

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Tina HUDNIK

**RAZVOJ LAHKIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV
S SREDICO IZ UTEKOČINJENEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Tina HUDNIK

**RAZVOJ LAHKIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV
S SREDICO IZ UTEKOČINJENEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**DEVELOPMENT OF LIGHT WOOD COMPOSITES
WITH CORE FROM LIQUIFIED WOOD**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani in na Kemijskem inštitutu v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je odobril naslov diplomskega dela in je za mentorja imenoval doc. dr. Sergeja Medveda, za somentorja doc. dr. Matjaža Kunaverja in za recenzenta izr. prof. dr. Milana Šerneka.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

TINA HUDNIK

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*862:630*832.284
KG	utekočinjen les/poliuretanska pena/lahki ploščni kompoziti
AV	HUDNIK, Tina
SA	MEDVED, Sergej (mentor)/KUNAVER, Matjaž (somentor)/ŠERNEK, Milan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2010
IN	RAZVOJ LAHKIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV S SREDICO IZ UTEKOČINJENEGA LESA
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	VII, 44 str., 12 pregl., 23 sl., 22 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	V zadnjih letih se veliko raziskav opravlja na področju utekočinjanja lesa, ki ga lahko uporabljamo tudi kot surovino za izdelavo poliuretanskih pen. Glede na to, da so trendi v pohištveni industriji zopet vse bolj osredotočeni na izdelavo pohištva iz lahkih ploščnih kompozitov, smo ustvarili nov lahki ploščni kompozit s srednjim slojem iz poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa, ki bi ga lahko uporabili v pohištvene namene. Delo je obsegalo izdelavo kompozitov in testiranje preizkušancev. Preizkušali smo odpornost proti tlaku, upogibno trdnost ter dimenzijsko obstojnost. Dosežene vrednosti lahko najbolj primerjamo s poliuretansko peno in s papirnatimi satovji, medtem ko so vrednosti aluminijevih, polipropilenskih in polietilenskih satovij neprimerljivo višje. Ugotovili smo, da moramo za doseganje boljših mehanskih lastnosti plošče kondicionirati. Dodatno bi lahko lastnosti izboljšali z obdelavo robov.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn

DC UDC 630*862:630*832.284

CX liquefied wood/polyurethane foam/light wood composites

AU HUDNIK, Tina

AA MEDVED, Sergej (supervisor)/KUNAVER, Matjaž (supervisor)/ŠERNEK, Milan (co-advisor)

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

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

PY 2010

TI DEVELOPMENT OF LIGHT WOOD COMPOSITES WITH CORE FROM LIQUEFIED WOOD

DT Graduation Thesis (University studies)

NO VII, 44 p., 12 tab., 23 fg., 22 ref

LA sl

AL sl/en

AB In recent years there has been much research on wood liquefaction and polyurethane foam produced from liquefied wood. Given that the trends in the furniture production industry are again focused on lightweight materials, we have developed a new light wood composite, where the core layer was made from liquefied wood. Such panels could be used in the furniture production. We have successfully constructed such panels and then tested the compressive and bending strength and the dimensional stability. Values obtained can best be compared with those from polyurethane foam and paper honeycomb, while aluminium, polypropylene and polyethylene honeycomb values were incomparably higher. Our results show that after the production we have to condition the panels. Additional features could be improved by closing the edges with edge band from solid wood or even ABS.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO SLIK.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC.....	VII
1 UVOD	1
1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA.....	2
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	3
1.3 CILJ NALOGE.....	3
2 SPLOŠNI DEL IN PREGLED OBJAV	4
2.1 LAHKI PLOŠČNI KOMPOZITI.....	4
2.2 UTEKOČINJEN LES.....	7
2.3 POLIURETANSKE PENE.....	8
3 MATERIALI IN METODE	13
3.1 MATERIALI	13
3.1.1 Zunanji sloj	13
3.1.2 Srednji sloj	13
3.2 METODE DELA.....	15
3.2.1 Izdelava ivernih plošč za zunanji sloj	15
3.2.2 Izdelava plošč s sredico iz satovja	15
3.2.3 Izdelava plošč iz poliuretanske pene.....	16
3.2.4 Poliuretanska pena iz utekočinjenega lesa	17
3.3 METODE PREIZKUŠANJA	20
3.3.1 Določanje gostote	20
3.3.2 Preizkus odpornosti proti tlaku in sprememba debeline pri tlačni obremenitvi	21
3.3.3 Preizkus upogibne trdnosti.....	22
3.3.4 Dimenzijska obstojnost	23
4 REZULTATI.....	24
4.1 TLAČNA OBREMENITEV	24
4.2 UPOGIBNA TRDNOST	29
4.3 DIMENZIJSKA OBSTOJNOST.....	32
5 RAZPRAVA.....	35
6 SKLEPI	38
7 POVZETEK.....	40
8 VIRI	42
ZAHVALA	

KAZALO SLIK

Slika 1: Celica satovja, ki prikazuje katere dimenzije vplivajo na lastnosti.....	4
Slika 2: Primerjava trdnosti in elastičnosti različnih preizkušancev z enako težo	6
Slika 3: Laboratorijsko izdelane iverne plošče.....	15
Slika 4: Skica okvirja pred nanosom PU pene	16
Slika 5: Plošče z različnimi nanosi PU pene	17
Slika 6: Izdelava lahkega ploščnega kompozita: vlivanje PUL	18
Slika 7: Prikaz raztezanja PUL po nekaj sekundah	19
Slika 8: Obtežitev dozirne odprtine med potekom reakcije	19
Slika 9: Preizkušanci pripravljeni za merjenje debeline z mikrometrom.....	20
Slika 10: Tlačna obremenitev LPK iz industrijskega satovja.....	21
Slika 11: Tlačna obremenitev LPK iz PU pene.....	21
Slika 12: Preizkušanca PU pene pred in po preizkusu maksimalne tlačne obremenitve	21
Slika 13: Preizkus upogibne trdnosti LPK iz industrijskega satovja.....	22
Slika 14: Preizkus upogibne trdnosti LPK iz PUL.....	22
Slika 15: Preizkušanci za ugotavljanje dimenzijske obstojnosti	23
Slika 16: Graf - primerjava stisljivosti med PU peno in optimalno izdelano PUL	26
Slika 17: Graf - primerjava stisljivosti med PUL in papirnatim satovjem	27
Slika 18: Graf - sile deformacije pri obremenitvi na tlak	28
Slika 19: Porušitev LPK zaradi strižnih napetosti	29
Slika 20: Graf upogibne trdnosti različnih materialov srednjega sloja	30
Slika 21: Graf stisljivosti in upogibne trdnosti različnih materialov	31
Slika 22: Graf - sprememba debeline prve serije preizkušancev.....	33
Slika 23: Graf - sprememba debeline druge serije preizkušancev.....	34

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Materiali uporabljeni za srednji sloj lahkih ploščnih kompozitov	13
Preglednica 2: Maksimalna tlačna obremenitev preizkušancev 50 x 50 mm ²	24
Preglednica 3: Sprememba debeline za preizkušance PU pene in industrijskih satovij, velikosti 50 x 50 mm ² , pri tlačni obremenitvi 300 N.....	25
Preglednica 4: Sprememba debeline za preizkušance PU pene z različnimi nanosi, velikosti 50 x 50 mm ² , pri tlačni obremenitvi 300 N.....	25
Preglednica 5: Sprememba debeline za preizkušance PUL, velikosti 50 x 50 mm ² , pri maksimalni tlačni obremenitvi 300 N.....	25
Preglednica 6: Sprememba debeline za preizkušance PUL, velikosti 50 x 50 mm ² , pri maksimalni tlačni obremenitvi 300 N.....	26
Preglednica 7: Stisljivost papirnatega satovja in PUL, pri tlačni obremenitvi, za preizkušance 100 x 100 mm ²	27
Preglednica 8: Upogibna trdnost lahkih ploščnih kompozitov.....	29
Preglednica 9: Skupne vrednosti stisljivosti pri tlačni obremenitvi in upogibne trdnosti	31
Preglednica 10: Sprememba mase v gramih glede na spremembo klime	32
Preglednica 11: Sprememba debeline v milimetrih glede na spremembo klime	32
Preglednica 12: Sprememba debeline v odstotkih glede na spremembo klime	32

1 UVOD

Slovenija se uvršča med najbolj gozdnate evropske države, saj gozd pokriva 60% površine. Zato ne preseneča dejstvo, da se gozdarska in lesarska panoga uvrščata med panoge z najdaljšo tradicijo v Sloveniji.

Velik problem slovenskih lesnih podjetij so zelo nizki kazalci konkurenčnosti. Za slabo stanje so kriva predvsem podjetja sama, ki premalo vlagajo v razvoj in pa tudi družbeno - ekonomski sistem, ki predvsem zaradi visoke obdavčitve in prispevkov ne spodbuja inovativnosti in višje dodane vrednosti končnih izdelkov. Brez inovativnih izdelkov z visoko dodano vrednostjo, žal ne moremo biti konkurenčni. Prav zato je potrebno stalno vlagati v razvoj novih izdelkov in iskanje novih trgov. Zavedati se moramo, da je potrebno vlagati v znanje in tehnološki razvoj danes, da pa bodo rezultati vidni šele čez nekaj let. Zato morajo podjetja, ki bodo uspešno prestala krizo, v svoja strateška načrtovanja vključiti čim več razvoja.

Glede na to, da smo energijsko zelo potratni in si v zadnjih letih vse bolj prizadevamo pridobiti čim več energije iz ekološko obnovljivih virov, bo les postajal vse bolj aktualen in ker ga imamo dovolj, ga moramo le še pametno izkoristiti. Lesni izdelki v sebi skladiščijo CO₂, zato je potrebno življenjsko dobo lesenih izdelkov podaljšati, lesne ostanke in odslužen les pa predelati in ponovno uporabiti. Les, kot trajno obnovljiv vir, je naše največje bogastvo in počasi se bomo vsi začeli tega tudi zavedati in začeli les s pridom izkoriščati.

Ena izmed možnosti boljšega izkoristka lesnih ostankov in odsluženega lesa je tudi v predelavi lesa, kjer so v zadnjem času vse bolj aktualne raziskave na področju utekočinjenega lesa, ter različnih opcijah njegovih aplikacij, med njimi tudi raziskave o možnostih izdelave poliuretanskih pen iz utekočinjenega lesa.

Trendi izdelave čim lažjega pohištva niso novi. V 50. in 60. letih 20. stol. se je namreč predvsem po drugi svetovni vojni, zaradi pomanjkanja lesa, povečala uporaba sendvič plošč s papirnatim satovjem in ekstrudiranih plošč. Kasneje se je z uporabo ivernih in MDF (vlaknena plošča s srednjo gostoto) plošč za proizvodnjo pohištva kljub manjši debelini zopet povečala teža elementov. IKEA pa je leta 1982 z linijo pohištva LACK ponovno uvedla uporabo lahkih ploščnih kompozitov, kjer so bile komponente narejene iz debelih sendvič plošč z industrijskimi satovji.

Uporaba lahkih ploščnih kompozitov v pohištveni industriji je danes vse bolj popularna, ker so trenutni pohištveni trendi nagnjeni predvsem k debelejšim in tanjšim komponentam z manjšo težo, kar je bistveno lažje doseči s sendvič ploščami. Med prednosti, ki jih imajo lahki ploščni kompoziti pred iverno in MDF ploščo, štejemo: dimenzijsko neomejenost, lažje rokovanje, nižje transportne stroške, boljšo dimenzijsko obstojnost in večjo ekološko neoporečnost.

1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Lahki ploščni kompoziti se uporabljajo v izvedbi plošč z nižjo gostoto, ali pa kot kompoziti, kjer se kot zunanji sloj uporablja iverna ali vlaknena plošča debeline do 8 mm, kot srednji sloj pa se lahko uporabljajo različna satovja, ekstrudirane iverne plošče ali plošče z nižjo gostoto. V literaturi je možno zaslediti uporabo utekočinjenega lesa in poliuretanskih pen iz slednjega. V naši nalogi pa bomo poskušali izdelati lahki ploščni kompozit, katerega srednji sloj bo laboratorijsko izdelana poliuretanska pena iz utekočinjenega lesa.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Izdelavo poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa so že optimizirali, vendar pa njene uporabe za izdelavo lahkih ploščnih kompozitov še niso preizkusili, zato smo želeli ustvariti lahki ploščni kompozit, ki bi imel sredico iz poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa. Kompozit naj bi imel kljub svoji relativno nizki gostoti sorazmerno dobre mehanske lastnosti. Izdelava lahkih ploščnih kompozitov je temeljila na predvidevanju, da bo aplikacija možna v pohištveni industriji.

1.3 CILJ NALOGE

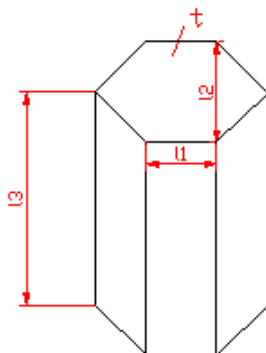
Cilj naloge je izdelati lahki ploščni kompozit, s sredico iz poliuretanske pene, narejene iz utekočinjenega lesa, s primernimi mehanskimi lastnostmi.

2 SPLOŠNI DEL IN PREGLED OBJAV

2.1 LAHKI PLOŠČNI KOMPOZITI

Lahki ploščni kompoziti so lahko narejeni iz lesenih plošč oz. plošč izdelanih iz drugih lignoceluloznih materialov, ali pa iz sendvič plošč, kjer je zunanji sloj lahko iz furnirja, ivernih plošč, vlaknenih plošč, itd., srednji sloj pa iz drugih materialov: les z majhno gostoto, LDF plošča (vlaknena plošča z nizko gostoto), poliuretanska pena, papirnato, aluminijevo ali plastično satovje.

Najpogostejše se za izdelavo lahkih ploščnih kompozitov uporabljajo industrijska satovja. Besedo satovje se uporablja zato, ker izgled spominja na čebelje satovje, katerega najdemo v naravi. V preteklosti so proizvedli že več kot 500 različnih vrst satovij. Danes se v industriji največkrat uporabljajo polietilensko, polipropilensko, aluminijevo in papirnato satovje, katerih celice so najpogostejše šesterokotne in kvadratne. Na lastnosti satovja tako vpliva več dejavnikov, med drugim material in oblika, ter razmerja med dolžino, širino, debelino in višino posamezne celice satovja (slika 1).



Slika 1: Celica satovja, ki prikazuje katere dimenzije vplivajo na lastnosti

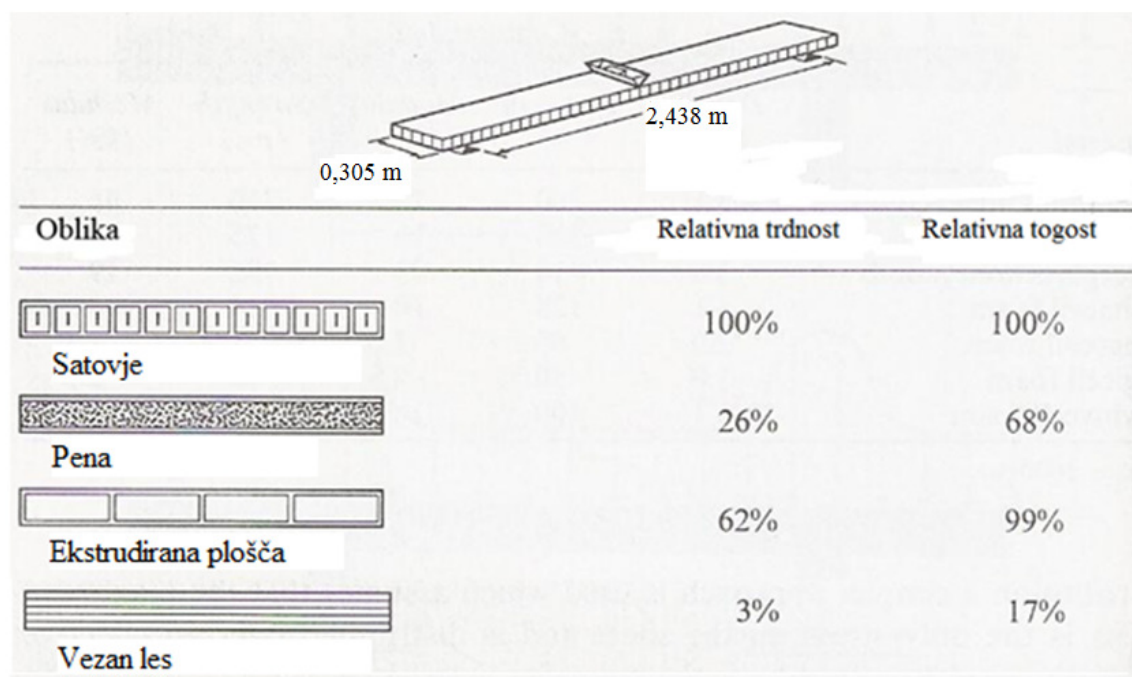
Papirnato satovje so prvi proizvedli Kitajci, ki so ga že pred več kot 2000 leti uporabljali za razne okrase in ornamente.

Prvi patent na področju proizvodnje papirnatega satovja je Budwig patent, ki so ga izdali leta 1905 v Nemčiji. Med prvo in drugo svetovno vojno so plošče s satovji uporabljali za izdelavo letal. Leta 1930 pa se je začela proizvodnja modernih satovij, saj se je pričela uporaba lahkih ploščnih kompozitov tudi v pohištveni industriji (Bitzer, 1997).

Glavna zahteva za izdelavo lahkih ploščnih kompozitov je zmanjšanje teže, a ohranjanje relativno dobrih mehanskih lastnosti in doseganje čim boljše dimenzijske obstojnosti. Mehanske lastnosti se lahko še dodatno izboljšajo z obdelavo robov. Možnosti izboljšav je pri lahkih ploščnih kompozitih (v nadaljevanju LPK) veliko, vendar pa je potrebno upoštevati, da morajo lastnosti kompozita le zadoščati potrebam, saj se v nasprotnem primeru njihova izdelava ne izplača. Velika prednost LPK je tudi nizka cena in neomejenost z dimenzijami. Večinoma gre za sendvič plošče, ki imajo zunanji sloj iz drugega materiala kot srednji sloj. Zunanji sloj je lahko iz furnirja, žaganega lesa, vlaknene ali iverne plošče (do 8 mm), laminata ali aluminija. Slednji se uporablja predvsem v ladijski in letalski industriji. Srednji sloj pa je lahko iz lesa, poliuretanske, polipropilenske in polietilenske pene, LDF, satovja, tankih trakov furnirja ali pa gre za ekstrudirano iverno ploščo. Veliko raziskav se dela tudi na področju izdelave lahkih ploščnih kompozitov iz kmetijskih ostankov in iz rastlin enoletnic (npr. slama, konoplja in lan).

Za izdelavo optimalno lahkega satovja sendvič plošč z dobrimi mehanskimi lastnostmi, je potrebno upoštevati razmerje med težo zunanjega in srednjega sloja. Optimum je dosežen, ko je teža satovja med 50 in 70% teže celotne sendvič plošče (He in Hu, 2008).

Z laboratorijsko izdelavo sendvič plošč, kjer se kot zunanji sloj uporablja 8 mm iverno ploščo, za srednji sloj pa aluminijevo, polipropilensko in polikarbonatno satvoje, so ugotavljali vpliv srednjega sloja na tlačno trdnost, modul elastičnosti in silo loma. Za primerjavo so pri eksperimentu uporabili še dve industrijsko izdelani sendvič plošči, in sicer ekstrudirano iverno ploščo in ploščo iz papirnatega satovja. Vrsta satovja, uporabljenega za srednji sloj, ima bistven vpliv na gostoto in mehanske lastnosti kompozita. Kot material z najboljšimi lastnostmi se je izkazalo aluminijevo satovje, vendar pa so te plošče tanjše in imajo višjo gostoto. Glede na to, da želimo z lahkimi ploščnimi kompoziti dobiti čim boljše lastnosti glede na majhno težo, pa so izračunali učinkovitost materiala, kjer se je izkazalo, da sta za tlačno in upogibno trdnost najučinkovitejši satovji iz papirja in polipropilena (Medved, 2008).



Slika 2: Primerjava trdnosti in elastičnosti različnih preizkušancev z enako težo (Bitzer, 1997)

Eden od materialov, ki lahko konkurira z lahkostjo različnih satovij, je pena. Vendar pa lahko LPK s sredico iz satovja v primerjavi s tistim s sredico iz pene prenaša večje obremenitve. Kot lahko vidimo na sliki 2, je relativna trdnost satovja med izbranimi materiali največja (Bitzer, 1997).

Na splošno so mehanske lastnosti industrijskih satovij boljše od različnih pen, vendar pa je pri satovjih potrebno uporabljati še lepilo, kar poleg samega satovja še dodatno poviša ceno in zmanjša biološko neoporečnost. Lahki ploščni kompoziti s sredico iz utekočinjenega lesa so biološko razgradljivi in lahki, zato je potrebno raziskati različna področja njihove uporabe.

Lastnosti kompozitov z industrijskimi satovji so že poskušali izboljšati tudi tako, da so satovje napolnili s poliuretansko ali poliizocianuratno peno. S tem so želeli predvsem preprečiti zvijanje sten posamezne celice satovja in na ta način tudi povečati tlačno trdnost kompozita. Izkazalo se je, da se lastnosti ob zapolnitvi satovja s peno ne izboljšajo, zato se za povečevanje tlačne trdnosti sendvič plošč z industrijskimi satovji ne priporoča dodatna uporaba pene (Bitzer, 1997).

2.2 UTEKOČINJEN LES

V Sloveniji je priprava utekočinjenega lesa in izdelava poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa že patentirana. Z depolimerizacijo lesa in drugih celuloznih odpadkov dobimo surovine, ki nadomeščajo podobne surovine iz surove nafte (Kunaver, 2008).

Utekočinjen les se lahko izdelava iz odpadnega lesa, štorov, žaganja, vej, iglic, starega papirja in biomase v kateri je vsaj 40% celuloze. Pri utekočinjanju se uporablja tudi glicerol, ki je stranski produkt pri proizvodnji biodizla, in ni treba, da je zelo prečiščen. To pomeni, da lahko utekočinjen les izdelamo iz 97 odstotkov obnovljivih virov (Kunaver, 2009).

Bistveni dejavniki pri utekočinjanju lesa so temperatura, tlak in čas. Veliko vlogo pri utekočinjanju lesa pa imajo tudi dodani reagenti in katalizatorji.

Pri utekočinjanju lesa pride do kemijske razgradnje različnih lesnih komponent. Pri utekočinjanju lesa prevladujeta utekočinjanje s poliolami in utekočinjanje s fenoli. Pri utekočinjanju lesa s fenoli se kot katalizator uporablja NaOH. Pri utekočinjanju lesa s poliolami pa se uporabljajo glikoli in kislinski katalizatorji (para-toluensulfonska kislina ali žveplova (VI) kislina).

Izbira drevesne vrste nima bistvenega vpliva na izkoristek pri utekočinjanju lesa. Pri optimizaciji so dosegli 98% izkoristek utekočinjenega lesa. Preizkušali so različne glikole, pri uporabi neopentil glikola in trimetilol propana so po 45 minutah dosegli 100% izkoristek. Tudi pri uporabi glicerola so dosegli visok izkoristek, vendar je ob uporabi katalizatorja žveplove (VI) kisline, glicerol problematičen zaradi hitre rekondenzacije (Čuk, 2008).

Les, utekočinjen s poliolami, se lahko uporablja tudi za izdelavo poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa, medtem ko se les, utekočinjen s fenoli, uporablja predvsem za izdelavo fenol-formaldehidnih smol.

Kunaver in sod. (2010) so utekočinjali les iglavcev z uporabo mešanice dietilen glikola in glicerola z minimalnim dodatkom kisline. Naredili so tri nove poliestre, ki se jim je hidroksilno število utekočinjenega lesa zaradi estrifikacije zmanjšalo. Ugotovili so, da se takšni nasičeni poliestri lahko uporabljajo za izdelavo poliuretanskih pen.

2.3 POLIURETANSKE PENE

Za poliuretane je značilna uretanska skupina – NH – CO – O –, ki se periodično ponavlja. Za izdelavo navadnih poliuretanskih pen se uporabljajo polietri in poliestri, medtem ko je pri peni iz utekočinjenega lesa bistvena komponenta utekočinjen les. Poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa nastanejo z reakcijo utekočinjenega lesa z izocianatom. Pri tem so potrebni različni dodatki. Silikonsko površinsko aktivno sredstvo se uporablja za tvorbo zaprtih celic, ki so bolj izolativne. Pospeševalec pospešuje reakcijske tvorbe poliuretanskih vezi med izocianatom in prostimi hidroksilnimi skupinami, ki so prisotne v utekočinjenem lesu. Glicerol se dodaja zato, da dobimo razvejano 3D strukturo, s tem pa tudi boljše lastnosti. V reakcijsko zmes dodamo tudi penilo, ki je lahko voda ali etanol, ki reagira z izocianatom in povzroči penjenje in volumsko naraščanje pene. Pri reakciji se ustvarjata toplota in CO₂. V reakcijo pa lahko namesto vode in etanola dodamo tudi visoko hlapne spojine, kot je pentan, ki pri visoki temperaturi reakcije zavrejo in povzročijo penjenje.

Z utekočinjanjem lesa in škroba so pridobili poliole s hidroksilnim številom 300 – 400, odvisno od časa utekočinjanja. Preizkušali so različne kombinacije vsebnosti lesa in škroba. Iz biomase poliolov so pridobili trde poliuretanske pene, z gostoto 0,03 g/cm³, tlačno trdnostjo 80 – 150 kPa in elastičnim modulom 3 – 10 MPa. Te vrednosti so primerljive s konvencionalnimi vrednostmi trdih poliuretanskih pen. Kombinacija lesa in škroba malce poslabša tlačno in upogibno trdnost, vendar pa naredi peno bolj prožno (Yao in sod. 1995).

Lee in sod. (2000) so iz poliolov, pridobljenih iz utekočinjenih koruznih otrobov, izdelali poliuretanske pene (v nadaljevanju PU pene) in ugotovili, da so gostota in mehanske lastnosti takšnih pen primerljive s konvencionalnimi PU penami. Na lastnosti tako pridobljene pene pa vpliva tudi količina dodanega poliester poliola (PCL 303).

Yan in sod. (2008) so izdelovali PU pene iz utekočinjenih koruznih stebel, pri čemer so preverjali vpliv različnih dodatkov (katalizatorja, vode, površinsko aktivnega sredstva in izocianata) na izdelavo PU pene. Ugotovili so, da imajo pene iz utekočinjenih koruznih stebel odlične mehanske in termične lastnosti ter, da se jih lahko uporabi kot izolativne materiale.

Maldas in Shiraishi (1996) sta utekočinjala les s polioli z uporabo katalizatorja NaOH. Ugotavljala sta vpliv različnih parametrov (temperatura, čas, vrsta in koncentracija poliola) na količino ostanka in določala lastnosti različnih mešanic. Manj ostanka ostane pri povišani temperaturi, podaljšanju reakcijskega časa na eno uro in s povišanjem koncentracije NaOH do 2,5% . Najboljši izkoristek utekočinjanja so dosegli z razmerjem med polioli in količino lesa 2:3. Iz različnih formulacij so pripravili poliuretanske pene in določali gostoto, tlačno trdnost in modul elastičnosti. Molekulska masa in koncentracija poliolov imata bistven vpliv na ostanek, kislinsko in hidroksilno število, ter s tem tudi vpliv na končne lastnosti pene.

Alma in Shiraishi (1998) sta utekočinjala les s polietilen glikolom (PEG) 400, kot katalizator pa sta namesto močnih kislin uporabila katalizator NaOH. Optimalne pogoje za utekočinjanje sta dosegla po eni uri pri temperaturi 250 °C. Ugotovila sta tudi, da je temperatura glavni dejavnik pri utekočinjanju. Prav tako je prednost utekočinjanja z NaOH ta, da ostane manj ostanka. Naredila sta različne preizkušance pene iz utekočinjenega lesa, z različnimi razmerji med lesom in polihidričnimi alkoholi. Najboljše razmerje (les/PEG 400) je 1:1, saj je bila tu dosežena višja gostota in večja tlačna trdnost, kot pri razmerju 3:2. Z razmerjem višjim od 7:3 (les/PEG 400) pa izdelava pene ni možna. Ugotovila sta, da so fizikalno mehanske lastnosti pen, kjer se kot katalizator uporablja NaOH, skoraj enake oziroma boljše, kot pri penah, pridobljenih z uporabo žveplove kisline kot katalizatorja.

Rozman in sod. (2003) so naredili poliuretanske kompozite iz utekočinjenih riževih lupin. Riževe lupine so imele v raziskavi dvojno funkcijo. Sprva so jih uporabili kot poliol, kjer so proste hidroksilne skupine poliola reagirale z izocianatom, nato pa so z reakcijo polietilen glikola (PEG 200) in difenilmetan izocianata (MDI) ugotavljali zamreženost poliuretanske strukture. Preverjali so tudi vpliv velikosti delcev in ugotovili, da so najboljši rezultati doseženi pri najmanjših delcih. Razmerje med prostimi hidroksilnimi skupinami in izocianatom je bilo konstantno 1.1, vendar so spreminjali delež prostih OH skupin iz poliola. Merili so tlačno, upogibno in udarno trdnost ter vpijanje vode. Testi so pokazali, da se lastnosti preizkušancev z večjo vsebnostjo riževih lupin izboljšujejo do meje 45% – 60%, nato pa začnejo padati. Ugotovili so tudi to, da ob povečanju deleža OH skupin iz poliola nad 40%, pride do povišanega vpijanja vode, kar je posledica slabše zamreženosti.

Chen in Lu (2009) sta utekočinjala pšenično slamo s polietilen glikolom (PEG 400) in glicerinom v prisotnosti kisline. Utekočinjeni produkt je imel hidroksilno število 250 - 430 mg KOH/g in sta ga lahko uporabila za izdelavo poliuretanske pene. Za samo izdelavo pene sta uporabila utekočinjeno pšenično slamo, poliol, diizocianat, katalizator in penilec. Tlačna trdnost in termična obstojnost sta bili z dodatkom deleža utekočinjene slame boljši, medtem, ko je bila tako izdelana pena pri sobni temperaturi bolj biorazgradljiva kot PU pena.

Trde poliuretanske pene so izdelali tudi iz utekočinjenega sladkornega trsa s polietilen glikolom (PEG 400) in glicerinom ob prisotnosti kisline. Hidroksilno število utekočinjenega produkta je bilo med 300 in 450 mg KOH/g, z njim pa so nadomestili tradicionalen polieter poliol in izdelali poliuretansko peno. Ugotovili so, da so imele pene izdelane iz biopoliola višje gostote in so imele večje tlačne trdnosti, kot navadne poliuretanske pene. Dodali so še sredstvo proti gorenju in s tem izboljšali odpornost proti gorenju. Tako pripravljeno PU peno so pregledali tudi z elektronskim mikroskopom in ugotovili, da ima pena gladko površino in homogeno strukturo (Liu in sod., 2009).

Poliuretansko peno so izdelali iz biopoliola s kombinacijo bambusovih ostankov in koruznega škroba. Glede na to, da je za doseganje čim nižjih proizvodnih stroškov bistveno, da je vsebnost biomase v biopoliolu čim večja, so poskušali pene izdelati z različnimi deleži bambusa in koruznega škroba. Utekočinjeno mešanico, ki je vsebovala bambusove ostanke in koruzni škrob, so zmešali z diizocianatom, da so dobili molarno razmerje (-NCO/-OH) 1.1, ter tako izdelali poliuretansko peno s sprejemljivimi mehanskimi lastnostmi: gostota $33,6 \text{ kg/m}^3$, tlačna trdnost 118 kPa in modul elastičnosti 6,91 MPa (Liu in sod., 2008).

Bambusove ostanke so utekočinili s PEG 400 in surovim glicerolom v razmerju 4:1, kot katalizator pa so uporabili žveplovo kislino. Hidroksilno število utekočinjenega bambusa je bilo med 178 mg in 200 mg KOH/g. Z dodatkom različnih količin izocianata, destilirane vode, silikona in katalizatorja so proizvedli poltrde poliuretanske pene. Razmerje med izocianatom in hidroksilnimi skupinami se je izkazalo kot bistven dejavnik za doseganje želenih mehanskih lastnosti poliuretanske pene. Mikrostruktura PU pen dokazuje, da je razmerje pomembno za formacijo celic in kemične reakcije, sama celična struktura pa je primerljiva z vrednostmi tlačne trdnosti (Gao in sod., 2010).

Poliuretanske pene so izdelali tudi iz palmovega olja. V prvi fazi so iz olja izdelali monoglicerid, nato pa so iz poliola z dodatkom PEG 200 ali DEG (dietilenglikol) in izocianata izdelali poliuretanske pene, ki so jih ocenili z mehanskimi in termičnimi analizami. Poliuretanske pene izdelane v tej raziskavi so bile poltrde. Ob uporabi PEG 200, so imele pene gostoto med $0,05$ in $0,13 \text{ g/cm}^3$, pri DEG pa med $0,06$ in $0,07 \text{ g/cm}^3$. Hirose in sod. (1994) so ugotovili, da imajo dobre pene gostoto med $0,04$ in $0,05 \text{ g/cm}^3$. Iz tega vidika so imele pene izdelane z DEG boljšo strukturo kot tiste izdelane s PEG 200. Analize so pokazale, da z višjimi vsebnostmi palmovega olja dosežemo večjo fleksibilnost, kar kaže na to, da molekule monoglicerida delujejo kot mehki deli v poliuretanu, zaradi prisotnosti dolgih alkilnih verig (Tanaka in sod., 2008).

Biorazgradljive poliuretanske pene so izdelali tudi iz odpadnega papirja z uporabo polihidričnih alkoholov. Pene so imele zadovoljivo gostoto in so imele podobne mehanske lastnosti, kot pene izdelane iz utekočinjenega lesa in skorje. Pene so bile biorazgradljive, v vodi pa ni bilo mutagenih in kancerogenih snovi (Lee in sod. 2002).

Trnovšek (2006) je izdelal linearni poliester z uporabo utekočinjenega lesa za izdelavo PU pen. S tem je povečal delež utekočinjenega lesa v peni na največ 40 odstotkov, vendar bi ga lahko še povečal. Izdelali so trinajst receptur utekočinjanja lesa, kjer so dodajali različne količine glikolov in kislin, in petindvajset pen. Ugotovili so, da je lastnost pene močno odvisna od dodajanja penilcev, površinsko aktivnih snovi, vode, izocianata in katalizatorja. Z dodatkom vode, pene bolj narastejo in postanejo manj kompaktne, z dodatkom izocianata pa pene postanejo bolj elastične in volumsko večje. Količina in vrsta glikola vplivata na hidroksilno število. Dobljeni produkti so bili primerljivi s komercialnimi izdelki.

Sledila je optimizacija izdelave PU pene z uporabo utekočinjenega lesa. Iz linearnega poliestra so izdelali 9 različnih vrst pen, ki so imele podobno gostoto in so bile močno hidrofilne. Ugotovili so, da je delež anhidrida kisline vplival na lastnosti pen. Pomemben dejavnik pa je tudi delež utekočinjenega lesa, saj večji kot je ta delež, bolj hidrofilna bo pena. Na barvo pene utekočinjenega lesa vpliva vrsta uporabljene kisline (Mihalič, 2007).

3 MATERIALI IN METODE

Osredotočali smo se na izdelavo lahkih ploščnih kompozitov, ki so sestavljeni iz zunanje in srednjega sloja. Lahke ploščne kompozite s srednjim slojem iz industrijsko izdelanih satovij in konvencionalne PU pene smo izdelali zato, da smo pridobili referenčne vrednosti. Bistvo naloge je bila izdelava LPK s sredico iz pene iz utekočinjenega lesa, katere bi lahko uporabili v pohištveni industriji.

3.1 MATERIALI

3.1.1 Zunanji sloj

Za zunanji sloj LPK smo uporabili:

- Laboratorijsko izdelano iverno ploščo $t = 4 \text{ mm}$
- Industrijsko izdelano MDF ploščo $t = 3 \text{ mm}$
- Industrijsko izdelano iverno ploščo $t = 8 \text{ mm}$

3.1.2 Srednji sloj

Za izdelavo srednjega sloja smo uporabili različne materiale (industrijske in laboratorijsko izdelane), ki so navedeni v preglednici 1.

Preglednica 1: Materiali uporabljeni za srednji sloj lahkih ploščnih kompozitov

Tip izdelave	Materiali
Industrijska satovja	Aluminij
	Polietilen
	Polipropilen
	Papir
Laboratorijska izdelava	Industrijska PU pena
	Laboratorijska PUL

Poliuretanska pena iz utekočinjenega lesa je vsebovala:

- Utekočinjen les s hidroksilnim številom 880 mg KOH/g, katerega je v peni približno 15%
- Reagent (glicerol) kot zamreževalec, za tvorjenje 3D strukture
- Silikonski aditiv za tvorbo zaprtih celic, ki so bolj izolativne
- Pospeševalec (amin), za pospeševanje reakcije tvorjenja uretanskih vezi med izocianatom in prostimi hidroksilnimi skupinami
- Katalizator (polimer z aminskimi skupinami) za zamreževanje 3D polimerne strukture
- PMDI, za reakcijo s prostimi hidroksilnimi skupinami
- Penilo (etanol) reagira z izocianatom

Utekočinjen les ima proste hidroksilne skupine, ki z reakcijo z izocianatom tvorijo uretanske vezi. Sama struktura utekočinjenega lesa je linearna, zato so mehanske in fizikalne lastnosti slabše kot pri razvejani strukturi. V mešanico se zato doda glicerol, ki ima prav tako kot utekočinjen les, proste hidroksilne skupine, le da te ustvarijo razvejano 3D strukturo, s čimer dobimo boljše lastnosti. Z dodatkom glicerola dobimo boljšo in tršo peno, ki se ne skrči. Nato se reakcijski zmesi doda še katalizator, ki tvori zamreženo 3D strukturo. Penilo, ki je lahko voda ali etanol, poskrbi za penjenje in volumsko naraščanje pene. Reakcija, ki poteče, je eksotermna, saj se v okolico sprošča toplota, iz pene pa med reakcijo izhaja CO₂. V industriji se kot penilo večkrat uporablja pentan, z dodatkom katerega pride do fizikalne spremembe, saj ob poteku reakcije pentan izhlapi, med reakcijo pa ne pride do nastanka stranskih produktov. Na samo hitrost reakcije vplivamo z dodatkom pospeševalca. Za boljšo hidrofobnost in izolativnost, pa se reakcijski zmesi doda še silikonsko površinsko aktivno sredstvo, ki tvori zaprte celice.

3.2 METODE DELA

3.2.1 Izdelava ivernih plošč za zunanji sloj

Pri pripravi zunanjega sloja smo najprej pripravili 5570,12 g smrekovih iveri, ki smo jih skupaj z lepilom stresli v stroj za oblepljanje. Uporabili smo 770,22 g melamin-urea formaldehidnega lepila (Meldur H97), ki smo mu dodali vodo in utrjevalec - amonijev sulfat (17%). Iverno pogačo velikosti 500 x 500 mm² smo stiskali 2 minuti pri temperaturi 180 °C in tlaku 2,5 N/mm². Za prvi preizkus smo postopek ponovili dvakrat, iz vsake serije smo naredili 4 plošče.



Slika 3: Laboratorijsko izdelane iverne plošče

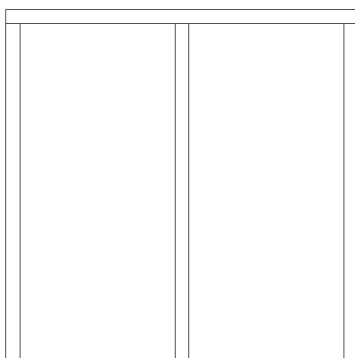
3.2.2 Izdelava plošč s sredico iz satovja

Na vsako ploščo smo nanесли 40 g poliuretanskega (PU) lepila Mitopur (nanos lepila je bil 160 g/m²). Sledila je namestitev satovja na ploščo in postavitve zgornjega sloja na satovje. Za srednji sloj smo uporabili industrijsko izdelana satovja iz aluminija, polipropilena in polietilena. S tem smo pridobili okvirne vrednosti LPK z industrijskimi satovji, saj standardi za njih ne obstajajo. Tako smo določili, kakšnim vrednostim se moramo približati

z izdelavo LPK s peno iz utekočinjenega lesa. Vse skupaj smo postavili na ravno mesto in obtežili. Po nekaj dnevih smo naše lahke ploščne kompozite razžagali na primerne dimenzije za preizkus upogibne trdnosti, maksimalne tlačne obremenitve in spremembo debeline pri tlačni obremenitvi.

3.2.3 Izdelava plošč iz poliuretanske pene

Za nanašanje poliuretanske pene (v nadaljevanju PU pene) je bilo potrebno zaradi ekspanzije pene najprej narediti okvir, ki ga prikazuje slika 4. Plošča je bila iz treh strani zaprta s smrekovimi letvicami. Pri prvi plošči s PU peno, je bil nanos pene naključen, saj smo želeli določiti le okvirne vrednosti. Na prvo ploščo s PU peno smo predhodno nanесли tudi poliuretansko lepilo, iz te plošče pa smo kasneje pripravili preizkušance za določanje tlačne obremenitve in upogibno trdnost. Za naslednji preizkus smo uporabili topolove letvice debelin 20 mm in 32 mm, ki smo jih primerno razporedili po plošči in pritrdili s spenjalnikom. Topolove letvice smo uporabili zato, da smo čim manj povečali maso plošče. Nato smo približno enakomerno nanесли PU peno na obe strani okvirja. Pripravili smo 4 plošče z različnimi nanosi, ki jih lahko vidimo na sliki 5. Prva plošča z debelino 25 mm je vsebovala 60 g PU pene, druga plošča debeline 36 mm je vsebovala 120 g PU pene, tretja plošča 38 mm je vsebovala 180 g PU pene, četrta plošča debeline 25 mm pa je vsebovala 240 g PU pene. Zatем, ko smo na vsako ploščo nanесли potrebno količino, smo na vrh postavili drugo ploščo in jo s spenjalnikom trdno pritrdili. Plošče smo obtežili in pustili teden dni, da je PU pena dokončno utrdila. Sledila je priprava preizkušancev za preizkus stisljivosti pri tlačni obremenitvi.



Slika 4: Skica okvirja pred nanosom PU pene



Slika 5: Plošče z različnimi nanosi PU pene

3.2.4 Poliuretanska pena iz utekočinjenega lesa

Pri laboratorijski izdelavi ivernih plošč smo opazili močne variacije debelin, kar je bila posledica neravnih plošč (vidno na sliki 3). Za naš poskus pa smo želeli testirati sredico in za večjo točnost podatkov smo tokrat uporabili kar industrijsko izdelane 3 mm debele MDF plošče. Za srednji sloj smo uporabili laboratorijsko izdelano peno iz utekočinjenega lesa.

Najprej smo v laboratoriju pripravili okvirje. Ob treh robovih in na sredini smo pritrdili smrekove letvice debelin 17 mm in 25 mm. Želeli smo namreč ustvariti kompozite z debelino 25 mm in 32 mm, saj se kompoziti takšnih debelin pri pohištvu največkrat uporabljajo. Nato smo izračunali kakšen volumen poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa (v nadaljevanju PUL) potrebujemo za zapolnitev teh plošč. Peno iz utekočinjenega lesa smo pripravili v laboratoriju Kemijskega inštituta v Ljubljani. Za eno stran okvirja 25 mm debelega kompozita smo potrebovali 196,2 g pene (volumen pene za en 25mm kalup je znašal 4200 cm³) iz utekočinjenega lesa, torej smo za celo ploščo potrebovali 392,4 g PUL. Za 34 mm kompozit pa smo potrebovali 294,3 g PUL za eno stran okvirja (volumen pene je znašal 6000 cm³), torej 588,6 g PUL za celo ploščo.

PUL smo pripravili tako, da smo zatehtali potrebne komponente in nato intenzivno premešali. Po dobri minuti mešanja smo PUL vlili v kalup. Tekom izdelave smo mešanico za izdelavo pene večkrat spreminjali. Pri izdelavi prve plošče smo videli, da je reakcija potekala prepočasno, zato smo optimizirali hitrost reakcije s povišanjem deleža pospeševalca v reakcijsko zmes. Izdelali smo štiri plošče debelin 25 mm in 32 mm. Da bi dosegli večjo zgostitev v sredini, smo eno ploščo zaprli iz vseh strani, kar pa ni bilo najbolje, saj je že med samo reakcijo prišlo do nabreka plošče v sredini. Kompoziti po prvi izdelavi niso bili uporabljeni za testiranje. PUL je bila krhka in se je drobila.

Pri izdelavi druge serije plošč smo želeli izboljšati trdoto in elastičnost pene. Uporabili smo nekoliko spremenjeno sestavo mešanice, saj smo v želji, da bi dosegli boljše lastnosti, povečali količino dodanega glicerola. V drugi seriji smo izdelali tri plošče. En teden po izdelavi so bili kompoziti še vedno krhki, nekateri so med preizkušanjem razpadli. Nekaj preizkušancev druge serije smo po 15 dneh kondicioniranja ponovno preizkusili. Ugotovili smo, da so bile dobljene lastnosti boljše, zato smo se odločili še za izdelavo tretje serije plošč.

Pred izdelavo tretje serije kompozitov smo zopet rahlo spremenili mešanico, saj smo ponovno povečali količino dodanega glicerola in tokrat tudi delež izocianata. Zadnjo serijo kompozitov smo pred preizkušanjem en mesec kondicionirali. Pena je bila po tretji seriji bolj elastična in bolj žilava. Na slikah 6, 7 in 8 so prikazane tri faze izdelave kompozita.



Slika 6: Izdelava lahkega ploščnega kompozita: vlivanje PUL



Slika 7: Prikaz raztezanja PUL po nekaj sekundah



Slika 8: Obtežitev dozirne odprtine med potekom reakcije

3.3 METODE PREIZKUŠANJA

3.3.1 Določanje gostote

Gostoto LPK smo določili v skladu s standardom SIST EN 323:1993. Iz plošč industrijskih satovij, PU pene in PUL smo najprej izžagali preizkušance dimenzij 50 x 50 mm² (slika 9). Vse preizkušance smo označili, tehtali maso in določili dolžino, širino in debelino. Iz dobljenih podatkov smo izračunali gostoto.



Slika 9: Preizkušanci pripravljeni za merjenje debeline z mikrometrom

Formula za izračun gostote:

$$\rho = \frac{m}{(l \cdot b \cdot t)} [g/cm^3] \quad \dots(1)$$

Pomen oznak:

- ρ gostota (g/cm³)
- m masa (g)
- l dolžina (cm)
- b širina (cm)
- t debelina (cm)

3.3.2 Preizkus odpornosti proti tlaku in sprememba debeline pri tlačni obremenitvi

Preizkušanje je potekalo po dveh metodah: po prvi metodi smo nekaj preizkušancev industrijskih satovij in PU pene stisnili do loma (sliki 10 in 11). Ugotovili smo, da pri PU peni ti podatki niso relevantni, saj se je le ta pri maksimalni obremenitvi 50 000 N, stisnila skoraj do debeline zunanjih slojev, kar lahko vidimo na sliki 12. Iz eksperimenta smo določili, da je obremenitev 300 N tista, do katere je bilo pri PU peni naraščanje linearno, nato pa je prišlo do porušitve strukture. Zato smo po drugi metodi preizkušance obremenili do maksimalne tlačne obremenitve 300 N. Merili smo spremembo debeline in stisljivost materiala. Preizkus odpornosti proti tlaku smo opravljali na preizkušancih velikosti 50 x 50 mm², na stroju Zwick Z 100, kar lahko vidimo na slikah 10 in 11. Pomik stroja smo nastavili na 10 mm/min.



Slika 10: Tlačna obremenitev LPK iz industrijskega satovja



Slika 11: Tlačna obremenitev LPK iz PU pene



Slika 12: Preizkušanca PU pene pred in po preizkusu maksimalne tlačne obremenitve

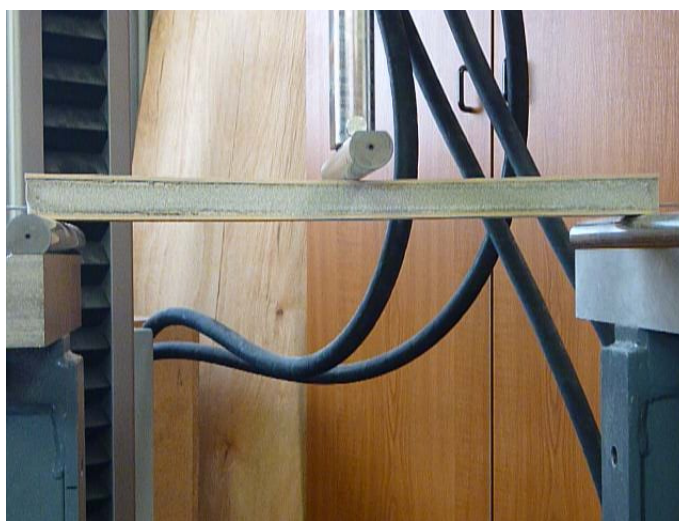
Poleg ugotavljanja spremembe debeline po maksimalni tlačni obremenitvi 300 N na preizkušancih velikosti 50 x 50 mm², smo spremembo debeline ugotavljali tudi na preizkušancih velikosti 100 x 100 mm², od katerih smo štiri tlačno obremenili do največ 300 N, štiri pa do največ 5000 N. Za primerjavo vrednosti smo preizkusili še dva preizkušanca s papirnatim satovjem, od katerih smo enega obremenili do največ 300 N, drugega pa do največ 5000 N.

3.3.3 Preizkus upogibne trdnosti

Upogibno trdnost smo izvajali v skladu s standardom SIST EN 310:1996. Preizkus smo izvajali pri preizkušancih narejenih iz industrijskih satovij, PU pene in zadnje serije PUL. Preizkušancem smo izmerili širino, debelino in dolžino, da smo lahko določili oporiščno razdaljo. Skupno smo pripravili 6 preizkušancev 50 x 250 mm² z aluminijevim satovjem, 6 preizkušancev 50 x 465 mm² s polietilenskim satovjem, 3 preizkušance 50 x 450 mm² s polipropilenskim satovjem, 7 preizkušancev 50 x 450 mm² s PU peno in 5 preizkušancev 50 x 350 mm² s PUL. Za konec smo preizkusili še upogibno trdnost MDF plošče, ki je služila kot zunanji sloj našega kompozita. Vse preizkuse upogibne trdnosti smo izvajali na stroju Zwick Z 100, kar lahko vidimo na slikah 13 in 14. Pomik stroja smo nastavili na 6 mm/min.



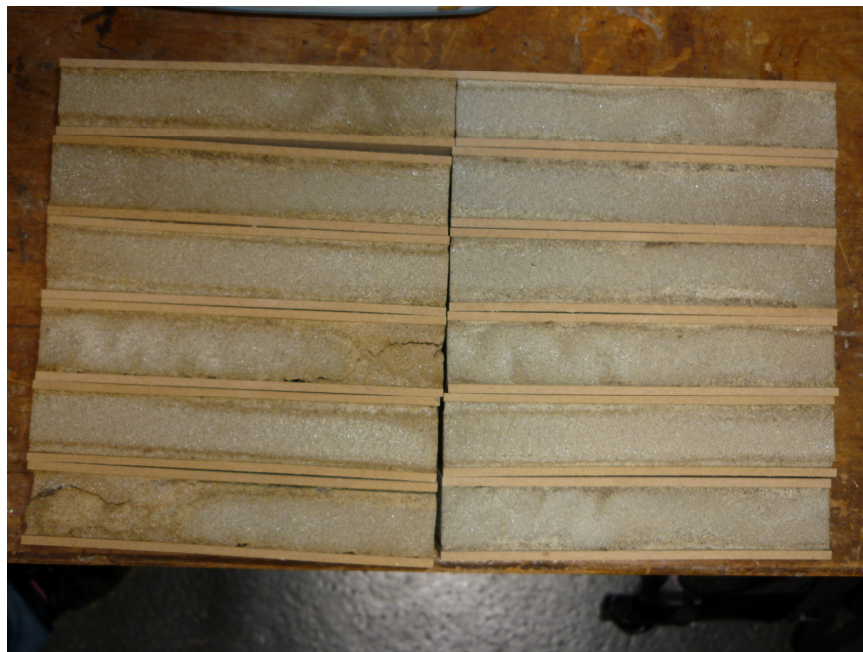
Slika 13: Preizkus upogibne trdnosti LPK iz industrijskega satovja



Slika 14: Preizkus upogibne trdnosti LPK iz PUL

3.3.4 Dimenzijska obstojnost

Na koncu smo pripravili še preizkušance iz zadnje serije plošč PUL, da bi ugotovili njihovo dimenzijsko obstojnost. Pripravili smo skupno 12 preizkušancev dimenzij $150 \times 50 \text{ mm}^2$, ki smo jim označili tri točke za merjenje debeline. Najprej smo stehtali maso in izmerili dolžino in širino preizkušancev, nato pa tudi debelino na treh različnih mestih. Iz treh meritev smo izračunali njihovo povprečno debelino. Po opravljenih meritvah smo preizkušance najprej tri dni kondicionirali v komori z relativno zračno vlažnostjo $\phi = 65\%$. Zatem smo jih šest vstavili v vlažnostno komoro z nasičeno raztopino soli MgCl_2 , z relativno zračno vlažnostjo $\phi = 33\%$, drugih šest pa v vlažnostno komoro z nasičeno raztopino soli ZnSO_4 , kjer je bila relativna zračna vlažnost $\phi = 87\%$. Po štirih dneh, ko so dosegli konstantno maso, smo preizkušance ponovno izmerili in tiste iz komore z relativno zračno vlažnostjo $\phi = 33\%$ prestavili v komoro z relativno zračno vlažnostjo $\phi = 87\%$ in obratno. Po naslednjih štirih dneh smo preizkušance vzeli ven in jih še enkrat izmerili, rezultate meritev pa smo uporabili za izračun spremembe mase in debeline.



Slika 15: Preizkušanci za ugotavljanje dimenzijske obstojnosti

4 REZULTATI

4.1 TLAČNA OBREMENITEV

V preglednici 2 so prikazane maksimalne obremenitve kompozitov s sredico iz aluminijevega in polietilenskega satovja ter maksimalna obremenitev kompozita s sredico iz PU pene. Pri PU peni, se je stroj sam zaustavil na 50 000 N. Opazili smo, da se je PU pena stisnila skoraj do debeline zunanjih slojev. Največjo tlačno obremenitev je preneslo aluminijevo satovje, pri PU peni prišlo do prve porušitve že pri približno 300 N.

Preglednica 2: Maksimalna tlačna obremenitev preizkušancev 50 x 50 mm²

SL	CL	ρ (g/cm ³)	F max (N)
Lab. iverna plošča	PU pena	0,223	50 000
Lab. iverna plošča	AL	0,550	9 673
Lab. iverna plošča	PE	0,354	2 672

SL..... zunanji sloj

CL..... srednji sloj

PU pena..... poliuretanska pena

AL..... aluminijevo satovje

PE..... polietilensko satovje

V preglednicah 3, 4, 5 in 6 so navedeni različni preizkušanci, velikosti 50 x 50 mm², katerim smo določili gostoto ter jih nato preizkušali do najvišje obremenitve 300 N in pri tem spremljali spremembo debeline v odstotkih in stisljivost.

Eden od razlogov, ki je vplival na določitev najvišje tlačne obremenitve 300 N, je bila tudi sama namembnost materiala. Hipoteza diplomskega dela je bila namreč možnost uporabe kompozita v pohištveni industriji, predvsem za izdelavo polic in omaric, kjer ponavadi masa obtežitve ne presega trideset kilogramov. Smisel uporabe lahkih ploščnih kompozitov je predvsem v doseganju potrebnih lastnosti glede na namen uporabe, saj v nasprotnem primeru njihova izdelava ni več smiselna.

Preglednica 3: Sprememba debeline za preizkušance PU pene in industrijskih satovij, velikosti 50 x 50 mm², pri tlačni obremenitvi 300 N

SL	CL	ρ (g/cm ³)	dL (mm)	Δt (%)
Lab. iverna plošča	PU pena	0,229	4,80	2,281
Lab. iverna plošča	AL	0,547	0,31	0,580
Lab. iverna plošča	PE	0,350	0,38	0,193

Najvišje vrednosti smo po pričakovanju dobili z aluminijevim satovjem, kjer smo imeli tudi najvišjo gostoto. Deformacije pri aluminijevem in polietilenskem satovju so bile minimalne. Po sprostitvi obremenitve so bile spremembe debeline med 0,2% in 0,6%.

Preglednica 4: Sprememba debeline za preizkušance PU pene z različnimi nanosi, velikosti 50 x 50 mm², pri tlačni obremenitvi 300 N

SL	CL	ρ (g/cm ³)	dL (mm)	Δt (%)
Lab. iverna plošča	240 g PU	0,222	2,52	2,298
Lab. iverna plošča	180 g PU	0,166	11,85	11,475
Lab. iverna plošča	120 g PU	0,160	13,20	10,924
Lab. iverna plošča	60 g PU	0,210	9,76	12,279

Pri razžagovanju se je pojavil problem pri ploščah z nanosi 60 g in 120 g. Površina plošč namreč ni bila popolnoma zapolnjena, zato je veliko preizkušancev razpadlo že med samim razžagovanjem. Nanosi manjši od 120 g zato niso relevantni. Iz tega izhaja sklep, da so okvirne optimalne vrednosti nanosa, kot smo ugotovili po meritvah, od 180 g do 240 g PU pene na ploščo.

Preglednica 5: Sprememba debeline za preizkušance PUL, velikosti 50 x 50 mm², pri maksimalni tlačni obremenitvi 300 N

SL	CL	ρ (g/cm ³)	dL (mm)	Δt (%)
Ind. MDF plošča	PUL 1	0,236	15,80	37,808
Ind. MDF plošča	PUL 2	0,294	11,80	50,070

V preglednici 5 so navedeni rezultati opravljenih meritev en teden po izdelavi kompozita. Pri PUL 1 in PUL 2 smo dobili zelo slabe vrednosti, ker plošč nismo dovolj dolgo kondicionirali. PUL je bila krhka in se je drobila, večina preizkušancev je po preizkušanju razpadla. Nekaj preizkušancev smo ponovno preizkusili čez 15 dni, da bi ugotovili, če se s časom lastnosti kompozita še dodatno izboljšajo. Opazili smo, da je PUL s časom postajala vse trša.

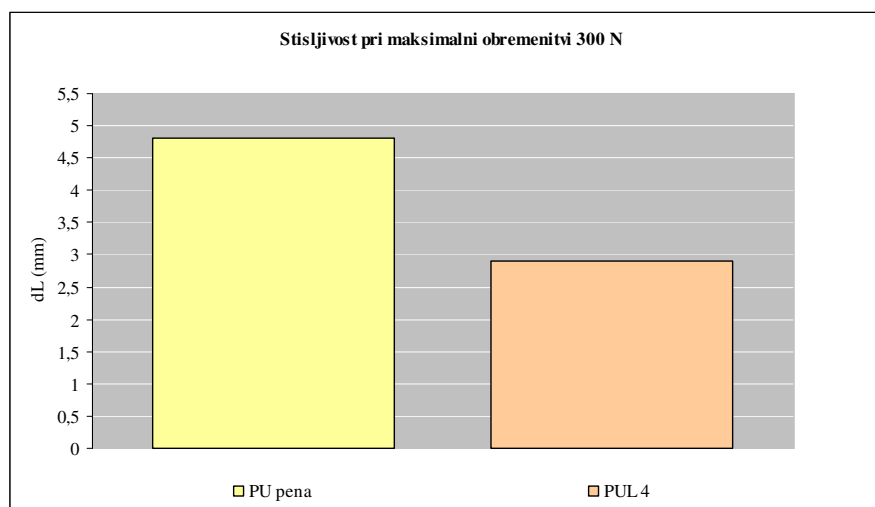
Preglednica 6: Sprememba debeline za preizkušance PUL, velikosti 50 x 50 mm², pri maksimalni tlačni obremenitvi 300 N

SL	CL	ρ (g/cm ³)	dL (mm)	Δt (%)
Ind. MDF plošča	PUL 3.1 *	0,251	9,50	17,853
Ind. MDF plošča	PUL 3.2 **	0,255	4,00	2,771
Ind. MDF plošča	PUL 4	0,263	2,90	3,420

*PUL 3.1 preizkušance smo preizkušali en teden po izdelavi

**PUL 3.2 preizkušance smo preizkušali tri tedne po izdelavi

Po treh tednih se je PUL precej strdila in smo zato ponovili preizkušanje. Rezultati ponovnega preizkušanja so razvidni iz preglednice 6. Pridobljeni rezultati so bili tokrat primerljivi s PU peno iz preglednice 3 in papirnatim satovjem iz preglednice 7. Iz tega sledi sklep, da je potrebno plošče, če želimo doseči boljše mehanske lastnosti, dovolj dolgo kondicionirati. Zadnjo serijo kompozitov (PUL 4) smo po izdelavi kondicionirali 1 mesec.



Slika 16: Graf - primerjava stisljivosti med PU peno in optimalno izdelano PUL

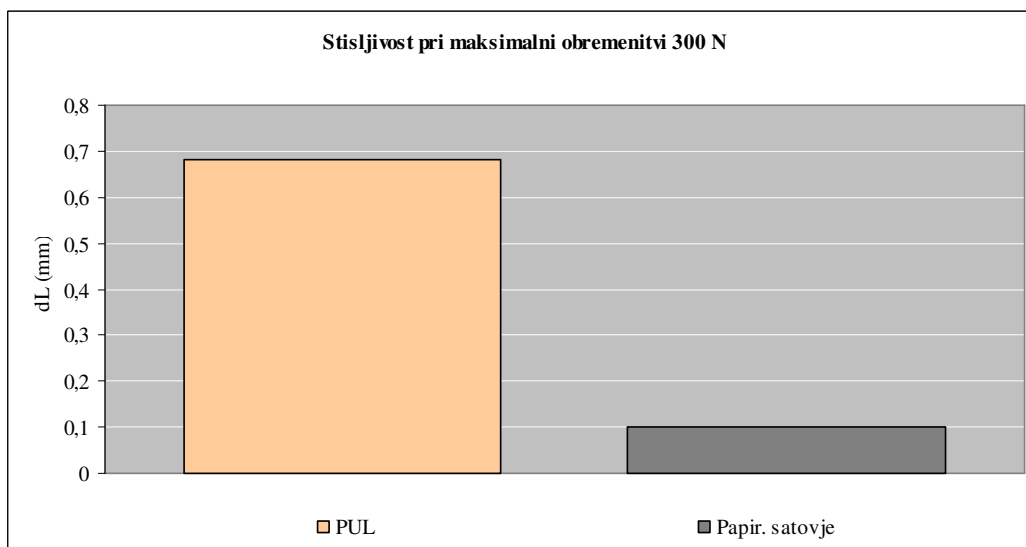
Iz grafa je razvidno, da je pri obremenitvi do 300 N prišlo pri PU peni do večje komprimacije kot pri PUL. Pri tem je potrebno upoštevati, da je bila gostota PUL 4 večja od gostote PU pene, kar je zagotovo vplivalo na manjšo stisljivost.

V preglednici 7 je prikazana primerjava med stisljivostjo papirnatega satovja in PUL na preizkušanih dimenzij 100 x 100 mm², ki je grafično prikazana še na sliki 17.

Preglednica 7: Stisljivost papirnatega satovja in PUL, pri tlačni obremenitvi, za preizkušance 100 x 100 mm²

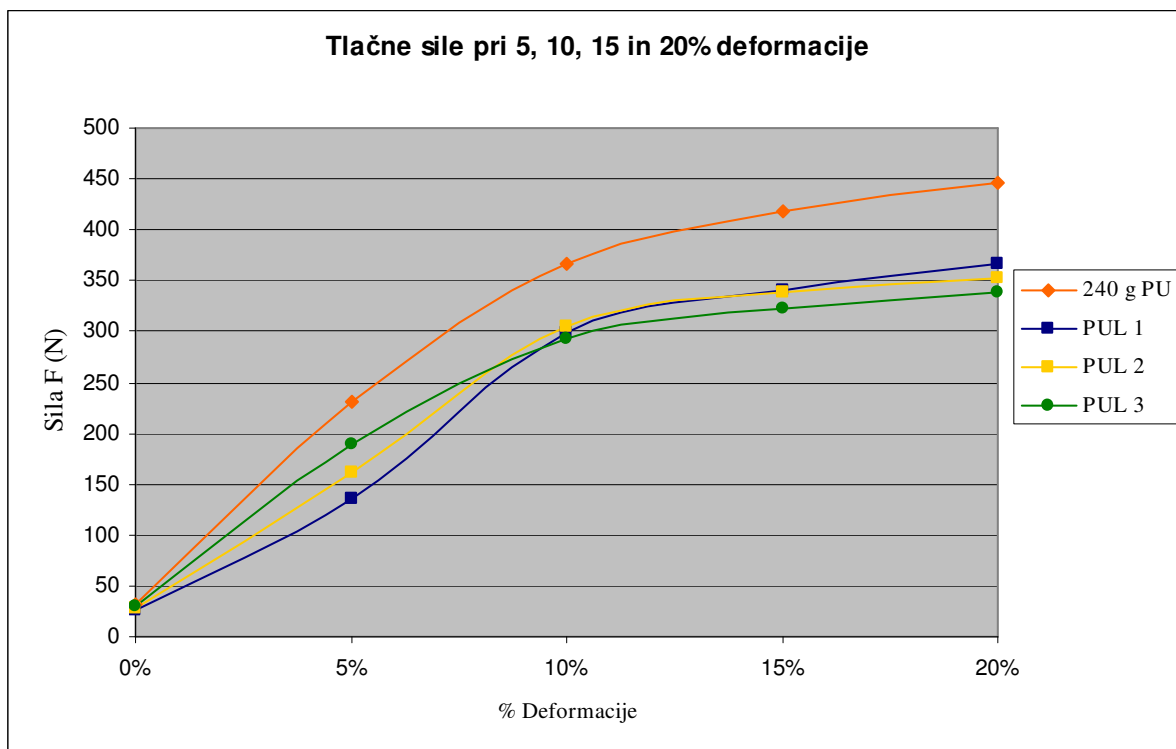
SL	CL	dL do 300 N	dL do 5000 N
Ind. MDF 3 mm	PUL 4	0,68	16,28
Ind. iverna pl. 8 mm	Papir. satovje	0,10	0,60

Pri papirnatem satovju smo dosegli maksimalno tlačno obremenitev okrog 2000 N, medtem ko smo kompozit s PUL lahko obremenili do maksimalne obremenitve 5000 N. Opazili smo, da je pri papirnatem satovju sicer prišlo do deformacije, vendar se je struktura kompozita obdržala. Kompozit iz PUL je pri maksimalni obremenitvi 5000 N razpadel.



Slika 17: Graf - primerjava stisljivosti med PUL in papirnatim satovjem

Med izbranimi materiali, ki smo jih preizkušali, sta si PUL in papirnato satovje po lastnostih še najbolj primerljiva. Manjšo stisljivost je dosegel kompozit z industrijskim papirnatim satovjem. Dosežene vrednosti so bile za preizkušance iz PUL 100 x 100 mm² boljše, kot so bile pri manjših dimenzijah (50 x 50 mm²).



Slika 18: Graf - sile deformacije pri obremenitvi na tlak

Kot je razvidno iz grafa (slika 18), smo izmerili največjo tlačno silo pri preizkušanju LPK s PU peno z nanosom 240 g, katerega gostota je bila $\rho = 0,223 \text{ g/cm}^3$. Za primerjavo smo izvedli poskus tudi s tremi preizkušanci iz PUL, ki so imeli gostoto $\rho = 0,250 \text{ g/cm}^3$. Sila, pri kateri se je začela deformacija, je bila v vseh primerih podobna, okrog 30 N. Opazili smo, da se je LPK iz PU pene pri enakih obremenitvah stisnil manj. Za 10% deformacijo je bila pri konvencionalni PU peni potrebna sila 366 N, pri LPK iz PUL pa je bila ta sila med 292 N in 305 N. Glede na to, da je bila gostota LPK iz PU pene nižja, sile ob 10% deformaciji pa višje, lahko rečemo, da kompozit iz PU pene lahko prenaša večje tlačne sile, kot tisti iz PUL.

4.2 UPOGIBNA TRDNOST

V preglednici 8 se nahajajo vrednosti upogibne trdnosti lahkih ploščnih kompozitov z zunanjim slojem iz laboratorijsko izdelanih ivernih plošč in srednjim slojem iz industrijskih satovij in PU pene, ter upogibna trdnost LPK s sredico iz pene iz utekočinjenega lesa in zunanjim slojem iz industrijsko izdelane 3 mm MDF plošče.

Upogibna trdnost je pri LPK iz PUL najnižja, pri čemer smo opazili, da je prišlo do porušitve med nosilno ploščo in peno iz utekočinjenega lesa (slika 19).

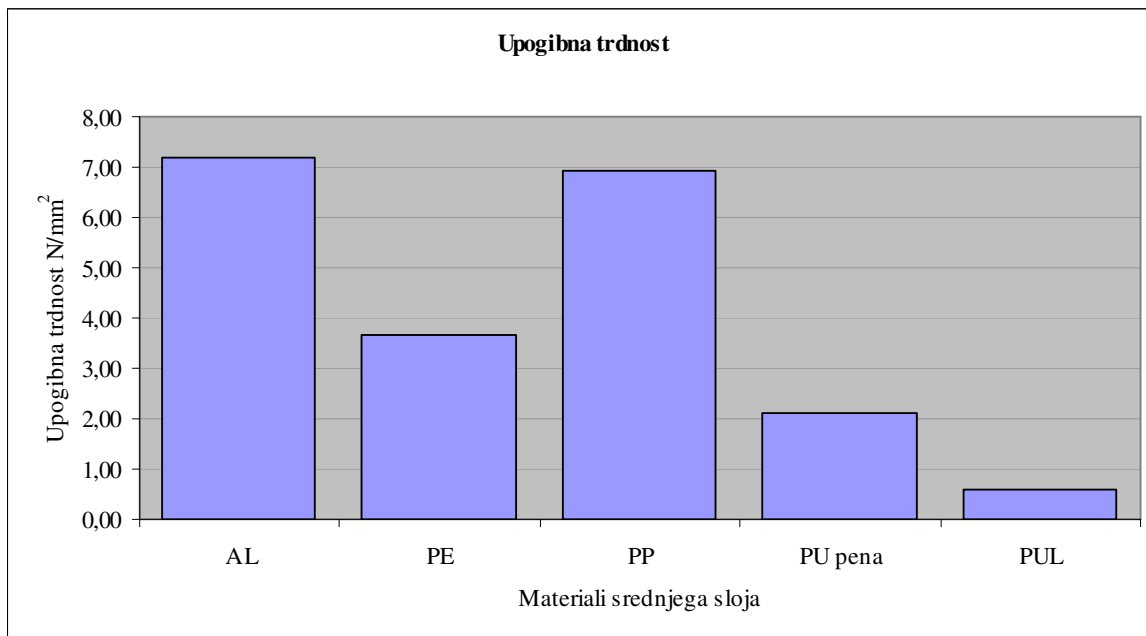
Preglednica 8: Upogibna trdnost lahkih ploščnih kompozitov

SL	CL	f_m (N/mm ²)
Lab. iverna pl.	AL	7,18
Lab. iverna pl.	PE	3,68
Lab. iverna pl.	PP	6,93
Lab. iverna pl.	PU pena	2,10
Ind. MDF pl.	PUL	0,59



Slika 19: Porušitev LPK zaradi strižnih napetosti

Iz preglednice 8 in slike 20 je razvidno, da imajo industrijska satovja precej višjo upogibno trdnost kot LPK iz pene.



Slika 20: Graf upogibne trdnosti različnih materialov srednjega sloja

Najvišjo upogibno trdnost smo po pričakovanju dosegli z aluminijevim in polipropilenskim satovjem. Pri lahkih ploščnih kompozitih je bistvenega pomena to, da so lastnosti kompozita zadostne in ne presegajo želenih vrednosti, zato se ta dva materiala v pohištvni industriji večinoma ne uporabljata. Te podatke lahko uporabimo kot zgornji standard, kakšne lastnosti LPK lahko dosegajo. Najnižjo upogibno trdnost so dosegli LPK s PUL. V diskusiji so navedene različne opcije, s katerimi bi upogibno trdnost še povečali.

V preglednici 9 so navedeni podatki za primerjavo med različnimi materiali, ki smo jih preizkušali. Kot smo domnevali, sta se peni izkazali kot bolj stisljiv material, z nižjo gostoto in slabšo upogibno trdnostjo, kar lahko vidimo tudi na sliki 21.

Preglednica 9: Skupne vrednosti stisljivosti pri tlačni obremenitvi in upogibne trdnosti

SL	CL	t (mm)	ρ (g/cm ³)	dL (mm)	f_m (N/mm ²)
LIP	AL	12,93	0,547	0,31	7,18
LIP	PE	23,34	0,350	0,38	3,68
LIP	PU pena	35,79	0,229	4,8	2,1
IIP	PUL	30,12	0,263	2,9	0,59

SL...zunanji sloj

CL...srednji sloj

t...debelina

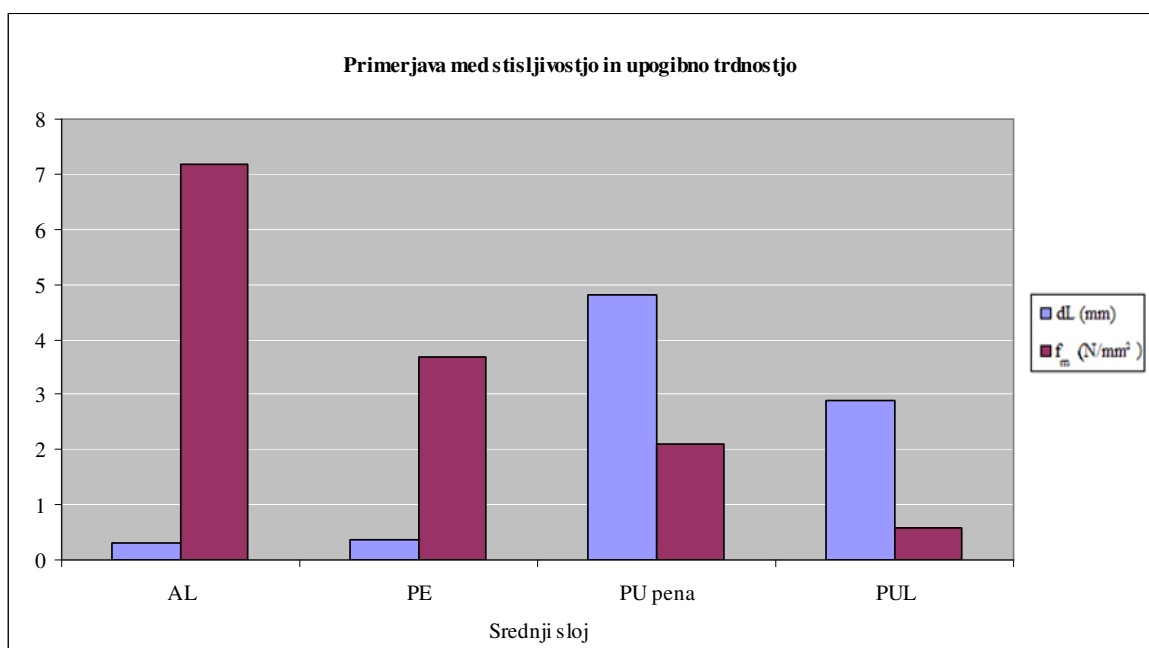
ρ ...gostota

dL...stisljivost

f_m ...upogibna trdnost

LIP...laboratorijsko izdelana plošča

IIP...industrijsko izdelana plošča



Slika 21: Graf stisljivosti in upogibne trdnosti različnih materialov

Največjo upogibno trdnost in najmanjšo deformacijo zaradi tlačne sile smo dosegli z aluminijevim in polietilenskim satovjem. PUL se je med preizkušanjem tlačne obremenitve stisnila manj kot navadna PU pena z naključnim nanosom.

4.3 DIMENZIJSKA OBSTOJNOST

V preglednicah 10, 11 in 12 so prikazane vrednosti za spremembo mase v gramih, debeline v milimetrih in v odstotkih, pri navlaževanju in sušenju. S spreminjanjem vlage se lastnosti LPK iz PUL bistveno ne poslabšajo. Omeniti je potrebno, da je bil naš kompozit sestavljen iz dveh različnih materialov, na katera navlaževanje in sušenje različno vplivata. Tudi zunanji sloj oz. MDF plošča se ob spreminjanju vlage razteza in krči, vendar pa je bilo za naš preizkus bistveno delovanje celotnega kompozita kot takšnega, zato nismo beležili različnega delovanja posameznih komponent. Smo pa opazili, da se je sredica (PUL) pri sušenju bolj skrčila kot pa celoten kompozit. Prišlo je tudi do spremembe v barvi, kar lahko najverjetneje pripišemo delovanju ultravijoličnih žarkov. Iz dobljenih podatkov lahko zaključimo, da so kompoziti dimenzijsko dobro obstojni.

Preglednica 10: Sprememba mase v gramih glede na spremembo klime

	Sprememba relativne zračne vlažnosti			
Δm (g)	65% - 87%	87% - 33%	65% - 33%	33% - 87%
serija 1	/	/	0,757 (-)	3,240 (+)
serija 2	2,558 (+)	2,718 (-)	/	/

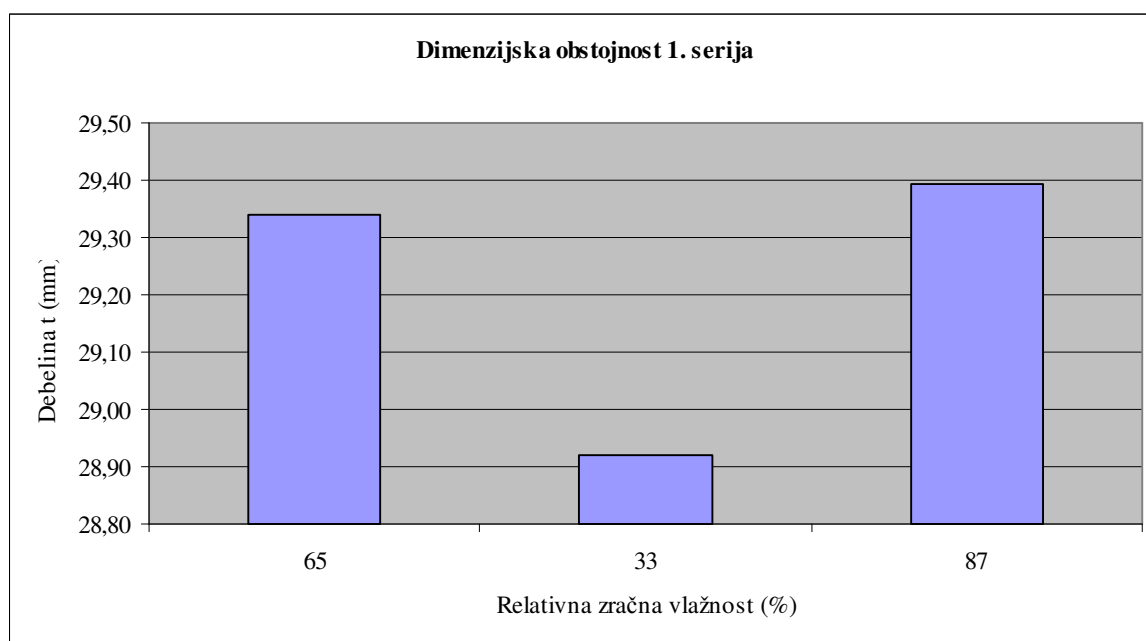
Preglednica 11: Sprememba debeline v milimetrih glede na spremembo klime

	Sprememba relativne zračne vlažnosti			
Δt (mm)	65% - 87%	87% - 33%	65% - 33%	33% - 87%
serija 1	/	/	0,015 (-)	0,016 (+)
serija 2	0,009 (+)	0,018 (-)	/	/

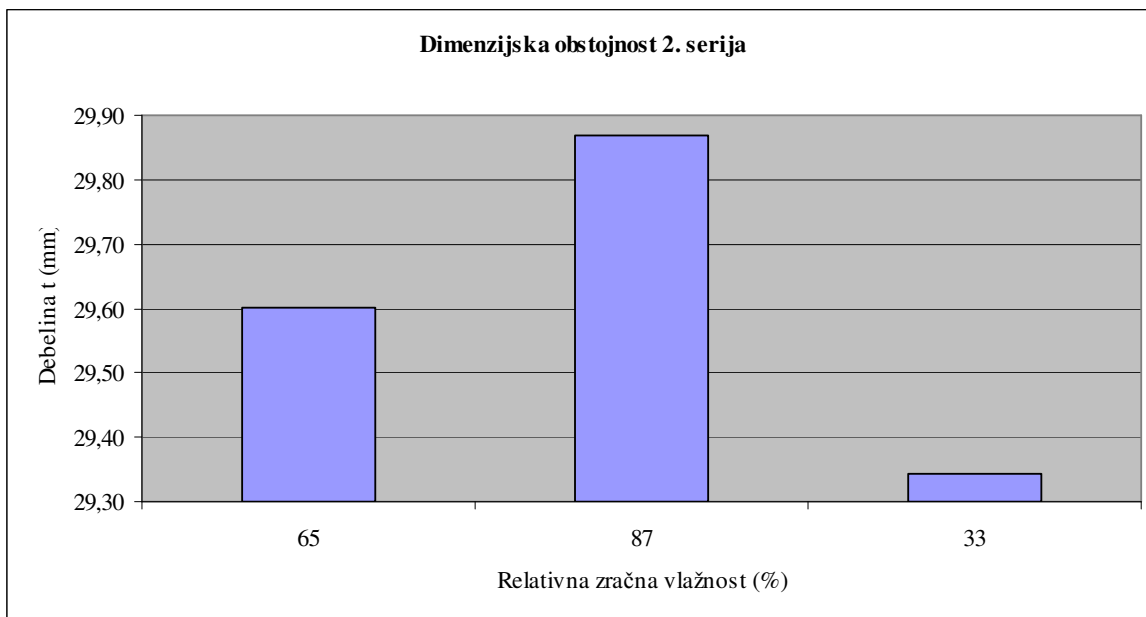
Preglednica 12: Sprememba debeline v odstotkih glede na spremembo klime

	Sprememba relativne zračne vlažnosti			
Δt (%)	65% - 87%	87% - 33%	65% - 33%	33% - 87%
serija 1	/	/	1,45 (-)	1,63 (+)
serija 2	0,91 (+)	1,80 (-)	/	/

Preizkušance smo sprva tri dni kondicionirali na relativni zračni vlažnosti $\varphi = 65\%$, nato pa smo jih vstavili v dve komori z različnimi vlažnostmi ($\varphi = 87\%$ in $\varphi = 33\%$). Po štirih dneh smo preizkušance ponovno izmerili in jih prestavili v drugo komoro, z drugačno relativno zračno vlažnostjo. V preglednici 10 so navedene spremembe mase pri navlaževanju in sušenju. Ob primerjanju podatkov iz preglednice 10 in 11 lahko vidimo, da je pri seriji 1, med sušenjem, prišlo v povprečju do 1,45% debelinskega zmanjšanja kompozita, medtem ko je bila povprečna sprememba mase manjša od 1 g. Drugod je bila sprememba v masi vsaj trikrat večja. To lahko najverjetneje pripišemo temu, da je pri sušenju, ob odstranitvi vode, prišlo do večjega posedanja pene v srednjem sloju. Sklepamo lahko tudi to, da se vlaga v kompozitu akumulira hitreje, kot pa iz njega izhaja. V nadaljevanju so bile razlike med preizkušanci pri navlaževanju in sušenju približno enake. V preglednici 12 vidimo, da so bila procentualna nihanja po debelini manjša od 2%. Iz tega sledi, da so kompoziti dimenzijsko dobro obstojni.



Slika 22: Graf - sprememba debeline prve serije preizkušancev



Slika 23: Graf - sprememba debeline druge serije preizkušancev

Iz slik 22 in 23 je razvidno, da se je debelina ob sušenju in navlaževanju konstantno spreminjala v skladu s pričakovanim, pri čemer se lastnosti kompozita niso bistveno poslabšale. Ravno nasprotno, opazili smo, da se je pena med preizkušanjem še bolj utrdila. Dodatna vlaga je namreč reagirala z izocianatom, kar je prispevalo k večji trdnosti kompozita. Z dodatkom glicerola smo izboljšali 3D zamreženost in s tem povečali tudi dimenzijsko obstojnost. Omeniti je potrebno še to, da sta se tako MDF plošča, ki je služila za zunanji sloj, kot tudi PUL (srednji sloj) ob spremembah relativne zračne vlažnosti obnašali različno, vendar smo mi upoštevali obstojnost celotnega kompozita, ne pa le njegovih sestavnih delov. Opazili smo, da se je sredica skrčila bolj, kot celoten kompozit.

5 RAZPRAVA

V diplomski nalogi smo izdelali lahek ploščni kompozit s sredico iz poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa. Med samim izdelovanjem smo opazili določene pomanjkljivosti, ki smo jih sproti odpravili. Z zvišanjem izocianatnega indeksa in z večjim dodatkom glicerola smo izboljšali žilavost in elastičnost pene. Z dodatkom glicerola pa se je s tvorjenjem tridimenzionalne strukture izboljšala tudi dimenzijska obstojnost kompozitov. V želji, da bi dosegli čim večjo zgostitev srednjega sloja smo plošče zaprli tudi na vrhu in jih obtežili. Glede na to, da standardi za LPK ne obstajajo, smo za primerjavo izdelali kompozite s sredico iz industrijskih satovij iz aluminija, polipropilena in polietilena ter plošče iz komercialne PU pene, pri čemer smo spreminjali količine nanosov (60 g, 120 g, 180 g, 240 g). Za zunanji sloj smo pri teh preizkušancih uporabili laboratorijsko izdelane 4 mm iverne plošče, ki pa niso bile ravne in so variirale po debelini. Želeli smo določiti čim bolj realne vrednosti, zato smo za izdelavo kompozitov s PUL uporabili industrijsko izdelane 3 mm MDF plošče. Preizkušancem smo določili gostoto in ugotavljali njihove mehanske lastnosti. Preizkušali smo odpornost proti tlačni obremenitvi, spremembo debeline pri tlačni obremenitvi in upogibno trdnost vseh zgoraj navedenih materialov, ter dimenzijsko obstojnost kompozitov s sredico iz PUL. Želeli smo ugotoviti, s katerim že obstoječim materialom na trgu bi bilo moč primerjati naš kompozit.

Rezultati pridobljeni za odpornost proti tlačni sili pri aluminijevih in polietilenskih satovjih so zelo dobri, zato smo jih postavili kot zgornji standard, kakšne lastnosti je moč doseči z lahkimi ploščnimi kompoziti. Glede na to, da so bile dosežene vrednosti pri papirnatem satovju bolj primerljive s PUL, smo se raje osredotočili na primerjavo slednjih. Pri papirnatih satovjih pride pri tlačni obremenitvi do 5000 N do porušitve že pri 2000 N, medtem, ko pri poliuretanski peni iz utekočinjenega lesa sprva opazimo zgostitev, pri obremenitvi 5000 N pa struktura kompozita razpade. Vrednosti PUL se še najbolj približajo vrednostim papirnatega satovja. Le to bi lahko še dodatno izboljšali, če bi obdelali robove. Na rob bi lahko vstavili masivne letvice in čez nalepili ABS nalepek.

Upogibna trdnost kompozitov iz PUL je bila precej nižja od ostalih materialov. Med preizkusom upogibne trdnosti je prišlo do strižnih in tlačnih napetosti in na koncu do porušitve med nosilno ploščo in peno iz utekočinjenega lesa. Na upogibno trdnost ima velik vpliv predvsem zunanji sloj, ki je bil v našem primeru 3 mm MDF plošča, za izdelavo LPK pa se v industriji za SL največkrat uporabljajo 4 mm - 8 mm plošče. Ob uporabi debelejšega zunanjega sloja bi se zvišala upogibna trdnost kompozita. Dodatno bi upogibno trdnost lahko povečali z obdelavo robov.

Pri komercialni PU peni smo na ploščo pred nanosom pene nanесли tudi poliuretansko lepilo, kar je zagotovo prispevalo k večji adhezijski trdnosti.

Lastnosti pene lahko variirajo tudi glede na sam način doziranja. V diplomski nalogi smo za izdelavo vseh kompozitov s PUL uporabili kalup v katerega smo zmes za srednji sloj vlivali iz vrha, pri čemer smo ob volumskem naraščanju zaprli in obtežili dozirno odprtino, da smo dosegli večje zgoščevanje v srednjem sloju.

Mešanico za pripravo srednjega sloja iz PUL je potrebno zamešati na mestu in takoj uporabiti. V industriji se PUL izdeluje z dvokomponentno pištolo, s katero lahko peno vbrižgamo kamorkoli.

Ugotovili smo, da moramo kompozite po izdelavi pustiti nekaj časa, da se kondicionirajo, saj le tako dosežemo najboljše lastnosti. Odpornost proti tlačni sili kompozitov je bila največja po preteku enega meseca po izdelavi. To lahko prištejemo k temu, da smo kompozite pustili v prostoru, kjer je bila relativna zračna vlažnost 65 %, kjer je nato vlaga iz zraka prispevala k dodatni reakciji utrjevanja kompozitov. Pri ivernih in vlaknenih ploščah je optimalno kondicioniranje tri do štiri dni, pri čemer lepilo dokončno utrdi in pride do izenačitve vlažnosti in napetosti po celi plošči. Čas kondicioniranja je pri PUL kompozitih tako daljši tudi zato, ker je neposrednemu delovanju vlage izpostavljen le zgornji rob kompozita. Zato se s staranjem, ko pride do izenačitve vlage in napetosti po celotnem kompozitu, izboljša tudi odpornost proti tlačni obremenitvi. Sklepamo lahko, da s staranjem PUL postane tudi bolj homogena.

V primeru slabe 3D zamreženosti dobimo slabše mehanske in fizikalne lastnosti. Zato se v mešanico dodaja glicerol, ki ustvari 3D strukturo, s tem pa se izboljšajo mehanske in fizikalne lastnosti. Z dodatkom glicerola se bistveno izboljša tudi dimenzijska obstojnost. Na večjo elastičnost in žilavost pene vplivamo tudi s povišanjem izocianatnega indeksa.

Pri preizkušanju dimenzijske obstojnosti smo upoštevali ploščo kot celoten kompozit in nismo posebej obravnavali krčenja in nabrekanja srednjega sloja (pene iz utekočinjenega lesa) in zunanjega sloja (MDF), čeprav je navlaževanje in sušenje različno vplivalo na oba sloja. Opazili smo, da se je srednji sloj bolj skrčil kot pa celoten kompozit vendar, pa je pri tem tudi PUL postala trša. Med preizkusom je prišlo tudi do različnega obarvanja sredice, kar lahko najverjetneje pripišemo delovanju UV žarkov.

Lahke ploščne kompozite izdelane iz PUL bi lahko uporabili za izdelavo vratnih kril, omaric in kakšnih nenosilnih, oblikovno zahtevnejših polic. Uporaba bi bila možna tudi za izdelavo notranjih omaric in polic na ladjah. Velika prednost je zagotovo tudi način nanašanja, v industriji se PUL nanaša z dvokomponentno pištolo, zato je ni omejitve oblik.

Z večjo debelino zunanjega sloja bi se izboljšale lastnosti in s tem tudi spekter uporabe. Potrebna pa bo tudi optimizacija formulacije pene iz utekočinjenega lesa, ki bo omogočala izdelavo homogene in čvrste pene z nizko gostoto, s čimer bodo tudi mehanske lastnosti boljše.

Ena od možnosti uporabe pa je tudi uporaba plošč za izolacijo, vendar pa je za ta namen potrebno opraviti še nadaljnje preizkuse. Na Kemijskem inštitutu navajajo, da je toplotna prevodnost pene iz utekočinjenega lesa 0,0036 – 0,0038 W/mK, kar je v rangi mineralne volne, ki ima toplotno prevodnost 0,0036 W/mK. Iz tega lahko sklepamo, da je sama pena dobro izolativna in bi se jo lahko uporabljalo tudi za izolacijo, zato so zagotovo zanimiva nadaljnja preizkušanja na tem področju.

6 SKLEPI

Za diplomsko delo smo izdelali nov lahki ploščni kompozit s sredico iz poliuretanske pene iz utekočinjenega lesa. Kompozite smo izdelali tako, da smo v prej pripravljene okvirje vlili PUL, ki jo je bilo potrebno tekom eksperimenta delno prilagoditi. Za povečanje elastičnosti in žilavosti pene smo povečali količino dodanega izocianata. Z dodatkom glicerola smo izboljšali 3D zamreženost in s tem povečali dimenzijsko obstojnost. S količino dodanega pospeševalca pa smo optimizirali tudi samo hitrost reakcije. Mešanici smo dodali še silikonsko površinsko aktivno sredstvo, s čimer smo povečali izolativnost in hidrofobnost pene. Za večjo zgostitev v srednjem sloju smo zaprli ploščo iz vseh strani. Preizkušali smo stisljivost in spremembo debeline pri tlačni obremenitvi, upogibno trdnost ter dimenzijsko obstojnost.

Ugotovili smo, da je kompozite iz PUL potrebno kondicionirati vsaj en mesec, saj so bili rezultati preizkušanja po mesecu dni neprimerljivo boljši od tistih, ki smo jih opravili en teden po izdelavi.

Ob preizkušanju odpornosti proti tlačni obremenitvi, pri obremenitvi 300 N, ni prišlo do deformacije. Takšen rezultat so dosegle plošče, ki smo jih en mesec kondicionirali. Tlačno trdnost bi lahko dodatno izboljšali z obdelavo robov.

Pri preizkušanju upogibne trdnosti je prišlo zaradi delovanja strižnih napetosti do razslojitve med nosilno ploščo in PUL. Upogibno trdnost bi lahko izboljšali z uporabo debelejšega zunanega sloja, namesto 3 mm bi lahko uporabili 8 mm MDF ploščo. Ena od možnosti za izboljšanje upogibne trdnosti pa je tudi obdelava robov. Z uporabo masivne letvice na robovih in ABS nalepka, bi povečali upogibno trdnost.

Glede dimenzijske obstojnosti lahko rečemo, da so LPK s sredico iz PUL dimenzijsko dobro obstojni, saj se lastnosti materiala pri navlaževanju in sušenju bistveno ne poslabšajo. Pri preizkušanju je prišlo do obarvanja, kar je posledica delovanja

ultravijoličnih žarkov. Sredica se je sicer malo bolj skrčila kot celoten kompozit, vendar pa je pena postala trša in kompaktnejša.

Lahki ploščni kompoziti imajo možna različna področja uporabe. Lahko jih uporabimo v pohištveni industriji, kjer so primerni predvsem za izdelavo omaric in nenosilnih polic zahtevnejših oblik. Primerni so tudi za izdelavo notranjih polic in omaric na ladjah. Zaradi slabe toplotne prevodnosti, ki je v rangi mineralne volne, in dobre zvočne izolativnosti pa jih lahko uporabimo tudi za izdelavo notranjih vratnih kril.

Lahki ploščni kompozit, ki smo ga naredili, je obetaven in zato se pričakujejo nadaljnje raziskave na tem področju. Potrebno bo še dodatno optimizirati formulacijo same pene iz utekočinjenega lesa, da bodo dosežene lastnosti lahkega ploščnega kompozita še boljše, s tem pa bo širše tudi območje uporabe.

7 POVZETEK

Uporaba lahkih ploščnih kompozitov v pohištveni industriji je danes vse bolj popularna, ker so trenutni pohištveni trendi nagnjeni predvsem k debelejšim in tanjšim komponentam z manjšo težo, kar je s sendvič ploščami bistveno lažje doseči. Glavna zahteva za izdelavo lahkih ploščnih kompozitov je zmanjšanje teže, a ohranjanje relativno dobrih mehanskih lastnosti in doseganje čim boljše dimenzijske obstojnosti.

V diplomski nalogi smo izdelali lahke ploščne kompozite, katerih srednji sloj je bila laboratorijsko izdelana poliuretanska pena iz utekočinjenega lesa. Kompozite smo izdelali tako, da smo naredili kalupe in vanje vlili mešanico za izdelavo pene iz utekočinjenega lesa. Tekom eksperimenta smo mešanico izboljševali. Optimizirali smo hitrost reakcije in izboljšali mehanske in fizikalne lastnosti izdelane pene. V končni fazi nam je uspelo izdelati lahki ploščni kompozit, ki je imel solidne mehanske lastnosti. Za primerjavo smo izdelali tudi lahke ploščne kompozite iz industrijskih satovij (papir, polietilen, polipropilen, aluminij), katerih lastnosti so nam služile kot referenčne vrednosti. Optimalne dosežene vrednosti kompozita s PUL so bile najbolj primerljive z vrednostmi doseženimi pri papirnatih satovjih. Preizkušancem smo določili gostoto in ugotavljali njihove mehanske lastnosti. Preizkušali smo odpornost proti tlačni obremenitvi, spremembo debeline pri tlačni obremenitvi in upogibno trdnost lahkih ploščnih kompozitov s sredico iz industrijskih satovij, PU pene in pene iz utekočinjenega lesa, ter dimenzijsko obstojnost kompozitov s sredico iz PUL. Ugotovili smo, da je potrebno LPK iz PUL, za doseganje boljših mehanskih lastnosti, kondicionirati vsaj en mesec.

Pri obremenitvi na tlak smo najvišje vrednosti dosegli pri lahkem ploščnem kompozitu s sredico iz aluminija. Glede na namen uporabe smo nato postavili mejo najvišje tlačne obremenitve na 300 N. Določili smo referenčne vrednosti materialov, ki so že na trgu in dobljene rezultate primerjali z vrednostmi pridobljenimi za lahke ploščne kompozite s sredico iz utekočinjenega lesa.

Pri preizkušanju upogibne trdnosti smo opazili določene pomanjkljivosti, ki se jih lahko v nadaljevanju raziskav še dodatno izboljša. Tako lahko za izdelavo zunanega sloja uporabimo debelejšo ploščo ali pa na koncu še dodatno obdelamo robove. Na tak način bi se vrednosti upogibne trdnosti dodatno izboljšale. Najvišje vrednosti smo med preizkušanjem zopet dosegli z lahкими ploščnimi kompoziti, kjer smo za srednji sloj uporabili industrijska satovja.

Z zvišanjem deleža glicerola v reakcijsko zmes smo povečali 3D zamreženost, s čimer se je izboljšala tudi dimenzijska obstojnost lahkih ploščnih kompozitov s sredico iz utekočinjenega lesa. Ugotovili smo, da preizkušanci po štirih dneh dosežejo konstantno maso. Procentualne razlike v dimenzijah so bile manjše od 2%, zato lahko rečemo, da so kompoziti dimenzijsko dobro obstojni.

Razvili smo nov lahki ploščni kompozit, katerega aplikacija je možna v pohištveni industriji, z nadaljnjimi raziskavami, pa bo morda njegova uporaba možna tudi v gradbeništvu. Potrebno bo še dodatno optimizirati formulacijo same pene iz utekočinjenega lesa, da bodo dosežene lastnosti lahkega ploščnega kompozita še boljše, s tem pa bo širše tudi območje uporabe.

8 VIRI

Alma M. H., Shiraishi N. 1998. Preparation of polyurethane-like foams from NaOH-catalyzed liquefied wood. Holz als Roh- und Werkstoff, 56: 245-246

Bitzer T. 1997. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. London. Chapman & Hall: 233 str.

Chen F., Lu Z. 2009. Liquefaction of wheat straw and preparation of rigid polyurethane foam from the liquefaction products. Journal of applied polymer science, 111, 1: 508-516

Čuk N. 2008. Optimizacija utekočinjanja lesa različnih drevesnih vrst. Dipl. delo. Ljubljana. Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 68 str.

Gao L., Liu Y., Lei H., Peng H., Ruan R. 2010. Preparation of semirigid polyurethane foam with liquefied bamboo residues. Journal of applied polymer science, 116, 3: 1694-1699

He M., Hu. W. 2008. A study on composite honeycomb sandwich panel structure. Materials and Design, 29: 709-713

Kunaver M., Jasiukaityte E., Čuk N., Guthrie J. T. 2010. Liquefaction of wood, synthesis and characterization of liquefied wood polyester derivatives. Journal of applied polymer science, 115, 3: 1265-1271

Kunaver M. 2008. Plastika bo v prihodnje »lesena«.

http://www.ki.si/fileadmin/user_upload/datoteke-

splosno/novice/objave_v_medijih/3698667_0.pdf (10.5.2010)

- Kunaver M. 2009. Pri utekočinjenem lesu bomo prvi v Evropi. Finance – priloga. 16. 02. 2009: 20
- Lee S.H., Yoshioka M., Shiraishi N. 2000. Liquefaction of corn bran in the presence of alcohols and preparation of polyurethane foam from its liquefied polyol. Journal of applied polymer science, 78: 319-325
- Lee S. H., Teramoto Y., Shiraishi N. 2002. Biodegradable polyurethane foam from liquefied waste paper and its thermal stability, biodegradability and genotoxicity. Journal of applied polymer science, 83: 1482-1489
- Liu J., Chen F., Qiu M. 2009. Liquefaction of Bagasse and Preparation of Rigid Polyurethane Foam from Liquefaction Products. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 3, 4: 401-407
- Liu Y., Gao L., Luo A., Ruan R. 2008. Polyurethane foams made from combined liquefaction mixtures of bamboo residues and starch. Acta Polymerica Sinica., 6: 544-549
- Maldas D., Shiraishi N. 1996. Liquefaction of wood in the presence of polyol using NaOH as a catalyst and its application to polyurethane foams. International journal of polymeric materials, 33, 1-2: 61-71
- Medved S. 2008. Impact of core on the compression, modulus of elasticity and modulus of rupture of lightweight particleboard composite. V: Cost Action E49 International Workshop in Slovenia on Lightweight Wood-Based Composites-Production, Properties and Usage: 108-115
- Mihalić D. 2007. Optimizacija izdelave poliuretanske pene z uporabo utekočinjenega lesa. Dipl. delo. Ljubljana. Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 49 str.

- Rozman H. D., Yeo Y.S., Tay G.S. Abubakar A. 2003. The mechanical and physical properties of polyurethane composites based on rice husk and polyethylene glycol. *Polymer testing*, 22: 617-623
- Tanaka R., Hirose S., Hatakeyama H. 2008. Preparation and characterization of polyurethane foams using a palm oil-based polyol. *Bioresource Technology*, 99: 3810-3816
- Thoemen H. 2008. Lightweight panels for the European furniture industry: Some recent developments.V: Cost Action E49 Interantional Workshop in Slovenia on Lightweight Wood-Based Composites-Production, Properties and Usage: 1-14
- Trnovšek P. 2006. Utekočinjen les kot surovina za izdelavo poliuretanskih pen. Dipl. delo. Ljubljana. Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 53 str.
- Yao Y., Yoshioka M., Shiraishi N. 1995. Rigid Polyurethane Foams from Combined Liquefaction Mixtures of Wood and Starch. *Mokuzai Gakkaishi*, 41, 7: 659-668
- Yan Y., Pang H., Yang X., Zhang R., Liao B. 2008. Preparation and characterization of water-blown polyurethane foams from liquefied cornstalk polyol. *Journal of applied polymer science*, 110, 2: 1099-1111

ZAHVALA

Mentorju doc.dr. Sergeju Medvedu se najlepše zahvaljujem za pomoč in vzpodbudo pri nastajanju tega diplomskega dela. Njegova misel, da neumnih vprašanj ni, mi je dala zalet in motivacijo za delo. Zahvaljujem se mu za vse strokovno znanje, ki mi ga je posredoval.

Najlepša hvala somentorju doc. dr. Matjažu Kunaverju za pomoč in opombe pri izdelavi diplomske naloge, recenzentu izr. prof. dr. Milanu Šerneku pa se zahvaljujem za recenzijo.

Hvala tudi Kemijskemu inštitutu, ki mi je omogočil izvedbo eksperimentalnega dela; posebna zahvala gdč. Emi Fabjan, ki je pripravila potrebno mešanico pene iz utekočinjenega lesa.

Zahvala gre tudi mojim staršem, sestri, babici in dedku, ki so mi vedno stali ob strani, potrpežljivo sledili mojemu glasnemu razmišljanju in mi tudi s tem olajšali zaključiti študij.

Na koncu, vendar nič manj, pa se zahvaljujem še vsem tistim, ki ste me skozi vsa leta podpirali, poslušali in prenašali.