšamo. Ti rezultati so povsem logični saj les daje oporo kompizu in je manj elastičen kot polimer. Zato nam nižanje LDPE izboljšuje rezultate koeficienta lezenja. Najboljši koeficient lezenja je imel kompozit št.6 s povprečno vrednostjo 0,13.

4.5 TLAČNA TRDNOST

V spodnjih preglednicah so rezultati meritev vzorcev posameznih kompozitov za tlačno trdnost z maksimalno silo in silo potrebno za prelom z vrednostmi posameznih meritev in povprečnimi vrednostmi.

Preglednica 22: Meritve tlačne trdnosti kompozita 1

NAJMANJŠA VELIKOST (1)	$F_{lo\ max}$	$\{\sigma\}_{lo\ M}$	dL at $F_{lo\ max}$	$F_{lo\ Break}$	dL at break	$a_{lo\ 0}$	$b_{lo\ 0}$	$S_{lo\ 0}$	$t_{lo\ Test}$
ŠT. PREIZKUŠANCA	N	N/mm	mm	N	mm	mm	mm	mm ²	s
1	2900	57,86	4,2	1160	5,7	8,14	50,2	408,63	86,18
2	1740	34,63	3	698	9,3	8,28	50,39	417,23	140,34
3	1990	39,63	4	797	6,8	8,34	50,26	419,17	102,14
4	3180	62,99	3,8	1270	6,2	7,82	50,56	395,38	94,12
5	2100	41,37	4,5	836	6,6	7,81	50,65	395,58	99,34
6	2260	44,69	4,3	903	7,1	7,9	50,56	399,42	107,4
7	2480	49,05	4,3	991	7,1	8,39	50,51	423,78	107,24
8	1850	36,68	4,6	738	9,3	7,95	50,32	400,04	140,6
POVPREČJE	2312,50	45,86	4,09	924,13	7,26	8,08	50,43	407,40	109,67

Preglednica 23: Meritve tlačne trdnosti kompozita 2

SREDNJA VELIKOST (2)	$F_{lo\ max}$	$\{\sigma\}_{lo\ M}$	dL at $F_{lo\ max}$	$F_{lo\ Break}$	dL at break	$a_{lo\ 0}$	$b_{lo\ 0}$	$S_{lo\ 0}$	$t_{lo\ Test}$
ŠT. PREIZKUŠANCA	N	N/mm	mm	N	mm	mm	mm	mm ²	s
9	4540	89,79	4,8	1820	8,4	8,41	50,56	425,21	126,66
10	4510	89,35	4,2	1800	7,2	8,45	50,51	426,81	107,94
11	4830	96,05	4,8	1930	8	8,46	50,26	425,2	120,02
12	4530	90,22	4,2	1810	6,8	8,35	50,16	418,84	102,94
13	4970	98,44	3,8	1990	6,5	8,15	50,5	411,58	98,54
14	4050	79,94	2,8	1620	6,3	7,88	50,62	398,89	94,66
15	4850	96,96	3,2	1940	6,2	8,36	50,06	418,5	93,76
16	4230	83,79	3,4	1690	6,9	8,3	50,52	419,32	104,24
POVPREČJE	4563,75	90,57	3,90	1825,00	7,04	8,30	50,40	418,04	106,10

Preglednica 24: Meritve tlačne trdnosti kompozita 3

NAJVEČJA VELIKOST (3)	$F_{lo\ max}$	$\{\sigma\}_{lo\ M}$	dL at $F_{lo\ max}$	$F_{lo\ Break}$	dL at break	$a_{lo\ 0}$	$b_{lo\ 0}$	$S_{lo\ 0}$	$t_{lo\ Test}$
ŠT. PREIZKUŠANCA	N	N/mm	mm	N	mm	mm	mm	mm ²	s
17	5380	106,6	2,9	2150	7,1	10,68	50,44	538,7	107,66
18	5450	108,83	3	2180	9,6	10,34	50,11	518,14	145
19	4420	88,36	2,9	1770	8,1	10,58	50,04	529,42	122,48
20	4970	99,15	2,8	1990	6,2	10,38	50,1	520,04	93,02
21	3710	74,05	3,6	1480	8,8	10,56	50,06	528,63	132,34
22	5660	112,98	3,3	2260	7,9	10,57	50,11	529,66	118,74
23	5610	111,88	3,1	2240	8,5	10,4	50,14	521,46	127,6
24	3320	65,98	2,4	1330	6,5	10,39	50,27	522,31	98,16
POVPREČJE	4815,00	95,98	3,00	1925,00	7,84	10,49	50,16	526,05	118,13

Preglednica 25: Meritve tlačne trdnosti kompozita 4

SREDNJA V. 40% LES (4)	$F_{lo\ max}$	$\{\sigma\}_{lo\ M}$	dL at $F_{lo\ max}$	$F_{lo\ Break}$	dL at break	$a_{lo\ 0}$	$b_{lo\ 0}$	$S_{lo\ 0}$	$t_{lo\ Test}$
ŠT. PREIZKUŠANCA	N	N/mm	mm	N	mm	mm	mm	mm ²	s
25	4860	96,31	3,1	1950	5,9	9,44	50,5	476,72	88,8
26	4000	79,3	2,9	1600	13,5	9,63	50,48	486,12	202,84
27	3510	69,53	3,1	1400	9,8	9,47	50,52	478,42	147,98
28	4920	98,11	2,6	1970	4,9	9,33	50,14	467,81	74,24
29	4700	93,38	3,4	1880	6,1	9,65	50,33	485,68	92,68
30	5290	104,94	3,5	2110	6,9	9,62	50,38	484,66	103,32
31	4460	88,24	3	1780	6,1	9,66	50,51	487,93	91,84
32	1940	38,42	2,6	777	7,4	9,66	50,56	488,41	111,88
POVPREČJE	4210,00	83,53	3,03	1683,38	7,58	9,56	50,43	481,97	114,20

Preglednica 26: Meritve tlačne trdnosti kompozita 5

SREDNJA V. 60% LES (5)	$F_{lo\ max}$	$\{\sigma\}_{lo\ M}$	dL at $F_{lo\ max}$	$F_{lo\ Break}$	dL at break	a $_{lo\ 0}$	b $_{lo\ 0}$	S $_{lo\ 0}$	t $_{lo\ Test}$
ŠT. PREIZKUŠANCA	N	N/mm	mm	N	mm	mm	mm	mm ²	s
33	5260	104,7	2,7	2100	4,8	11,23	50,2	563,75	73,02
34	4470	88,59	2,9	1790	10,5	11,16	50,5	563,58	157,62
35	2980	59,28	3,1	1190	9,5	11,1	50,2	557,22	142,34
36	3720	74,01	2,4	1490	4,3	11,2	50,21	562,35	65,02
37	4570	91,07	2,9	1830	5,5	11,14	50,19	559,12	83,64
38	2970	59,1	2,2	1190	9,8	11,06	50,27	555,99	146,92
39	5080	101,17	2,7	2030	6,1	11,17	50,26	561,4	91,32
40	4640	92,45	2,5	1860	4,1	11,21	50,23	563,08	62,46
POVPREČJE	4211,25	83,80	2,68	1685,00	6,83	11,16	50,26	560,81	102,79

Preglednica 27: Meritve tlačne trdnosti kompozita 6

NAJVEČJA V. 55% LES (6)	$F_{lo\ max}$	$\{\sigma\}_{lo\ M}$	dL at $F_{lo\ max}$	$F_{lo\ Break}$	dL at break	a $_{lo\ 0}$	b $_{lo\ 0}$	S $_{lo\ 0}$	t $_{lo\ Test}$
ŠT. PREIZKUŠANCA	N	N/mm	mm	N	mm	mm	mm	mm ²	s
41	5050	100,24	2,9	2020	8,8	11,33	50,35	570,47	131,98
42	6280	125,53	2,8	2510	6,1	11,33	50	566,5	91,92
43	2670	53,42	2,2	1070	5,9	11,24	50,03	562,34	88,48
44	5710	114,09	2,7	2280	6,8	11,32	50,05	566,57	101,98
45	3490	69,78	3	1390	8,9	11,13	49,97	556,17	133,44
46	3200	63,92	3	1280	7,1	11,15	50,08	558,39	107,34
47	4930	98,47	3,2	1970	13,5	11,33	50,05	567,07	203,82
48	6030	120,47	2,4	2410	6,6	11,18	50,07	559,78	99,62
POVPREČJE	4670,00	93,24	2,78	1866,25	7,96	11,25	50,08	563,41	119,82

V preglednicah 22, 23 in 24 so meritve za kompozite 1,2 in 3 s 50% lesnih frakcij in 50% LDPE a z različno velikostjo lesnih frakcij. Ti rezultati nam služijo za razumevanje vpliva velikosti iveri na tlačno trdnost. V preglednicah 25, 26 in 27 pa so meritve kompozitov z različnimi deleži osnovnih gradnikov, ki so pomembni za razumevanje vpliva deleža lesa v lesno plastičnem kompozitu na tlačno trdnost. Primerjava podatkov podanih v preglednicah 21 do 26 nam je pokazala, da smo najvišjo tlačno trdnost ugotovili pri kompozitu 3, ki je bil izdelan s 50% največjih lesnih frakcij in 50% LDPE. Povprečna maksimalna sila je znašala 4815 N, sila preloma pa 1925 N.

Druga naša opažanja so, da ima velikost iveri velik vpliv saj so med najmanjšimi lesnimi frakcijami C (kompozit 1) in največjimi lesnimi frakcijami A (kompozit 3) velike razlike. Medtem ko ima kompozit 3 najvišje vrednosti z maksimalno silo v povprečju 4815 N jih ima kompozit 1 za več kot polovico slabše z maksimalno silo v povprečju le 2312 N. V primeru plošče s 40% deležem iveri frakcij B, smo dobili povprečno maksimalno silo 4534 N in silo preloma 1813 N. Tako lahko vidimo, da so tlačne lastnosti zelo podobne med ploščama 4 in 2, ki imata enako velikost iveri a različen delež lesnih frakcij. It tega lahko sklepamo, da delež iveri ne vpliva na tlačno trdnost v tako veliki meri kot velikost iveri, ki se kaže v primerjavi kompozita št. 1 z ostalimi petimi kompoziti. Naslednja plošča je bila s 60% iveri frakcij B in 40% LDPE. Meritve tlačne trdnosti te plošče nam kažejo, da

so tu lastnosti nekoliko slabše kot pri plošči št. 2 z identičnimi frakcijami iveri a deležem osnovnih gradnikov 50/50. Maksimalna sila je v povprečju znašala 4211 N, vendar pa so bile vrednosti kar precej različne že v sami plošči. Menimo, da bi bil lahko za to krivec sam sistem priprave mešanice. Sumimo, da je lahko ob 60% deležu lesnih iveri prišlo do večjih ali manjših posameznih območij, kjer je bil prisoten zgolj les in ne tudi plastična masa. Prav plastična masa pa je bila v našem primeru edini vir »zlepljenosti« saj nismo uporabili nobenih aditivov v kakršnikoli obliki. To bi bil lahko eden izmed razlogov za nehomogenost plošč. Vseeno pa je razvidno, da veliko višji delež od 50% lesnih iveri ni priporočljiv, če potrebujemo tlačno trdnost. Tudi kompozit št. 6, ki ima 55% lesnih iveri in največjo velikost iveri (frakcije A) nam potrjuje trend upadanja tlačne trdnosti saj so v primerjavi s ploščo 3, ki ima enake lesne frakcije a z deležem 50%, vrednosti nižje tako za maksimalno silo kot tudi za silo preloma. Maksimalna sila je bila v povprečju 4670 N in sila preloma 1866 N, kar sta nižji vrednosti kot za ploščo 3. Iz rezultatov lahko sklepamo, da je tlačna trdnost v veliki večini odvisna od velikosti lesnih iveri in manj od deleža iveri. Večje kot so iveri boljša je tlačna trdnost kompozita. Rezultati pa nam prav tako kažejo, da je optimalno razmerje med lesom in plastiko za tlačno trdnost ravno nekje okoli 50/50.

4.6 RAZPRAVA VSEH POVPREČNIH VREDNOSTI

Preglednica 28: Povprečne vrednosti vseh meritev po posameznih kompozitih

WPC	GOSTOTA ρ (kg/m ³)	DEBELINSKI NABREK d (%)	NAZVEM m (%)	DELEŽ VODE mv (%)	UPOGIBNA TRDNOST fm (N/mm ²)	MODUL ELASTIČNOSTI E (N/mm ²)	TLAČNA TRDNOST SILA MAX F (N)	TLAČNA TRDNOST SILA LOMA F (N)	KOEFICIENT LEZENJA kc
KOMPOZIT ŠT. 1	882,63	10,48	3,80	5,23	3,70	487,60	2312,50	924,13	0,28
KOMPOZIT ŠT. 2	852,10	3,91	2,63	3,45	8,92	637,20	4563,75	1825,00	0,21
KOMPOZIT ŠT. 3	826,19	7,72	4,63	6,18	7,84	760,00	4815,00	1925,00	0,16
KOMPOZIT ŠT. 4	823,30	5,39	3,87	5,41	4,10	500,00	4210,00	1683,38	0,22
KOMPOZIT ŠT. 5	770,48	11,25	4,07	7,20	2,01	340,40	4211,25	1685,00	0,15
KOMPOZIT ŠT. 6	764,77	11,06	4,19	6,34	7,13	837,50	4670,00	1866,25	0,13

V preglednici 27 so predstavljene povprečne vrednosti vseh meritev za vsak izdelan kompozit. Z zeleno so označene "najboljše" vrednosti za posamezno lastnost in z rdečo "najslabše" vrednosti za posamezno lastnost. Pri fizikalnih lastnostih kompozitov kot so debelinski nabrek, navzem in delež vode opazamo, da je bil najboljši kompozit številka 2 z velikostjo lesnih frakcij B in 50/50 deležem osnovnih gradnikov. V povprečju najslabša je bila plošča z velikostjo iveri B a deležem lesnih frakcij 60%, kar je razumljivo saj z višanjem deleža lesa kompozitu višamo higroskopne lastnosti, ker je bil les v naših kompozitih edini material, ki je bil sposoben nase vezati vodo/vlago. Iz teh rezultatov

pridemo do zaključka, da potrebujemo "pravi delež" gradnikov in "pravo velikost lesnih frakcij" glede na namen uporabe kompozita. Nekako bi pričakovali, da bo kompozit s 40% lesnih frakcij tu najboljši, a v našem primeru temu ni bilo tako. Menimo, da je lahko prišlo do napak pri pripravi mešanice in njenemu mešanju, saj so bile na površini vzorcev vidne večje površine lesnih frakcij brez polimernega materiala. Posledica tega pa je, da bodo higroskopske lastnosti takega kompozita slabše.

Z rezultati mehanskih lastnosti smo prišli do zaključkov, da mora biti velikost lesnih frakcij vsaj srednje velikosti B (od 1mm do 0,6 mm) saj so v nasprotnem primeru mehanske lastnosti občutno slabše. Pri upogibni trdnosti vidimo, da poleg velikosti lesnih frakcij zelo vpliva tudi delež polimernega materiala (LDPE). To je razvidno v kompozitu št. 5 s 60% lesnih frakcij, kjer upogibna trdnost zelo upade in je najslabša med vsemi. Pri tlačni trdnosti je zelo pomembna zgolj velikost lesnih frakcij, saj se z večanjem dimenzij lesnih frakcij lastnosti izboljšujejo. Če zmanjšujemo delež lesnih frakcij ne vplivamo tako veliko na tlačno trdnost saj bolj pomembna velikost lesnih frakcij, ki dajejo oporo kompozitu. To se najbolj opazi pri kompozitu št. 1, ki ima najmanjše lesne frakcije (velikost C). Tu je tlačna trdnost več kot za polovico slabša v primerjavi s preostalimi kompoziti, čeprav imamo enak delež lesnih frakcij ter podobno gostoto. To potrjuje ugotovitev, da delež osnovnih gradnikov nima tako velikega vpliva. Glede na rezultate koeficienta lezenja lahko vidimo, da sta imeli plošči (3 in 6) z največjimi frakcijami A najboljše rezultate in plošči 1 in 4 z najmanjšimi frakcijami velikosti C najslabše. Iz tega lahko sklepamo, da je za dobre rezultate lezenja zelo pomembne veliko frakcije iveri, saj v nasprotnem primeru kompozit nima dobrih lastnosti. Vse lastnosti so seveda "dobre in slabe" zgolj toliko kolikor jih pogojuje končna uporaba kompozita in zahteve. Na ta način lahko prilagajamo lastnosti, ki jih potrebujemo in optimiziramo proizvodnjo.

5 SKLEPI

V nalogi smo si zastavili cilj, da bi izdelali lesno plastične kompozite z različnimi velikostmi in deleži iveri, ter polimera, ki je bil v našem primeru LDPE. Kompozite smo želeli izdelati povsem brez drugih dodatkov, ki jih v normalni proizvodnji lesno plastičnih kompozitov običajno dodajo. Na ta način smo izdelali 6 lesno plastičnih kompozitov z različno zgradbo s sistemom stiskanje v obliki plošč. Tri plošče smo izdelali z zgradbo s 50% lesnih iveri in 50% LDPE a s tremi različnimi velikostmi lesnih frakcij (A, B in C). Pri naslednjih treh pa smo spremenili delež lesa na 40%, 55% oz. 60%. Z temi kombinacijami smo lahko opazovali vpliv velikosti in deleža iveri na lastnosti izdelanih kompozitov.

Z dobljenimi meritvami in rezultati smo opazovali fizikalne in mehanske lastnosti kompozitov. Ugotovili smo, da so lastnosti izdelanega kompozita odvisne tako od velikosti iveri kot tudi od njihovega deleža. Iz meritev mehanskih lastnosti (upogibna trdnost, modul elastičnosti in tlačna trdnost) je razvidno, da se z večanjem velikosti uporabljenih iveri izboljšajo mehanske lastnosti kompozita. Poleg velikosti iveri je na upogibno trdnost vplival tudi delež iveri. Z naraščanjem deleža lesa narašča tudi upogibna trdnost.

Ugotovili smo, da je tlačna trdnost bolj odvisna od velikosti uporabljenih iveri, manj pa od deleža lesa oz. polimera.

Gostotni profil lesno plastičnih kompozitov izkazuje dokaj homogeno strukturo po debelini, ki ni v značilni M oz. U obliki za kompozite iz lesnih vlaken in iveri.

Delež in velikost uporabljenih iveri ima vpliv tudi na gostoto kompozita. Z naraščanjem deleža lesa, gostota kompozita pada saj ima LDPE veliko višjo gostoto kot les.

Debelinski nabrek, navzem vode in deleži vode v kompozitu so odvisni tako od velikosti iverinih frakcij kot tudi od njihovega deleža kompozitu. Ugotovili smo, da se z višanjem deleža in velikosti iveri poveča tudi debelinski nabrek, navzem in delež vode v kompozitu.

Z pridobljenimi rezultati koeficienta lezenja smo prišli do zaključkov, da je velikost lesnih frakcij zelo pomembna, ter da večje kot so frakcije, boljši so rezultati lezenja.

6 VIRI

Kuk Kim Jin, P. Kaushik. 2010. Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites. Berlin. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 175 str.

Medved S., 2010. WPC. Lesni kompoziti. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta Oddelek za lesarstvo, Ljubljana: 3 str.

Medved S. 2009. Laboratorijske vaje. Tehnologija in lastnosti lesnih plošč. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Ljubljana: 11 str.

Stark N. M., Carll G., Cai Z. 2010. Wood-based composite materials : panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials, V: Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 11. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 11.1-11.28

Youngquist, J. A. 1999. Wood-based composites and panel products. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General technical report FPL; GTR-113: 10.1-10.31

Taylor A. in sod., Wood Plastic Composites - A primer. 2010. Washington State University Extension.

http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1037&context=utk_agexfores
(15.10. 2012)

Wood-Plastic Composites. 2002. Tangram Technology.

http://www.tangram.co.uk/TI-Wood_Plastic_Composites_Review.pdf (15.10. 2012)

- Wechsler A., Hizioglu S., Ballerini A. A. 2008. Some of the Properties of Wood Plastic Composites. Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology. November 10-12. 2008. Concepción. CHILE.
- Centa U. 2011. Analiza loma lesnih plošč pri obremenitvi na upogib. Univ. dipl. projekt. Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Ljubljana: 41 str.
- Gustin M. 2012. Vpliv poteka stiskanja na gostotni profil iverne plošče. Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 49 str.
- Benedičič J. 2007. Vpliv gostotnega profila in sorpcijskih karakteristik na krivljenje MDF plošč. Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 34 str.

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Sergeju Medvedu, ker je sprejel mojo prošnjo za mentorstvo in mi nudil vso pomoč ob izdelavi magistrske naloge, predvsem v poletnih časih tik preden sem odšel v tujino, ko mi je omogočil, da sem zaključil vsa potrebna testiranja.

Zahvaljujem se tudi recenzentki doc. dr. Idi Poljanšek za strokovno recenzijo diplomskega projekta in ves prosti čas, ki si ga je vzela, da je popravila mojo nalogo.

Zahvaljujem se vsem sošolcem za prav posebnih 5 let, še posebej pa Borisu Cilenšku in Tadeju Grahovcu, ki sta z mano preživela fenomenalne 4 mesece na Erasmus izmenjavi v Alicante-ju v Španiji, kjer sta živela z mano in prenašala moje »muhe« doma, na faksu in na žurih. ☺

Zahvaljujem pa se tudi svoji družini, ki mi je vseskozi stala ob strani in mi pomagala, da sem uspešno zaključil študij, ter moji puncu Birgit Hausmann, ki me je v zadnjem letu neprestano spodbujala in mi nudila polno podporo, da sem lahko zaključil študij.