

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Blaž GOŠNJAK

**UPORABA VLAKEN ZA OJAČITEV LEPILNEGA
SPOJA V LAMELIRANEM LESU**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Blaž GOŠNJAK

**UPORABA VLAKEN ZA OJAČITEV LEPILNEGA SPOJA V
LAMELIRANEM LESU**

DIPLOMSKI PROJEKT
Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

**THE USE OF FIBERS FOR REINFORCEMENT OF THE ADHESIVE
BOND IN LAMINATED WOOD**

B. SC. THESIS
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2015

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Milana Šerneka in recenzenta viš. pred. mag. Bogdana Šego.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Podpisni izjavljam, da je naloga rezultat lastnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Blaž GOŠNJAK

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dv1
DK	UDK 630*862:62-419.3
KG	lameliran lepljen les/vlakna/melamin-urea-formaldehid /poliuretan/upogibna trdnost
AV	GOŠNJAK, Blaž
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ŠEGA, Bogdan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina c. CIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2015
IN	UPORABA VLAKEN ZA OJAČITEV LEPILNEGA SPOJA V LAMELIRANEM LESU
TD	Diplomski projekt (Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja)
OP	XI, 38 str., 4 pregl., 29 sl., 3 pril., 41 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Raziskovali smo vpliv ojačitve lepilnega spoja z vlakni na upogibno trdnost lameliranih lepljencev. Od naravnih vlaken smo izbrali vlakna jute in lanena vlakna ter od sintetičnih steklena in ogljikova vlakna. Pri preizkusih smo uporabili dve vrsti lepila, enokomponentno poliuretansko lepilo ter melamin-urea-formaldehidno lepilo. Preizkušance, ki so bili iz petih slojev lamel ter z različnimi vlakni, smo preizkušali s tritočkovnim upogibnim testom po standardu SIST EN 310. Ugotovili smo, da ima vrsta vlaken velik vpliv na upogibno trdnost, poleg tega pa je pomembna še lokacija lepilnega spoja, kjer se nahajajo vlakna in gostota lesa. Nekaterne kombinacije preizkušancev z izbranimi lepiloma ter vlakni so se izkazale za zelo dobre, saj smo prišli do povečanja upogibne trdnosti, pri nekaterih drugih kombinacijah pa je bila upogibna trdnost preizkušancev celo nižja od referenčnega preizkušanca iz masivne smrekovine.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Dv1
DC UDC 630*862:62-419.3
CX glulam/fiber/melamine-urea-formaldehyde/polyurethane/bending strength
AU GOŠNJAK, Blaž
AA MILAN, Šernek (supervisor)/ŠEGA, Bogdan (co-advisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina c. CIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2015
TY THE USE OF FIBERS FOR REINFORCEMENT OF THE ADHESIVE BOND IN LAMINATED WOOD
DT B. Sc. Thesis (Professional Study Programmes)
NO XI, 38 p., 4 tab., 29 fig., 3 ann., 41 ref.
LA sl
Al sl/en
AB We studied the bending strength of glued laminated beams. We add four different fibers in the adhesive bond. We used two natural fibers (flax and jute) and two synthetic (glass and carbon fibers). In test we use two types of adhesive, first is one-component polyurethane adhesive and second is melamine-urea-formaldehyde adhesive. Specimens were made from five layers of laminations and with different fibers. We conduct three point bending test according to standard SIST EN 310 and we got desired results of the bending strength and other important properties that had an effect on bending. We have found that the major impact on the bending strength have: type of fiber, the place where they are located and density of the wood. We found that some combinations with the adhesive and fiber were very good because we increase bending strength, but with some combinations with the adhesive and fiber we didn't get close to massive sample of spruce.

KAZALO VSEBINE

str.

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	2
1.3 CILJ NALOGE.....	2
2 PREGLED OBJAV – SPLOŠNI DEL.....	3
2.1 DOSEDANJE RAZISKAVE	3
2.1.1 Mehanske lastnosti lameliranega lepljenja.....	3
2.2 LEPLJENI LAMELIRANI NOSILCI.....	3
2.2.1 Smreka.....	4
2.2.1 Zgodovina lepljenih nosilcev	4
2.3 LEPILA	5
2.3.1 Melamin-urea-formaldehidno lepilo.....	6
2.3.2 Poliuretansko lepilo	7
2.4 VLAKNA	7
2.4.1 Sintetična vlakna	8
2.4.1.1 Ogljikova vlakna	10
2.4.1.1.1 Pridobivanje ogljikovih vlaken.....	10
2.4.1.2 Steklena vlakna	11
2.4.2 Naravna vlakna.....	11
2.4.2.1 Lanena vlakna	11
2.4.2.2 Vlakna jute	13
2.5 TRDNOST.....	14
2.5.1 Upogibna trdnost.....	15
2.5.2 Napetost in deformacija	16

3	MATERIALI IN METODE	17
3.1	ZASNOVA RAZISKAVE	17
3.2	MATERIALI	18
3.2.1	Masiven les	18
3.2.2	Lepilo	18
3.2.3	Vlakna	18
3.3	METODE	20
3.3.1	Izdelava preizkušancev	20
3.3.2	Nanos lepila in vlaken	21
3.3.3	Sestava lepljencev	21
3.3.4	Stiskanje preizkušancev	22
3.3.4.1	Parametri lepljenja	22
3.3.6	Testiranje mehanskih lastnosti	23
3.3.6.1	Tritočkovni upogib	24
3.3.7	Ugotavljanje vlažnosti	25
3.3.8	Ugotavljanje gostote	25
4	REZULTATI IN RAZPRAVA	26
4.1	UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI	30
4.2	GOSTOTA PREIZKUŠANCEV	32
4.3	VLAŽNOST	32
4.4	PRIMERJAVA LASTNOSTI PREIZKUŠANCEV S CELIMI IN NAREZANIMI VLAKNI	33
5	SKLEPI	34
6	POVZETEK	35
7	VIRI	36

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Oznaka in opis preizkušancev	17
Preglednica 2: Povprečne vrednosti maksimalne sile loma, upogibne trdnosti, modula elastičnosti ter gostote	29
Preglednica 3: Povprečna vlažnost preizkušancev	32
Preglednica 4: Prikaz povprečnih vrednosti preizkušancev s celimi in narezanimi vlakni.	33

KAZALO SLIK

Slika 1: Natezna in tlačna obremenitev v lameliranem nosilcu (Sever, 2010).....	2
Slika 2: Osnovna razdelitev lepil glede na surovinsko osnovo (Ščernjavič, 2008).....	5
Slika 3: Delitev lepil za les glede na vrsto uporabe (Šega, 2013/14)	6
Slika 4: Prikaz delitev vlaken (Oznake tekstila, 2015).....	8
Slika 5: Zgradba ogljika (Angles)	10
Slika 6: Laneno vlakno (Producing natural fibre composites)	12
Slika 7: Lan (Flax fiber, 2012)	13
Slika 8: Struktura jutovega vlakna (Jute composites as wood substitute).....	14
Slika 9: Delovanje tlačnih sil (levo) in delovanje nateznih sil (desno)	15
Slika 10: Tlačne in natezne napetosti v nosilcu.....	15
Slika 11: Prikaz elastičnega in plastičnega območja v nosilcu (Halilović in Štok, 2007) ..	16
Slika 12: Laneno platno	18
Slika 13: Pletenina jute	19
Slika 14: Steklена vlakna	19
Slika 15: Ogljikova vlakna	19
Slika 16: Izdelava lamel	20
Slika 17: Levo: sintetična razpršena vlakna, desno: skupki naravnih vlaken	21
Slika 18: Naprava za testiranje Zwick Z100	23
Slika 19: Shema tritočkovnega upogiba (Kariž, 2009).....	24
Slika 20: Združevanje lanenih vlaken	26
Slika 21: Rahlo združevanje vlaken jute	26
Slika 22: Dobro razporejena steklena vlakna	26
Slika 23: Ogljikova vlakna	27
Slika 24: Lanena vlakna	27
Slika 25: Vlakna jute	27
Slika 26: Poizkusno raztresanje steklenih vlaken.....	27
Slika 27: Ogljikova vlakna v kombinaciji s PUR.....	28
Slika 28: Prikaz povprečne upogibne trdnosti pri posamezni skupini preizkušancev.....	30
Slika 29: Prikaz povprečnega modula elastičnosti pri posamezni skupini preizkušancev ..	30

KAZALO PRILOG

Priloga A: Preglednica izmerjenih dimenzij, mase ter izračunane gostote in mase narezanih vlaken.....	40
Priloga B: Preglednica izmerjenih dimenzij, mase ter izračunane gostote in mase, celih vlaken.....	41
Priloga C: Podatki upogibnih obremenitev vseh preizkušancev	42

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

MUF – melamin-urea-formaldehidno lepilo
PUR – enokomponentno poliuretansko lepilo
 ρ – gostota [kg/m^3]
u – vlažnost [%]
 f_m – upogibna trdnost [N/mm^2]
E – modul elastičnosti [N/mm^2]
 F_m – maksimalna sila loma [N]

1 UVOD

Les je naraven vir, ki je obnovljiv, vendar se ga dandanes še premalo uporablja. Ima dobre mehanske in fizikalne lastnosti, zato bi ga lahko pogosteje vključevali v gradbeništvo, uporabili bi ga lahko za veliko več lesnih konstrukcij, stavbno pohištvo, objekte, nosilne konstrukcije ipd. Les je obnovljiv vir z dobrimi estetskimi lastnostmi in bi lahko nadomestil številne druge materiale na trgu.

Les je tako količinsko kot tudi sicer že od nekdaj ena izmed najpomembnejših surovin. Njegova poraba tudi danes nenehno narašča, še zlasti v razvitih deželah, predvsem na račun velike porabe papirja. Les nastaja ob blagodejnem učinku na okolje. Gozdovi predstavljajo najpomembnejši vir lesa kot surovine. Ker je njihov prirastni potencial omejen, in ker se površine gozdov v nekaterih predelih stalno zmanjšujejo, bo prihodnja oskrba z lesom v veliki meri odvisna tudi od plantaž (Čufar, 2006).

Pri izgradnji najrazličnejših konstrukcij se v svetu uporabljajo razni materiali, kot so keramika (kamen, opeka, steklo), polimeri (les, polistiren), kovine in kompoziti (beton, penobeton, lepljena lesna tvoriva). Ti materiali se med sabo razlikujejo predvsem po izvoru, kemijski sestavi, mehanskih in fizikalnih lastnostih ter videzu. Vsak od materialov pa ima svoje prednosti in slabosti glede na drug material (Ščernjavič, 2008).

V gradbeništvu se uporablja les gostote od 300 kg/m^3 do 500 kg/m^3 , ker ima majhno težo in ima še zadovoljive mehanske lastnosti. V zadnjih desetletjih se vedno več uporablja lameliran lepljen les, ki ga pridobivamo z lepljenjem lesnih lamel v celoto. S tem razvojem se nam je odprla nova možnost konstrukcijskih elementov, in sicer večje širine, debeline in dolžine. Ena od prednosti lameliranega lesa v primerjavi z masivnim je ta, da lahko imamo poljubne oblike elementov.

Na mehanske lastnosti lesa najbolj vpliva gostota lesa. Lesovi z večjo gostoto imajo večjo upogibno, tlačno in natezno trdnost (Šernek, 2009). Dimenzijska stabilnost lameliranega lesa je večja od masivnega. Ne moremo pa zagotoviti povsem dimenzijsko stabilne nosilce, saj na to vpliva tudi vlažnost lesa in okolica, pa tudi zaradi spreminjajoče se klime v uporabljenem prostoru ne moremo preprečiti delovanja lesa.

Les predstavlja, skupaj s kamnom in opeko, klasični gradbeni material, ki se uporablja v konstrukcijske namene že od nekdaj. Medtem ko sta se opeka in kamen uporabljala za prevzem tlačnih obremenitev, je les služil za prevzem nateznih in upogibnih napetosti. V primerjavi z najpogostejšim gradbenim materialom, betonom, ima les približno enako tlačno, a precej višjo natezno trdnost. Hkrati velja, da ima leseni element enakih dimenzij povprečno 6-krat manjšo težo. V primerjavi z jeklom ima les podobne nosilnosti na enoto teže (jeklo ima približno 10-krat večjo nosilnost, a tudi 10-krat večjo težo). Les ima zraven dobrih statičnih lastnosti tudi dobre toplotno izolacijske lastnosti, ima razmeroma nizko toplotno prevodnost, hkrati pa tudi akumulira toploto (Ilkon).

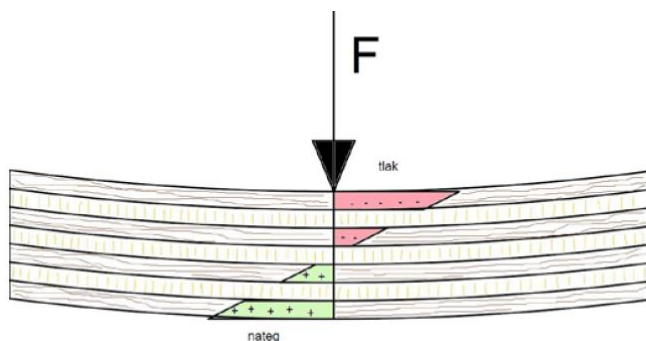
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Zaradi vse večjih nosilcev in vse večjih dimenzij, ki jih morajo le-ti premoščati, se v samih nosilcih pojavijo velike obremenitve. Zunanje obremenitve nosilcev povzročijo notranje obremenitve, te pa posledično napetosti v nosilnih elementih in deformacije elementov. Deformacija nastopi v obliki raztezka ali v obliki skrčka posameznih vlaken in tudi v spremembi oblike.

Radi bi preprečiti prevelike deformacije, zlasti pri upogibnih obremenitvah, zato smo se odločili, da bomo v lepilni spoj lameliranega nosilca dodajali različna vlakna in ga tako ojačali. Uporabili bi melamin-urea-formaldehidno in poliuretansko lepilo, medtem ko bi bila vlakna sintetična (ogljikova in steklena) ter naravna (lanena in vlakna jute).

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Pri upogibni obremenitvi elementov nastajajo največje obremenitve v zunanjih slojih (Velkavrh, 2013). V zgornjih slojih pride do tlačnih obremenitev, v spodnjih pa do nateznih (slika 1). Zato smo se odločili, da bomo vlakna dodajali v vse sloje, da poskušamo karseda zmanjšati upogibne obremenitve.



Slika 1: Natezna in tlačna obremenitev v lameliranem nosilcu (Sever, 2010)

Predvidevali smo, da moramo vlakna na lepilno površino nanašati čim bolj enakomerno in jih čim bolj raznesti po površini. Glede na raziskave, ki so že bile narejene na tem področju, smo dodali 20 % vlaken glede na maso lepila v vseh slojih lameliranega lepljenca. Ker se je pojavila težava glede tega, da nekatera vlakna lahko dobimo samo v pletenih mrežah, nekatera pa lahko nabavimo kot posamična vlakna, smo se odločili, da mreže razpletemo in narežemo vlakna na enako dolžino, kot so že bila ostala vlakna v razsutem stanju.

1.3 CILJ NALOGE

Cilj raziskave je bil izboljšati upogibno trdnost laboratorijsko izdelanih lepljenih lameliranih nosilcev. Za to izboljšavo smo morali proučiti modul elastičnosti, gostoto, vlažnost ter upogibno trdnost vseh preizkušancev, ki so bili zlepljeni z melamin-urea-formaldehidnim lepilom in poliuretanskim lepilom ter štirimi različnimi vrstami vlaken.

2 PREGLED OBJAV – SPLOŠNI DEL

2.1 DOSEDANJE RAZISKAVE

2.1.1 Mehanske lastnosti lameliranega lepljenca

Na podobno temo je bila že narejena raziskava (Wei in sod, 2013). Raziskavo so delali s topolom (*Populus euramericana* cv.), ki je zelo hitro rastoča drevesna vrsta na Kitajskem. Zaradi slabših mehanskih lastnosti so les modificirali, izdelali LVL nosilec in dodajali ogljikova vlakna v lepilni spoj. Zaradi primerjave so naredili LVL nosilce brez dodanih vlaken, nato pa LVL nosilce, kjer so dodajali vlakna samo v spodnji zunanji sloj (oznaka LVL-SR), ker je tam največja natezna obremenitev, nato pa še v oba zunanja sloja (oznaka LVL-DR).

Uporabili so topolov furnir debeline 1,9 mm, širine 60 mm in dolžine 60 cm. Vlažnost lesa je bila 6–8 % in gostota v rangi od 350 kg/m^3 do 450 kg/m^3 . Uporabili so dve vrsti lepila, prvo je bilo fenol-formaldehidno z vsebnostjo 48 % trdilca in nanos lepila 224 g/m^2 , drugo lepilo pa epoksidno lepilo z debelino filma 0,1 mm. Čas stiskanja pri obeh je bil 90 min pri temperaturi 140°C . Ogljikova ali karbonska vlakna so bila tudi impregnirana z epoksi smolo. Modul elastičnosti ogljikovih vlaken je bil 1600 MPa, 1000 MPa, 1120 MPa, debelina vlaken pa je bila 0,16 mm.

Na podlagi rezultatov so ugotovili, da dodana vlakna v obeh zunanjih slojih najbolj vplivajo na povečanje modula elastičnosti. Od testnih preizkušancev je bil modul elastičnosti pri LVL-DR največji. Dosežena vrednost modula elastičnosti za LVL-SR je bila 11370 MPa ter za LVL-DR 13689 MPa. Zaradi tega smo se odločili, da bomo pri naši raziskavi dodali vlakna v vsak lepilni sloj.

2.2 LEPLJENI LAMELIRANI NOSILCI

Lepljeni lamelirani nosilec (glulam) je nosilni element, ki je sestavljen iz najmanj dveh paralelno zlepljenih lamel določenih iglavcev ali listavcev, zaščitenih ali nezaščitenih pred biološkimi škodljivci, in debelino lamel med 6 in 44 milimetri (SIST EN 14080:2013). Ta standard ne pokriva lameliranih lepljenčev iz trdih listavcev.

Les, ki ga največkrat uporabljamo za lepljene lamelirane nosilce so: smreka, jelka, bor in duglazija. Lahko pa tudi topol, beli topol, macesen, ameriška čuga, obmorski bor.

Za lepljene nosilce iz masivnega lesa se skobljanje lamel vrši največ 24 ur pred lepljenjem, razen v primeru, če imamo les zaščiten ali pa z visoko vsebnostjo smole, potem lahko skobljamo največ do 6 ur pred lepljenjem. Vlažnost lesa mora biti med 6–15 % oziroma po predpisih proizvajalca lepila. Razlika med posameznima sosednima lamelama v nosilcu ne sme biti večja od 5 %. Da zmanjšamo popuščanje in pokanje, je dovoljeno, da so srednje lamele utorjene, in sicer en utor v srednji tretjini s širino največ 4 mm in globino $1/3$ debeline lamele. Lepila, s katerimi lepimo, morajo biti tipa I in II (SIST EN 301 ali SIST EN 15425) za konstrukcijsko rabo, ta lepila so epoksidna, emulzijska

poliizocionatna, eno-komponentna poliuretanska ter lepila na osnovi fenolov in aminoplastov.

Lamelirani lepljeni elementi imajo dobre trdnostne lastnosti in visoko nosilnost glede na prostorninsko maso ter so lahki gradbeni elementi. V primerjavi z masivnim lesom so bolj trdni in togi (Kitek Kuzman in Hrovatin, 2006).

2.2.1 Smreka

Smreka ima les z neobarvano jedrovino, zato se beljava in jedrovina barvno ne ločita. Les je večinoma rumenkastobel, v starosti tudi rumenkastorjav. Ima različno široke branike, od ozkih do širokih, in so lepo razločne. Prehod iz ranega lesa do kasnega lesa je večinoma postopen. Svež les diši po smoli, zelo pogost pojav pa so smolni žepki. Les ima nizko do srednjo gostoto (430 kg/m^3) in se zmerno krči. Smrekovina je elastična in trdna ter se lahko cepi in suši brez težav. Brez težav se površinsko obdeluje z vsemi komercialnimi laki, dobro pa se tudi lepi, vijachi in žeblija (Čufar, 2006).

Smrekovina je dovolj elastična za raznoliko uporabo, fleksibilna in trdna, njena dimenzijska stabilnost pa zmerna. Obdelava lesa ni težavna, obdeluje se dobro strojno in ročno. Problem lahko nastane pri sušenju, saj les rad razpoka in pri dolgih elementih se tudi zelo zvije. Kemično je skoraj neaktiven in pri stiku z raznimi kislinami, maščobami, alkoholom, vodo se ne obarva, saj ne vsebuje veliko ekstraktivov. Les nam lahko hitro posivi, če je dolgo posekan in nepravilno skladiščen v gozdovih oziroma na območju, kjer se podira. Smrekovina posivi tudi, če je v stiku z železom. Je neodporna na glive in insekte, njen največji uničevalec je lubadar. Pri obarvanju gliv modrivk les spremeni le estetsko lastnost, ne zmanjšajo se mu pa mehanske lastnosti. Če les uporabimo v tretjem ali četrtem razredu izpostavitve, ga moramo pravilno zaščititi, saj je srednje odporen na zunanje vremenske vplive, torej ga moramo površinsko zaščititi, dvigniti od tal ter poskrbeti za streho. Les se v praksi težko loči od jelovine. Ločimo ga lahko po tem, da je jelovina po skorji temnejša, les pa je le za odtenek bolj rdečkaste barve.

Je eden od najpomembnejših vrst lesa za gradbeništvo. Uporablja se povsod: za pohištvo, embalažni material, celulozo, kot gorivo iz lesnih ostankov, jamski les, lesno volno, če je pa dovolj gosta in enakomerna rast, potem ga imenujemo tudi resonančni les in je njegova uporaba precej bolj cenjena, saj se uporablja za glasbila. Primeren je za razne opaže, luščen in rezan furnir, stavbno pohištvo.

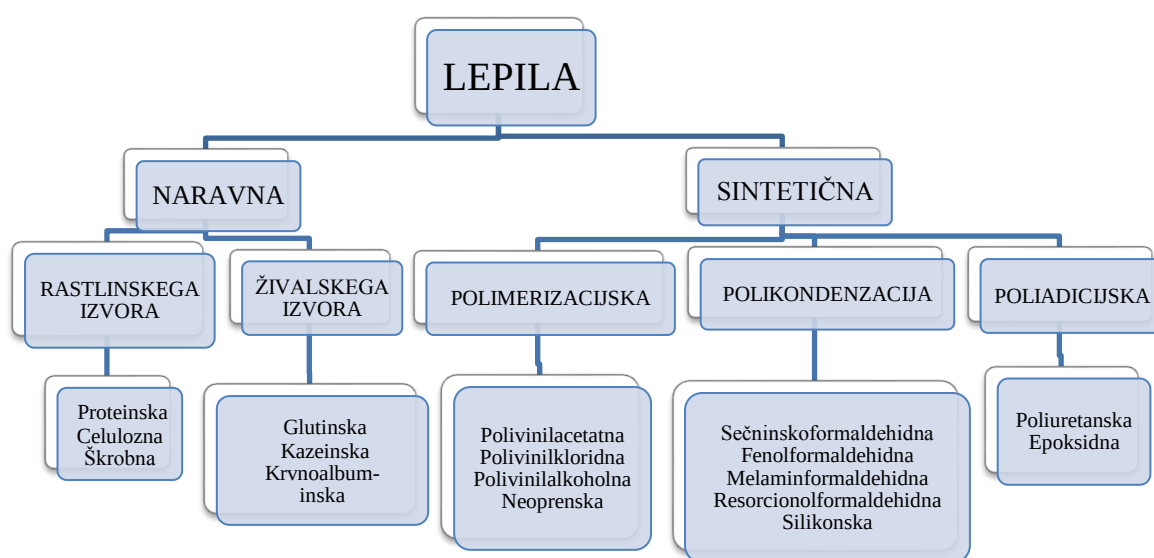
2.2.1 Zgodovina lepljenih nosilcev

Nosilec je eden izmed najpomembnejših konstrukcijskih elementov. Nosilci prevzamejo obtežbo ter jo prenašajo skozi zidove in stebre na temeljna tla. Skozi človeško zgodovino so se skozi tisočletja uporabljali leseni nosilci – tramovi. Prve sledi lepljenega lesa segajo že v egipčansko kulturo. Kot prva lepljena konstrukcija iz slojnega lesa velja hala kralja Edwarda Collegeja, iz leta 1860. Lepljeni nosilci imajo estetski izgled, lahko premoščajo velike razpone (do 200 m). Dobro se obnesejo tudi v primeru požara, saj prevajajo toploto 300 – 400-krat počasneje kot jeklo. Lepljeni nosilci obdržijo osnovne karakteristike lesa in so lep, kakovosten in trajen izdelek. Za izdelavo lepljenih nosilcev se uporablja kvalitetno

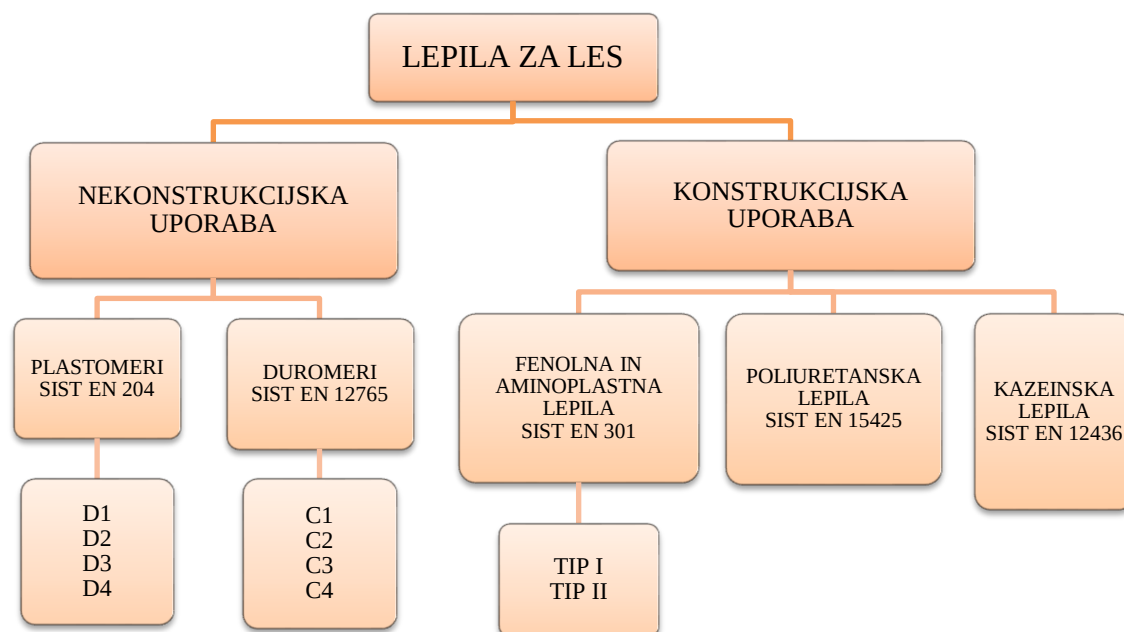
posušen les, katerega vlažnost je okrog 15 %. Omenjena vlažnost zagotavlja, da lepljenih nosilcev ni potrebno dodatno ščititi s kemijskimi premazi. Ker je les primerno osušen, ne prihaja do površinskih razpok. Nosilci so zlepljeni z brezbarvnim lepilom tako, da so spoji skoraj neopazni (Dukarič, 2011).

2.3 LEPILA

Lepila razvrščamo na več načinov. Na sliki 2 je prikazana osnovna delitev lepil glede na surovinsko osnovo ter na sliki 3 razvrstitev lepil za les glede na vrsto uporabe.



Slika 2: Osnovna razdelitev lepil glede na surovinsko osnovo (Ščernjavič, 2008)



Slika 3: Delitev lepil za les glede na vrsto uporabe (Šega, 2013/14)

2.3.1 Melamin-urea-formaldehidno lepilo

MUF lepilo je narejeno po kemijskem procesu polikondenzacije, pri kateri se združujejo nizkomolekularne spojine v visoko molekulske produkte. Potrebni sta najmanj dve funkcionalni skupini, hkrati pa se pri reakciji vedno izločajo enostavne stvari, kot so voda in amonijak. Pri polikondenzacijskem procesu se med proizvodnjo lepila ustavi proces s spremembo pH vrednosti in spremembo temperature. Pri sintezi lepila stremijo k temu, da vedno uporabijo samo toliko melamina v lepilu, kot ga je potrebno. Vsebnost melamina v lepilih je od nekaj odstotkov do 25 %. MUF lepilo je v obliki disperzije in ima čas uporabnosti do štiri mesece, v prašni obliki pa ima rok uporabe do enega leta. Lepilo utrjuje fizikalno-kemijsko in za pospeševanje utrjevanja se dodaja utrjevalec. Lepilo se uporablja za hladno, toplo in vroče lepljenje.

Posebna skupina polikondenzacijskih lepil so aminoplasti, ki so polimerni produkti reakcije aldehydov s snovmi, ki vsebujejo NH_2 in NH skupine. Pri aminoplastih so pomembne predvsem amidne skupine pri urei in melaminu. Uporabljeni aldehyd pri teh lepilih je navadno formaldehyd.

Prednosti aminoplastov so predvsem začetna topljivost v vodi, trdota, negorljivost, dobre toplotne lastnosti, brezbarvnost in prilagodljivost različnim zahtevam uporabe.

Pomanjkljivosti aminoplastov so zlasti nezadostna odpornost proti vlagi in vodi, tako da so primerna predvsem za uporabo v zaprtih prostorih (Resnik, 1997).

Lepilo tvori zelo trdne in krhke spoje in je cenovno ugodno ter se dobro meša z drugimi lepili ter dodatki.

2.3.2 Poliuretansko lepilo

Poliuretansko lepilo je narejeno po procesu poliadicije. To je kemijska reakcija spajanja molekul, ki vsebujejo nenasičene vezi z nasičenimi molekulami. Tudi tukaj sta potrebni vsaj dve funkcionalni skupini.

Uporabili smo enokomponentno poliuretansko lepilo Mitopur E45. Utrjevanje takšnega lepila poteka samo zaradi vlage, zato moramo upoštevati, da je predvidena minimalna relativna zračna vlažnost 40 % (Resnik, 1997).

Lepilni spoj je elastičen, trden, odporen proti vodi, kemikalijam ter temperaturi do 70 °C, z dodatkom utrjevalca tudi do 100 °C. Uporablja se za lepljenje PVA folij, za lepljenje lesa s kovinami ali steklom ter za konstrukcijske namene.

2.4 VLAKNA

Vlakna, ki se uporabljajo kot sestavina kompozitnih materialov, so lahko naravna ali sintetična. Najmočnejši gradbeni materiali pogosto vsebujejo ogljikova vlakna in vlakna polietilena z ultra visoko molekulsko maso. Sintetična vlakna se lahko pogosto proizvajajo zelo poceni in v velikih količinah, v primerjavi z naravnimi vlakni. Imajo pa tudi naravna svoje prednosti pri oblačilih, kot na primer udobje. Delitev vlaken je prikazana na sliki 4 (Fiber).

NARAVNA VLAKNA		KEMIČNA VLAKNA	
ORGANSKA		ORGANSKA	
ŽIVALSKA VLAKNA	RASTLINSKA VLAKNA	IZ NARAVNIH SUROVIN	IZ SINTETIČNIH SUROVIN
volna (prost dostop)	bombaž	acetat (prost dostop)	akril (prost dostop)
kašmirska dlaka	kapok	alginat	klorovlakno
moher	abaka ali manila	bakro	flurovlakno
dlaka kašgore	sisal	modal	modakril
dlaka navadne kože	heneken	protein	poliamid ali najlon
dlaka vikunje	kantala	triacetat	aramid
dlaka alpake	alfa ali esparto	viskoza	poliimid
dlaka gvanaka	lan (prost dostop)	liocel	polilaktid
dlaka lame	prava konoplja	elastodien	poliester
kamelja dlaka	ramija		polietilen
dlaka angora	juta		polipropilen
svila	žuka ali brnistra		poliuretan
dlaka konja	bengalska ali bombajska konoplja		vinilal
dlaka krave	kokos		trivinil
dlaka jake			elastan
dlaka bobra			elastomultiester
dlaka vidre			elastolefin
			melamin
			polipropilen/poliamid dvokomponentno vlakno
ANORGANSKA		ANORGANSKA	
azbestna vlakna		steklena vlakna	
		kovinska vlakna	
		metalizirana vlakna	
		ogljikova vlakna	

Slika 4: Prikaz delitev vlaken (Oznake tekstila, 2015)

Vlakna razvrščamo po njihovi dolžini, in sicer na:

- Predivo – vsa naravna vlakna, kemična vlakna (vlakna z omejeno dolžino)
- Filamentna preja – naravna svila, kemična vlakna (vlakna z neomejeno dolžino)
- Brezkončna vlakna iz ene niti imenujemo tudi monofilament, sestavljena vlakna iz več niti pa multifilament (Godec, 1999).

2.4.1 Sintetična vlakna

Sintetična vlakna so vlakna iz umetnih smol, ki jih izdelujejo s sintezo (spajanjem) raznih snovi. Pri proizvodnji umetnih smol morajo sintetizirati enake majhne molekule v velike

molekule. Takšne postopke imenujemo polimerizacija in kondenzacija. Ti postopki so pri proizvodnji sintetičnih vlaken tudi najtežavnejši.

Potrebo po proizvodnji sintetičnih vlaken je povzročila vse večja potrošnja tekstilnih vlaken, pomanjkanje lesa, iz katerega izdelujejo umetna celulozna vlakna, ter nekatere slabe lastnosti teh, posebno njihova slaba odpornost proti vlagi. Sintetična vlakna so pričeli proizvajati nekaj let pred drugo svetovno vojno, po njej pa je njihova proizvodnja zelo narastla. Osnovna surovina za večino sintetičnih vlaken je nafta ali katran iz črnega premoga (Šešek, 1975).

Lastnosti sintetičnih vlaken:

- Velika čvrstost

Velika čvrstost tako v mokrem kot v suhem stanju je ena od njihovih najboljših lastnosti. V tem sintetična vlakna daleč presegajo naravna vlakna, zato lahko iz njih izdelujejo najtanjšo prejo za zelo tanke pletenine ali tkanine. Iz sintetičnih vlaken izdelujejo tudi vrvice, ribiške mreže in najmočnejše plezalne vrvi.

- Elastičnost

Elastičnost sintetičnih vlaken povzroča, da izdelkov iz teh vlaken po pranju oziroma sušenju ni potrebno likati in omogoča izdelavo nadvse elastične preje. Iz takšne preje izdelujejo elastične nogavice, elastične tkanine (elastični enkalon, najlon, grilon idr.).

- Majhna specifična teža

Imajo majhno specifično težo in so lažja od bombažnih ali volnenih. Še posebej pomembna je ta lastnost pri tehničnih izdelkih (padala, vrvi, mreže idr.).

- Odpornost

Odpornost proti različnim škodljivcem, mikroorganizmom in pri nekaterih vlaknih tudi proti kemikalijam, povečuje trajnost in olajšuje shranjevanje takšnih tkanin ali pletenin.

- Vpijanje vlage

Vpijanje vlage pri sintetičnih vlaknih je le malenkostno. Zato tudi nesnage ne vpijajo, posledica tega pa je, da se izdelki iz teh vlaken hitro in lepo perejo ter hitro posušijo, pri tem se ne krčijo in ne širijo, zato jih ni potrebno likati. Kot slabost bi lahko omenili, da se ne uporabljajo za oblačila, ker ne vpijajo vlage in so gosto tkana, zato je otežen prehod zraka.

- Barvanje

Barvajo se lahko v vseh odtenkih.

- Neodpornost proti višjim temperaturam

Neodpornost proti višjim temperaturam je slaba lastnost sintetičnih vlaken. Pri temperaturi od 70 °C do 200 °C se najprej zmeščajo, nato pa raztalijo. Zato izdelkov iz sintetičnih vlaken ne smemo izpostavljati višji temperaturi.

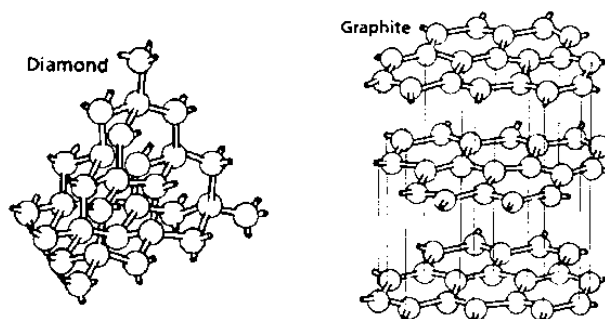
To je lahko tudi slabost oziroma predstavlja težavo sintetičnih vlaken v lesarstvu, saj se v lesnih industrijah pogosteje uporablja vroče lepljenje, ker je hitrejšo in kvalitetnejše.

2.4.1.1 Ogljikova vlakna

Ogljikova oziroma karbonska vlakna so velikosti premera 5 – 10 μm . Karbonska vlakna se uvrščajo v skupino kompozitih in umetnih materialov. Narejena so iz organskih snovi, in sicer v naravi najdemo dve obliki ogljika, kubično (diamantna) ter plastovito (grafitna). Za proizvodnjo vlaken je pomembna grafitna oblika. Kljub temu da je osnovni gradnik iz narave, spadajo vlakna med sintetična. Ogljikovi atomi so razporejeni in povezani s kovalentnimi vezmi v šesterokotnih plasteh. Plasti so med seboj povezane z Van der Waalsovimi vezmi, ki pa niso tako močne. Posledice več ploskovne zgradbe in moči znotraj ter zunaj plastnih povezav so zaradi močne anizotropičnosti samega materiala (slika 5). To dokazuje tudi modul elastičnosti, ki je v ravnini, kjer so kovalentne vezi, velik ($\approx 100 \text{ GPa}$), v smeri pravokotno na ravnino, kjer so Van der Waalsove vezi, pa je modul elastičnosti majhen ($\approx 35 \text{ GPa}$) (Špiler, 2014).

Ogljikova vlakna poznamo predvsem zaradi dobrih mehanskih lastnosti in majhne teže. Lastnosti presegajo tudi lastnosti kovin. Predvsem so odporna na nateg, zato se jih v industriji vedno bolj poslužujejo in skušajo zmanjšati porabo drugih težjih materialov z manjšo odpornostjo proti nateznim silam.

Uporabljajo se v letalski industriji, avtomobilizmu, kolesarstvu, uporablja se v vojaške namene, znanstvene namene, uporabljajo se kot prevodnik električnega toka, v gradbeništvu kot dodatek v beton. Širjenje uporabe teh vlaken otežuje le njihova cena, saj je postopek izdelave drag.



Slika 5: Zgradba ogljika (Angles)

2.4.1.1.1 Pridobivanje ogljikovih vlaken

Pridobiva se jih iz dveh materialov:

- PITCH – Ogljikova vlakna, ki bazirajo na osnovi smole, ki jo pridobimo iz surove nafte ali črnega premoga, imajo slabše mehanske lastnosti in so težje ter se zato uporabljajo v konstrukcijah z večjimi obremenitvami. Prav zaradi tega je kljub cenejši izdelavi, zaradi boljšega izkoristka surovine (80 %), delež teh vlaken na trgu le okrog 10 % (Konrad, 1986).

- PAN – Ogljikova vlakna, ki bazirajo na osnovi PAN-a, imajo odlične mehanske lastnosti, so lažja in imajo daljšo življenjsko dobo. Ta vlakna predstavljajo 90 % vseh proizvedenih ogljikovih vlaken. Svetovna proizvodnja poliakrilonitrila znaša cca. 4,67 milijona ton letno, od tega se 60 % porabi za akrilna vlakna (Konrad, 1986).

2.4.1.2 Steklena vlakna

Steklena vlakna so anorganska kemična vlakna, iz zelo finih vlaken iz stekla. Narejena so iz silicijevega oksida. Izdelujejo se kot brezkončna vlakna ali filamente in kot prediva. Brezkončne niti izdelujejo, tako da iz steklene taline, skozi šobe, izvlečejo niti, ki se utrdijo in navijajo na vrteči boben. Stekleno predivo pa izdelujejo tako, da stekleno talino stikajo skozi šobe, izstopajoča vlakna pa raztezajo ter natrgajo na neenakomerne dolžine.

So tanka, talijo se pri temperaturi 600 °C, ne gorijo, so odporna na vse zunanje vplive (kemikalije, voda, svetloba).

Vlakna imajo visoko natezno trdnost (so elastična), dobro termično odpornost in so zvočni in električni izolator (Richter, 2013).

Komercialna imena nekaterih vlaken so fiberglas, vitron, vetrotek.

Poznamo več vrst vlaken, ampak znano in najbolj uporabno je E-steklo (Ivajnsič, 2012), ki je iz kalcij – aluminijborovega stekla z manj kot 1 % alkalijskih oksidov. Poznamo še E-CR steklo, C-steklo, R-steklo, D-steklo, E-stekla imajo dobre mehanske lastnosti in so cenovno ugodna. S-stekla imajo še višjo trdnost, togost in termično stabilnost, izdelana pa so iz magnezij-aluminijsilikatov. C-stekla se uporabljajo na področjih, kjer je potrebna velika odpornost na kisline, za alkalna okolja se uporabljajo AR-stekla.

Pri uporabi vlaken je velika prednost, da so negorljiva, zato se uporabljajo za zavese, za tkakine v javnih prostorih, opremo ladij, uporabljajo se tudi za armiranje polimernih materialov, za izolacijski material (Glass fiber, 2015).

2.4.2 Naravna vlakna

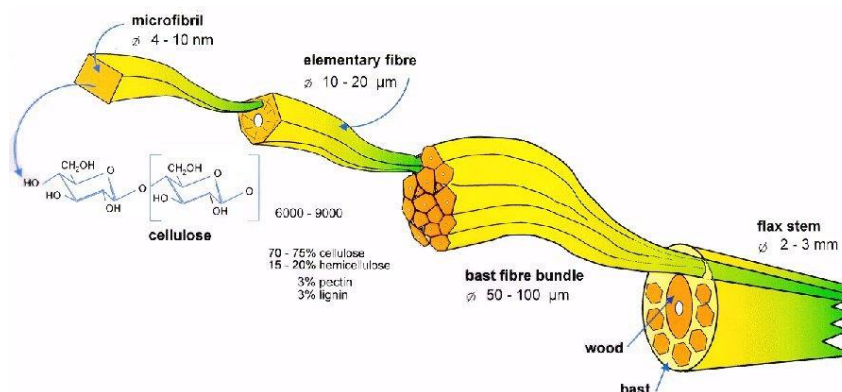
Rastline, iz katerih pridobivamo tekstilna vlakna, so najstarejše kulturne rastline, saj so bombažne tkanine najdene tudi še iz 5.000 let pred našim štetjem.

Naravna vlakna so biosintetični proizvod živali in rastlin. Najpomembnejša naravna vlakna so semenska (bombaž), stebelna (lan in konoplja), listna (manilska konoplja), plodovna (kokos). Pod naravna vlakna spadajo tudi živalska, kot na primer volna in svila.

2.4.2.1 Lanena vlakna

Lan je najstarejše uporabljeno rastlinsko vlakno, te dokaze najdemo pri egiptovskih mumijah, ki so povite v lanene pletenine. Dandanes lan pridobivamo iz severa Evrope. Rastlina zraste do 1,5 m visoko in je enoletna z modrim ali belim cvetom (slika 7). Steblo sestavlja stržen, kambij, ličje in povrhnjica, vlakna pa pridobivamo iz ličja. Lan sadijo gosto in redko. Redko sejan lan daje dobra semena, gosto sejan pa fina vlakna. Ko rastlina odcveti, prične spodnji del rumeneti, takrat jo populijo skupaj s korenino. Rani lan je boljši in važnejši za vlakna, kasni pa za pridobivanje semen za laneno olje. Populjena stebila

Lanena vlakna so stebelna vlakna, (slika 6), ta pa so sestavljena iz 68 – 84 % celuloze, ostale snovi so maščobe, voski, lignin, minerali in pektinske snovi. Zaradi visoke vsebnosti celuloze tudi hitro gorijo. Dolga so od 30 – 80 cm, debela 20 – 30 μm , najslabša pa dosežejo debelino tudi do 220 μm . Trdnost lanenih vlaken je večja od bombažnih. So sivkaste ali rjavkaste barve, lahko jih pa tudi pobelimo na soncu ali pa umetno. Imajo veliko higroskopsnost, saj lahko eno vlakno sprejme 23 % vlage glede na njihovo težo, trgovska vlaga pa je 12 %. Vlakna so odporna proti obrabi, proti lugom, kisline pa jih poškodujejo, jih pooglenijo. Elastičnost je slaba, zato se izdelki zelo mečkajo, povečanje elastičnosti dosežemo s kombinacijo s sintetičnimi vlakni. So zelo trpežna. Trdnost je visoka, če je dobra kakovost, je večja kot pri bombažu. Izolacijska sposobnost ni velika, saj celuloza dobro prevaja toploto.



Slika 6: Laneno vlakno (Producing natural fibre composites)

Uporabljajo se za močne tehnične tkanine, slikarska platna, rjuhe, brisače, oblačila, zavese, posteljno perilo, prte, pohištvene tkanine, ponjave, čevlje, sukance, inštalacijske materiale za tesnjenje (Šešek, 1975).

V raziskovalnem delu za diplomsko nalogo smo uporabili laneno platno, in sicer 265 g/m^2 .



Slika 7: Lan (Flax fiber. 2012)

2.4.2.2 Vlakna jute

Juta se pridobiva iz stebela jutovca, ki je enoletni grm z dlakavimi, nazobčanimi listi in zraste v višino od 1,5 do 5 m, pokončno ga drži 2,5 cm debelo steblo. Jutovec spada v družino lipovk ter raste v vlažnih tropskih krajih, predvsem v azijskih državah. Največji pridelovalci jute so Indija, Bangladeš, Kitajska, Uzbekistan, Nepal, Vietnam ter Pakistan, (Jute fiber, 2015).

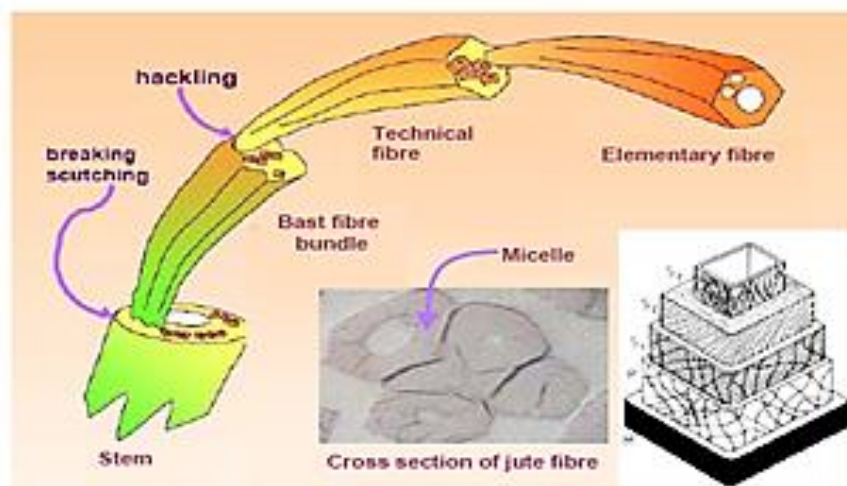
Pomembni sta dve vrsti jute: bela juta (*Corchorus capularis*) in nalta juta (*Corchorus olitorius*), (Juta – surovina, 2014).

Obdeluje se podobno kot lan, z namakanjem v vodi, spiranjem ter sušenjem. Vsebujejo približno 60 % celuloze, 12 % lignina, od 12 do 16 % hemiceluloze in še ostale komponente (slika 8).

Vlakna so manj čvrsta, trdna, prožna, raztezna kakor lanena, ampak bolj groba, niso odporna na vlago in kisline, zaradi velike vsebnosti lignina so krhke, če so preveč izpostavljene svetlobi izgubijo natezno trdnost, so higroskopna. Mehanske lastnosti vlaken so odvisne tudi od trajanje toplotne obdelave, saj lahko natezna trdnost variira od 330 MPa in do 1200 Mpa, pri premeru vlakna od 20 – 50 μm . Tudi elastični modul ima podobne lastnosti zaradi toplotne obdelave, kjer vrednost variira od 17 MPa do 27 MPa pri premeru vlakna od 20 – 50 μm . Dolžina vlaken je od 1,5 do 3 m.

Uporabljajo se v avtomobilski industriji, za tkanine, ki so namenjene za embalažo, preproge, gospodinjski tekstil, tkanine za talne obloge, tapetništvo (Jovanović in Škundrič, 1988).

Pri diplomski nalogi smo uporabili pletenino jute z 260 g/m².



Slika 8: Struktura jutovega vlakna (Jute composites as wood substitute)

2.5 TRDNOST

Trdnost je sposobnost materiala, da se upira spremembi oblike in porušitvi zaradi zunanjih sil, ki delujejo na material (Gorišek, 2012).

Ko se material obremeni z zunanjimi silami, se upira, tako da v njem nastanejo napetosti. Poznamo dve vrsti napetosti: tlačna in natezna obremenitev. Pri obeh izračunamo napetost po:

$$\sigma = \frac{F}{S} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad \dots(1)$$

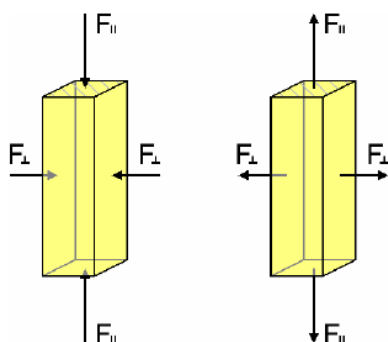
σ = napetost [N/m²]

F = sila, ki deluje pravokotno na ploskev [N]

S = ploskev, na katero deluje sila [m² ali mm²]

Pri obremenitvi nateznih sil, ki delujejo na les v smeri vlaken oziroma vzporedno z vlakni ali pravokotno na lesna vlakna, nastanejo v lesu natezne napetosti. Pri obremenitvi tlačnih sil, ki delujejo na les v smeri vlaken ali pravokotno na vlakna, pa se v lesu pojavijo tlačne obremenitve. Delovanje sil je prikazano na sliki 9 (Žarnić, 2005).

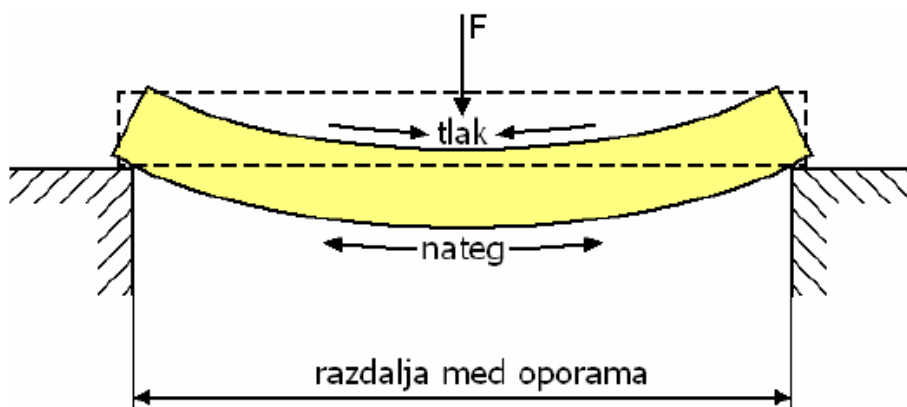
Trdnost materiala je enaka največji napetosti, ki nastane v telesu ob porušitvi. Trdnostne lastnosti lesa določamo v laboratorijih na vzorcih lesa predpisanih velikosti. Lesne vzorce uravnesimo pri normalni klimi z relativno zračno vlažnostjo $\phi = 65 \%$ in temperaturo $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ na ravnovesno vlažnost $u = 12 - 15 \%$.



Slika 9: Delovanje tlačnih sil (levo) in delovanje nateznih sil (desno)

2.5.1 Upogibna trdnost

Upogibna trdnost je odpor lesenega nosilca med oporama proti maksimalni sili, ki deluje pravokotno na os nosilca. Med upogibno obremenitvijo nastanejo v vrhnjih plasteh osne (vzdolžne) tlačne napetosti, v spodnjih plasteh pa osne natezne napetosti (slika 10).



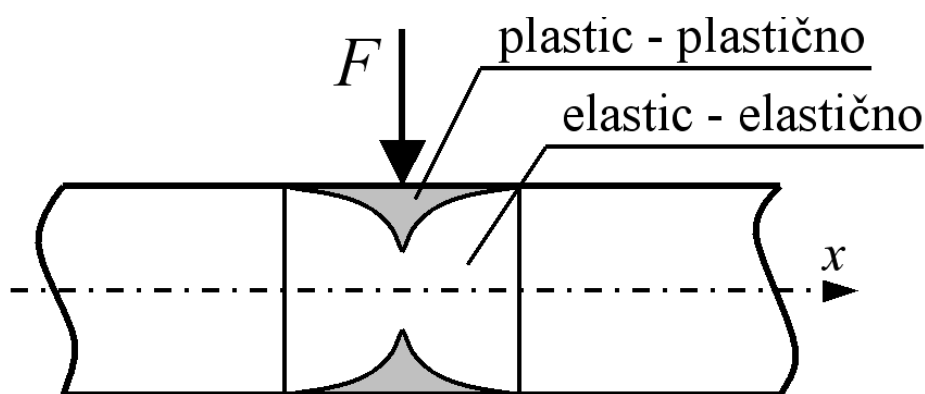
Slika 10: Tlačne in natezne napetosti v nosilcu

V praksi je upogibna trdnost zelo pomembna, saj so konstrukcijski elementi pogosto obremenjeni na upogib. Leseni nosilec sme biti obremenjen le do meje proporcionalnosti oziroma elastičnosti (Premrov in Dobrila, 2008).

Maksimalno upogibno trdnost dosežemo, ko nastopi porušitev na natezno obremenjeni strani nosilca. Pri vlažnem in segretem lesu nastanejo pri enaki sili večje plastične deformacije, kar je pomembno pri krivljenju lesa. Poleg splošnih vplivov, ki določajo mehanske lastnosti lesa, je za upogibno trdnost še pomembna: oblika in velikost lesenega nosilca, orientacija lesa in razdalja med oporama ter način obdelave. Največjo upogibno trdnost ima okrogel les, veliko tesan in cepljen les, najmanjšo pa žagan les. Med napakami lesa, ki zmanjšujejo trdnost, so najpomembnejše grče.

2.5.2 Napetost in deformacija

Med obremenitvami lesa z zunanjimi silami se njegova oblika spreminja oziroma nastajajo deformacije v lesu. Pri nižji obremenitvi, ko je še les v elastičnem območju, les spremeni svojo obliko, vendar se po končani obremenitvi sile, zaradi elastičnosti, povrne v svojo prvotno obliko. Kadar obremenjujemo material preko meje proporcionalnosti (preko meje elastičnosti), se po prenehanju obremenitve s silo les ne povrne v prvotno stanje in v njem nastanejo trajne plastične deformacije. Prikaz obremenitvenega območja v nosilcu je na sliki 11. V praksi poizkušamo les obdržati v elastičnem območju, da ni plastičnih deformacij. Mejo napetosti, pri kateri nastopi porušitev materiala, imenujemo trdnost.



Slika 11: Prikaz elastičnega in plastičnega območja v nosilcu (Halilović in Štok, 2007)

3 MATERIALI IN METODE

3.1 ZASNOVA RAZISKAVE

Cilj raziskave je bil, da bi nosilcu povečali upogibno trdnost s tem, da bi v zunanje sloje lepila dodajali sintetična in naravna vlakna. Najprej smo hoteli v sloj dodajati pletene mreže iz različnih vlaken, ampak so bile pletene mreže na razpolago le iz določenih vlaken in ne iz vseh. Zato smo se odločili, da bomo uporabili posamezna vlakna v razsutem stanju, povprečne dolžine 12 mm. Uporabljena vlakna so bila ogljikova, steklena, lanena in vlakna jute.

Izdelava lepljenih lameliranih nosilcev je potekala tako, da smo jih razdelili v tri skupine, in sicer masiven nosilec, ki ni bil lameliran zaradi kasnejše primerjave med ostalimi nosilci z vlakni, potem pa še nosilci zlepljeni z melamin-urea-formaldehidnim lepilom ter nosilci zlepljeni s poliuretanskim lepilom (preglednica 1). Za vsako skupino smo izdelali štiri nosilce.

Preglednica 1: Oznaka in opis preizkušancev

Oznaka preizkušanca	Opis
SM	Masiven smrekov nosilec
MUF	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z MUF lepilom
MUF+L	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z MUF lepilom in dodanimi lanenimi vlakni v lepilne spoje
MUF+J	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z MUF lepilom in dodanimi vlakni jute v lepilne spoje
MUF+S	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z MUF lepilom in dodanimi steklenimi vlakni v lepilne spoje
MUF+O	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z MUF lepilom in dodanimi ogljikovimi vlakni v lepilne spoje
PUR	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z PUR lepilom
PUR+L	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z PUR lepilom in dodanimi lanenimi vlakni v lepilne spoje
PUR+J	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z PUR lepilom in dodanimi vlakni jute v lepilne spoje
PUR+S	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z PUR lepilom in dodanimi steklenimi vlakni v lepilne spoje
PUR+O	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z PUR lepilom in dodanimi ogljikovimi vlakni v lepilne spoje
MUF+OG	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z MUF lepilom in dodanimi ogljikovimi vlakni (vlakna dolžine nosilca) v spodnji zunanji lepilni spoj
PUR+OG	5-slojni lameliran smrekov nosilec lepljen z PUR lepilom in dodanimi ogljikovimi vlakni (vlakna dolžine nosilca) v spodnji zunanji lepilni spoj

3.2 MATERIALI

3.2.1 Masiven les

V diplomski nalogi smo uporabili masiven les smreke, ki je v naši državi pomembna gospodarska lesna vrsta. Je druga najpogostejša vrsta in na slovenskem zaseda 32 % gozdov. Ima dobre mehanske in fizikalne lastnosti, zato se veliko uporablja za konstrukcijske namene. Les smo dobili na Oddelku za lesarstvo na Biotehniški fakulteti. Pri poteku raziskave smo stremeli k temu, da uporabimo le radialno usmerjen les, da ne bi imeli velikih razlik zaradi variabilnosti lesa. Les je imel od 10 do 15 % vlažnost ter gostoto od 448 do 583 kg/m³. Za upogibni preizkus smo zlepili lamele, ki so imele 5 mm debeline, 60 mm širine in 600 mm dolžine.

3.2.2 Lepilo

Prvo lepilo, ki smo ga uporabili, je bilo MUF lepilo iz podjetja Hoja. Trdilec je imel oznako 2526 UN 3412 in lepilna smola 1247. Obe uporabljeni lepilni komponenti sta bili od proizvajalca Casco Adhesives AB. Lepilo je konstrukcijsko in je namenjeno za hladno stiskanje lepljenih elementov. Lepili smo z razmerjem 100 delov smole in 75 delov trdilca.

Drugo uporabljeno lepilo je bilo enokomponentno poliuretansko lepilo Mitopur E45. Pri lepljenju smo se držali navodil proizvajalca. Lepilo tvori vodoodporne lepilne spoje. Optimalen nanos je 200 g/m² in utrjevanje pri temperaturi 18 – 20 °C. Čas stiskanja je 45 min, med utrjevanjem se lepilo rahlo speni. Nadaljnja obdelava je možna po 24 urah.

3.2.3 Vlakna

Steklena, ogljikova, lanena vlakna in vlakna jute smo kupili v podjetju Samson Kamnik d.o.o. Lanena vlakna smo razrezali iz lanenega platna (slika 12) na dolžino 12 mm. Platno je bilo dimenzij: širine 2240 mm, dolžine 1000 mm in teže 265 g/m².



Slika 12: Laneno platno

Vlakna jute smo izdelali na enak način kot lanena, izrezali smo jih iz pletenine jute, (slika 13), ki je bilo širine 1050 mm, dolžine 2000 mm in je tehtalo 260 g/m².



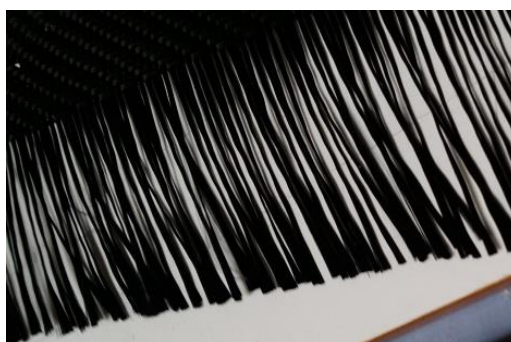
Slika 13: Pletenina jute

Steklena vlakna (slika 14) so bila edina, ki smo jih dobili v narezani obliki na dolžino 12 mm, zato tudi niso bila količinsko določena na m². V posodi smo jih kupili 500 g.



Slika 14: Steklена vlakna

Karbon tkanina je bila širine 1000 mm, 5000 mm dolžine in jo je količinsko bilo 200 g/m². Tudi to tkanino (slika 15) smo razrezali za pridobitev vlaken dolžine 12 mm. Pri vseh tkaninah smo pazili, da je bila podobna masa na m², da ni bilo velikih razlik med vlakni.



Slika 15: Ogljikova vlakna

Ogljikova, lanena in vlakna jute smo imeli v obliki pletenine. Mrežo smo razpletli in narezali vlakna na dolžino 12 mm. Pri rezanju so se sintetična vlakna že takoj razpršila in so se lahko rezala z nožem, medtem ko so se naravna pri težavnem rezanju s škarpami združevala in oprijemala druga druge. Naravna vlakna so bolj trda od sintetičnih. Problem je bil tudi v pleteninah, ker so bile narejene že nitke iz vlaken, zato se niso povsem razdrobila v posamezna vlakna.

3.3 METODE

3.3.1 Izdelava preizkušancev

Za eksperiment smo uporabili zračno suhe smrekove plohe, iz katerih smo najprej izdelali lamele (slika 16) dimenzij: širina 60 mm, debelina 6 mm, dolžina 600 mm, nato pa te zlepili v nosilec. Končne dimenzije nosilca, v katerem je bilo 5 lamel, so bile: $50 \times 25 \times 600$ mm. Lamele smo poskobljali na končno debelino 5 mm pred začetkom lepljenja. Zaradi anizotropije lesa smo izdelovali čim bolj radialne lamele, da ne bi imeli razlik že v sami sestavi nosilca. Če je bila struktura malo tangencialna, smo lameli zlepili v sredini nosilca, kjer ni imela veliko vpliva na upogibno trdnost.

Izdelali smo 200 lamel in 4 masivne preizkušance, da smo lahko primerjali masiven les z lameliranimi nosilci.

Preizkušance smo razdelili v 3 skupine in več podskupin, kot kaže preglednica 3.



Slika 16: Izdelava lamel

3.3.2 Nanos lepila in vlaken

Nanos poliuretanskega lepila Mitopur E45 je bil 200 g/m^2 . Enak nanos je bil tudi pri MUF lepilu. Razmerje med MUF smolo in trdilcem je bilo 100 : 75. Nanos obeh lepil smo uravnavali z laboratorijsko tehtnico.

3.3.3 Sestava lepljencev

Pri sestavi smo lepilo in vlakna najprej pomešali v posodi, da smo zagotovili dobro oblepljenost vlaken, nato pa smo čim hitreje enakomerno nanесли lepilo in vlakna na lamelo (slika 17). Vlakna so bila v skupkih, zato smo jih pri nanosu poskušali čim bolj enakomerno razporediti po površini.



Slika 17: Levo: sintetična razpršena vlakna, desno: skupki naravnih vlaken

Vsa vlakna so se lažje nanašala na površino in razporejala po površini pri MUF lepilu kot pa pri poliuretanskem lepilu. MUF ima nižjo viskoznost ali manjši upor lezenja tekočine, zato je boljše nanašanje.

3.3.4 Stiskanje preizkušancev

Preizkušance smo lepili na hladen način v enoetažni stiskalnici na Oddelku za lesarstvo na Biotehniški fakulteti.

3.3.4.1 Parametri lepljenja

Hladno lepljenje je potekalo pri temperaturi laboratorija 22 °C.

Izračunali smo potreben tlak stiskanja, na podlagi tega, da smo lepili po 4 preizkušance. Določili smo specifični tlak, ki je znašal 12 barov. Izračun je bil sledeč:

Površina enega nosilca $\times$ število nosilcev v stiskalnici
 $(0,6 \times 0,06) \times 4 = 0,144 \text{ m}^2$ – glede na izračunano površino smo izbrali iz grafa na stiskalnici specifični tlak, ki je bil 12 barov, tlak stiskanja pa 70 barov.

Čas lepljenja poliuretanskega lepila Mitopur E45 je po predpisih proizvajalca 45 min, mi pa smo podaljšali čas lepljenja na 60 min.

Čas lepljenja melamin-urea-formaldehidnega lepila pri razmerju na 100 : 75 je znašal 120 min.

Po končanem stiskanju smo lepljene lamelirane nosilce postavili v komoro, da je lepilo popolnoma utrnilo. Čas izpostavitve v komori je bil 24 ur pri temperaturi $20 \pm 2 \text{ °C}$ in relativni zračni vlažnosti $60 \pm 5 \%$.

3.3.6 Testiranje mehanskih lastnosti

Pred testiranjem smo preizkušance obžagali na končne dimenzije $600 \times 50 \times 25 \pm 3$ mm. Različna debelina se nam je pojavila zaradi vpreška in zaradi različnih mehanskih lastnosti samih vlaken. Testiranje je potekalo z napravo Zwick Z100 (slika 18).

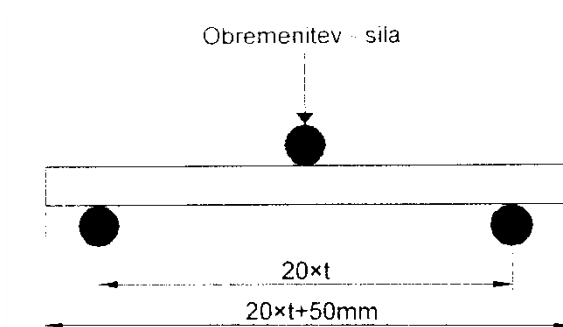
Test mehanskih lastnosti smo izvajali po standardu SIST EN 310. Potek testiranja je bil takšen, da smo najprej nastavili napravo za tritočkovni upogib. Nato smo preizkušance položili na podpore v napravi in jih poravnali. V računalnik smo vnesli še debelino ter širino preizkušanca in začeli s preizkusom. Računalniški program nam je podal rezultate, in sicer za modul elastičnosti, silo loma, upogibno trdnost in pretekli čas do zloma. Po standardu mora do loma priti v času 60 ± 30 sekund. Pogoji, pri katerih smo izvajali poskus, so bili: $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $RZV = 55\text{ }\%$.



Slika 18: Naprava za testiranje Zwick Z100

3.3.6.1 Tritočkovni upogib

Tritočkovni upogib se uporablja za ugotavljanje elastičnega modula ter upogibne trdnosti po standardu SIST EN 310 (slika 19).



Slika 19: Shema tritočkovnega upogiba (Kariž, 2009)

Upogibno trdnost (f_m) smo izračunali po enačbi:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{MAX} \cdot l_1}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad \dots(2)$$

f_m – upogibna trdnost [N/mm^2]

F_{max} – sila loma [N]

l_1 – razdalja med podporama [mm]

b – širina preizkušanca [mm]

t – debelina preizkušanca [mm]

Modul elastičnosti (E_m) smo računali po:

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

E_m – modul elastičnosti [N/mm^2]

l_1 – razdalja med spodnjima podporama [mm]

F_2 – 40 % maksimalne sile [N]

F_1 – 10 % maksimalne sile [N]

b – širina preizkušanca [mm]

t – debelina preizkušanca [mm]

a_2 – poves pri 40 % maksimalne sile [N]

a_1 – poves pri 10 % maksimalne sile [N]

3.3.7 Ugotavljanje vlažnosti

Po lomu preizkušancev smo ugotovili vlažnost po standardu SIST EN 322 : 1993. Najprej smo izžagali preizkušance iz nosilcev na krožnem žagalnem stroju dimenzij 50×50 mm. Potem smo jih stehali na 0,01 g natančno ter jih dali sušiti v sušilnik s temperaturo 103 ± 2 °C do konstantne mase. Po končanem sušenju smo jih zopet stehali na 0,01 g natančno in izračunali vlažnost po formuli:

$$u = \frac{m_H - m_0}{m_0} \quad \dots(4)$$

u – vlažnost [%]

m_u – masa vzorca pri določeni vlažnosti [g]

m_0 – masa vzorca po sušenju [g]

3.3.8 Ugotavljanje gostote

Gostoto smo ugotavljali po standardu SIST EN 323:1993. Preizkušancem dimenzij 50×50 mm smo s kljunastim merilom natančno izmerili dolžino, širino ter debelino. Stehtali smo jih še na 0,01 g natančno ter izračunali gostoto po enačbi:

$$\rho = \frac{m}{b \cdot l \cdot t} \cdot 10^6 \quad \dots(5)$$

ρ = gostota [kg/m^3]

B – širina [mm]

l – dolžina [mm]

t – debelina [mm]

m – masa [g]

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Naredili smo masivne nosilce, ki niso bili lamelirani (SM) za primerjavo z lameliranimi, ki so bili zlepljeni z MUF in PUR lepilom. Z obema lepiloma smo zlepili tudi lamelirane nosilce brez vlaken za primerjavo.

Med izdelavo lameliranih nosilcev smo pri nanosu nekaterih vlaken imeli določene težave.

MUF+Lan in MUF+Juta – viskoznost lepila je nizka, zato se je lepilo dobro nanašalo, vendar so se lanena vlakna združevala v kepe (slika 20), tudi vlakna jute so se združevala (slika 21), ampak manj kot lanena. Narejene niti nismo mogli povsem razpršiti v posamezna vlakna.



Slika 20: Združevanje lanenih vlaken



Slika 21: Rahlo združevanje vlaken jute

MUF+Steklo – pri nizko viskoznem lepilu so se steklena vlakna z močnim vtiranjem zelo raztresla po površini, tudi to je vplivalo na rezultate (slika 22).



Slika 22: Dobro razporejena steklena vlakna

MUF+Ogljikova – ogljikova vlakna so se najboljše raztresla in nanesa po celotni površini. Raztresla so se z vtiranjem tudi do povsem posameznih vlaken, kot je razvidno na sliki 23. Povsem razsuto stanje vlaken je bil tudi naš cilj pri lepljenju z vlakni.



Slika 23: Ogljikova vlakna

PUR+Lan in PUR+Juta – pri poliuretanskem lepilu je viskoznost višja, zato je bilo težje raznašanje lepila in vlaken po površini kot pri MUF lepilu. Predvsem lanena vlakna (slika 24) ter vlakna jute (slika 25) so se združevala nazaj v niti in kepe.



Slika 24: Lanena vlakna



Slika 25: Vlakna jute

PUR+Steklo – vlakna so se kljub višji viskoznosti lepila dobro raztresla ter zadovoljivo nanesa po celotni površini. Na sliki 26 je prav tako razvidno, da so se skupki vlaken raztresli tudi do posameznega vlakna.



Slika 26: Poizkusno raztresanje steklenih vlaken

PUR+Ogljikova vlakna – najboljša raztresenost in razporeditev tudi pri poliuretanskem lepilu je bila pri vlaknih iz ogljika (slika 27), vendar manj kvalitetno kot pri MUF lepilu. Pri vtiranju v površino so se tudi razpršila v čisto posamezna vlakna.



Slika 27: Ogljikova vlakna v kombinaciji s PUR

MUF + OG (ogljikova) in PUR + OG (ogljikova) – vlaken nismo razrezali na 12 mm, ampak je ostala dolžina 600 mm, tolikšna, kot je dolžina preizkušanca. Postopek nanosa lepila in vlaken je potekal tako, da smo nanесли na lamelo le polovico mase lepila, dodali vlakna, nato pa še na zgornjo lamelo polovico mase lepila. Vlakna smo imeli zlepljena na začetku in na koncu z lepilnim trakom. S tem smo si pomagali pri nanosu vlaken na lepilo. Zlepljena smo le položili na lepilo in poravnali.

Pri takšnem nanosu lepila in vlaken lahko nastanejo tudi težave zaradi neoblepljenosti vlaken, ki so povsem v notranjosti v skupkih. Torej ne moremo oblepiti vsakega posameznega vlakna posebej.

Na osnovi upogibnega testa smo prišli do zanimivih rezultatov o vplivu vrste lepila in dodanih vlaken na trdnostne lastnosti izdelanih nosilcev.

V preglednici 2 so prikazane povprečne vrednosti sile loma, upogibne trdnosti, modula elastičnosti in gostote preizkušancev.

Preglednica 2: Povprečne vrednosti maksimalne sile loma, upogibne trdnosti, modula elastičnosti ter gostote

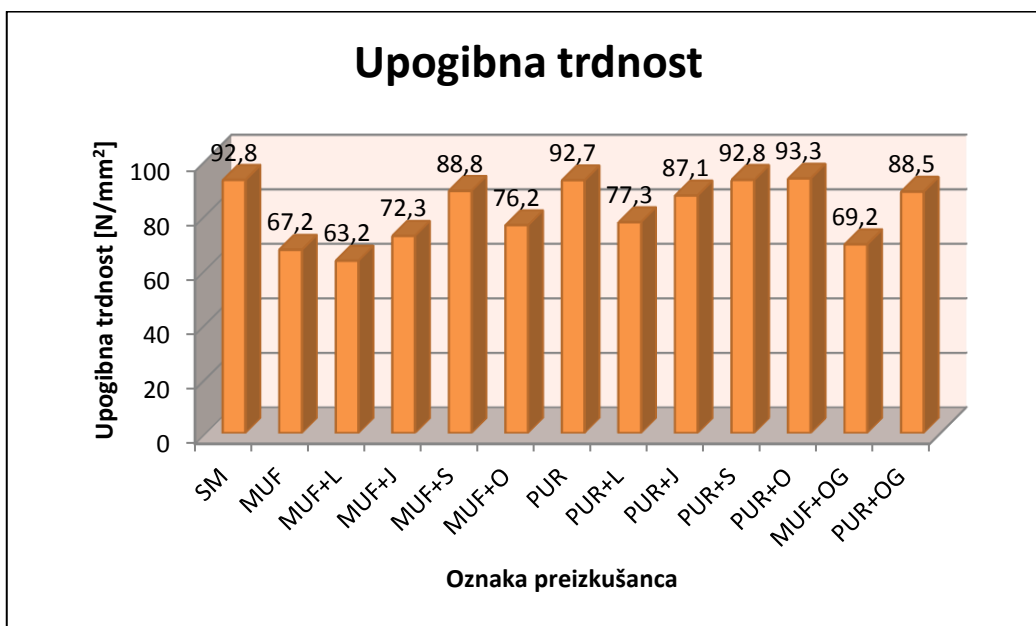
Oznaka preizkušanca	F_{max} [N]	f_m [N/mm ²]	E [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]
SM	3832	92,8	14725	503
MUF	2966	67,2	10575	454
MUF+L	2832	63,2	10663	454
MUF+J	2814	72,3	12975	503
MUF+S	3406	88,8	16650	569
MUF+O	3058	76,2	12533	461
PUR	4165	92,7	15725	523
PUR+L	3619	77,3	11575	449
PUR+J	3483	87,1	13825	504
PUR+S	3769	92,8	15225	533
PUR+O	3696	93,3	15425	521
MUF+OG	2700	69,2	12485	537
PUR+OG	3257	88,5	13575	523

Na sliki 28 je prikazana upogibna trdnost lameliranih nosilcev, glede na vrsto lepila in uporabljenih vlaken. Pri upogibni trdnosti se največje napetosti pojavljajo na zunanjih straneh. Zgornji zunanji del nosilca je obremenjen na tlak, spodnji zunanji del pa na nateg. Ti dve lastnosti sta odvisni od sestave nosilca (lesa), lepila, deleža sintetičnih ali naravnih vlaken in od mesta, kjer se nahajajo vlakna.

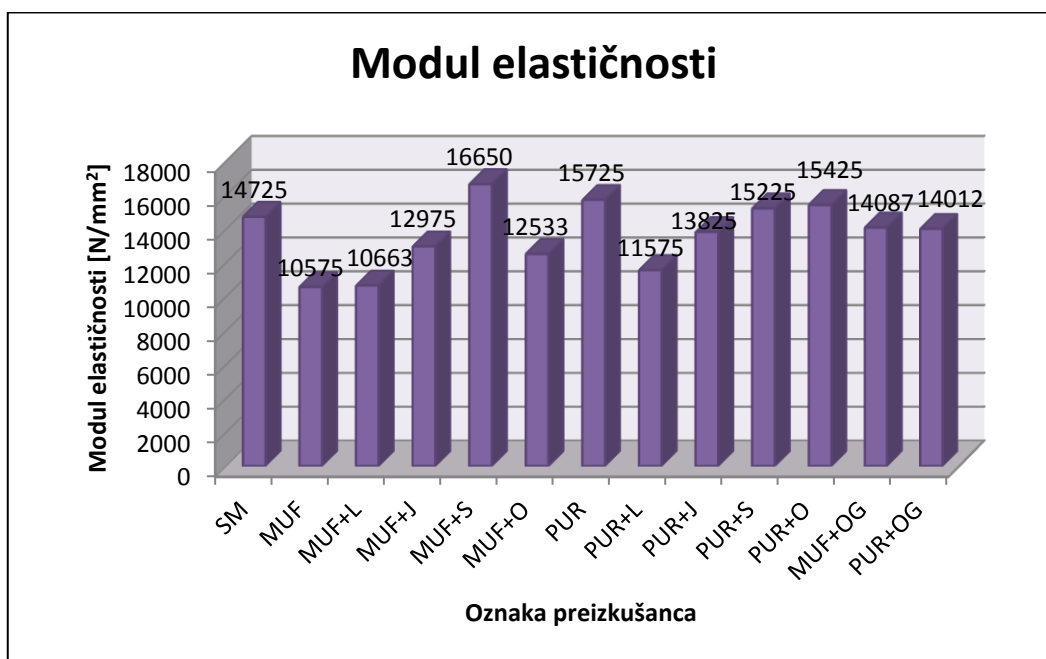
Kot je razvidno iz slike 28, imajo nosilci s sintetičnimi vlakni bistveno večjo upogibno trdnost (od 88 do 93 N/mm²) kot nosilci, zlepljeni z naravnimi vlakni (od 63,2 do 87,1). Naravna vlakna se niso izkazala za najboljšo izbiro, saj z njimi nismo dosegli izboljšanja upogibne trdnosti.

Manjšo upogibno trdnost so imeli tudi nosilci iz MUF+Ogljikova vlakna, ker smo jih v tem primeru dodali še 20 %, kar je pomenilo veliko specifično površino (vlakna so zelo drobna) in s tem porabo lepila za oblepljanje. Zato je bil posledično, premajhen nanos lepila na samo površino lamele.

4.1 UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI



Slika 28: Prikaz povprečne upogibne trdnosti pri posamezni skupini preizkušancev



Slika 29: Prikaz povprečnega modula elastičnosti pri posamezni skupini preizkušancev

Razvidno je, da ima masiven nosilec (SM) modul elastičnosti 14725 N/mm^2 (slika 29), upogibno trdnost pa $92,8 \text{ N/mm}^2$. Za primerjavo z ostalimi lameliranimi lepljenci imajo večji modul elastičnosti ter upogibno trdnost nosilci zlepljeni z MUF+S, PUR, PUR+S ter PUR+O.

V diplomskem projektu smo želeli uporabiti tudi nekaj naravnega, okolju prijaznega, zato smo vključili v projekt naravna vlakna. Med eksperimentom so bila naravna vlakna bolj težavna za uporabo kot sintetična. V kombinaciji z MUF lepili nismo dosegli visoke upogibne trdnosti, saj so nosilci ojačani z lanenimi vlakni dosegli $63,2 \text{ N/mm}^2$ in z vlakni iz jute $72,3 \text{ N/mm}^2$. Boljše rezultate smo dobili pri PUR lepilu, pri preizkušancih ojačanih z vlakni jute, ki so dosegli upogibno trdnost $87,1 \text{ N/mm}^2$ (slika 28), kar je primerljivo z masivnim nosilcem (SM), medtem ko smo z dodajanjem lanenih vlaken v PUR lepilo dosegli bistveno nižjo trdnost, povprečna vrednost je bila $77,3 \text{ N/mm}^2$. Pri preizkušancih, ki so bili zlepljeni z MUF lepilom in ojačani s steklenimi vlakni, smo dosegli modul elastičnosti 16650 N/mm^2 .

Pri preizkušancih, ki so bili zlepljeni s poliuretanskim lepilom in ojačani z ogljikovimi vlakni (dolžine 600 mm), smo dosegli najvišjo upogibno trdnost 101 N/mm^2 , modul elastičnosti je bil drugi največji 16700 N/mm^2 .

Vrednosti pri preizkušancih, ki so bili zlepljeni z melamin-urea-formaldehidnem in ojačani z ogljikovimi vlakni (dolžine 600 mm), so bile bistveno nižje kot pri preizkušancih s poliuretanskim lepilom ter vlakni celotne dolžine, saj je največja vrednost upogibne trdnosti bila pri preizkušancih z melamin-urea-formaldehidnim lepilom ter vlakni celotne dolžine, in sicer $78,7 \text{ N/mm}^2$, modula elastičnosti 13900 N/mm^2 ter najnižja vrednost za upogibno trdnost $59,8 \text{ N/mm}^2$ in modul elastičnosti 9640 N/mm^2 .

Modul elastičnosti se nanaša na togost materiala in predstavlja povs materiala pri obremenitvi. V naši raziskavi smo imeli preizkušance obremenjene pravokotno na smer vlaken, zato gre za upogib ne za uklon. Menim, da sta modul elastičnosti in upogibna trdnost odvisna od vrste vlaken, količine vlaken ter lepila.

Vpliv lepila:

Poliuretansko lepilo je tvorilo bolj trdne lepilne spoje kot melamin-urea-formaldehidno, zato tudi večja povprečna togost preizkušancev pri poliuretanskem lepilu.

Vpliv vrste vlaken:

Vlakna imajo že sama po sebi različne togosti, zato vplivajo tudi v preizkušancih.

Količina vlaken:

Zaradi velike količine vlaken, se poveča specifična površina in pride do neoblepljenosti vlaken.

S kombinacijami z naravnimi vlakni nismo prišli do želenih rezultatov. S kombinacijami s sintetičnimi vlakni smo se v nekaterih primerih približali vzorčnemu masivnemu nosilcu ali pa malo presegli vrednosti pri modulu elastičnosti in upogibni trdnosti.

4.2 GOSTOTA PREIZKUŠANCEV

Gostota odločilno vpliva na fizikalne, mehanske in tehnološke lastnosti lesa. Z naraščanjem gostote narašča tudi upogibna trdnost, modul elastičnosti, prevodnost lesa, trdota lesa, nabrekanje in krčenje lesa in še ostale lastnosti. Na gostoto lesa med drugimi vplivajo tudi anatomske lastnosti, drevesna vrsta, širina branike, vlažnost lesa, lokacija v drevesu, okuženost z glivami.

Pri razžagovanju lamel smo pazili, da bi bila orientacija lamel čim bolj radialna, in da ne bi bilo razlik med preizkušanci in tudi v posameznem preizkušancu. Ugotovili smo velike razlike v gostoti, kar je znano za les. Variabilnost med lesnimi vrstami in znotraj iste lesne vrste je namreč velika. Najbolj se je izrazil vpliv gostote na preizkušancih MUF in MUF+L. Ti so imeli najnižje gostote ter tudi najnižje upogibne trdnosti in module elastičnosti (za MUF $67,2 \text{ N/mm}^2$, za MUF+L $63,2 \text{ N/mm}^2$. oziroma za MUF 10575 N/mm^2 ter MUF+L 10663 N/mm^2).

4.3 VLAŽNOST

Preglednica 3: Povprečna vlažnost preizkušancev

Oznaka preizkušanca	Vlažnost [%]
SM	10,5
MUF	13,2
MUF+L	12,6
MUF+J	12,4
MUF+S	13,1
MUF+O	12,6
PUR	11,5
PUR+L	10,4
PUR+J	11,1
PUR+S	10,7
PUR+O	11,5
MUF+OG	14,4
PUR+OG	11,4

Zaradi različnih dejavnikov, ki bi lahko posledično vplivali na upogibno trdnost, smo preverjali tudi vlažnost posameznega nosilca (preglednica 3). Iz vsakega nosilca smo izžagali en preizkušanec dimenzij $50 \times 50 \times$ debelina ter jim izmerili vlažnosti. Največjo vlažnost (za narezana vlakna) smo dobili pri MUF preizkušancih 13,2 %, ki so imeli najmanjšo upogibno trdnost. Najmanjšo vlažnost (10,4 %) so imeli preizkušanci PUR+L s srednjo upogibno trdnostjo. Največje mehanske lastnosti ima les v absolutno suhem stanju (vlažnost = 0 %), z višanjem vlažnosti pa mehanske lastnosti padajo.

V naši raziskavi ne moremo potrditi, da je vlažnost odločno vplivala na trdnostne lastnosti, saj v primeru, da se vlažnost spremeni za en %, se modul elastičnosti spremeni za 2 %. Zato razlike v trdnosti, ne moremo pripisovati vlažnosti.

4.4 PRIMERJAVA LASTNOSTI PREIZKUŠANCEV S CELIMI IN NAREZANIMI VLAKNI

Preglednica 4: Prikaz povprečnih vrednosti preizkušancev s celimi in narezanimi vlakni

	f_m [N/mm ²]	E [N/mm ²]	F_m [N]	Povp. vlažnost [%]	Povp. gostota [kg/m ³]
PUR+OG	88,5	13575	3257,5	14,4	523
MUF+OG	69,2	12485	2700,5	11,4	537
PUR	88,6	14355	3746,4	11	506
MUF	73,5	12679	3015,2	13	488

Iz preglednice 4 lahko razberemo podobne upogibne trdnosti pri preizkušancih, ki so bili ojačani z različnimi oblikami vlaken. Opazimo lahko, da ni velikih razlik med vlakni celotne dolžine nosilca in narezanimi vlakni.

5 SKLEPI

Pri preizkušanju smo ugotovili, da z različnimi dodanimi vlakni in MUF ali PUR lepilom lahko vplivamo na mehanske lastnosti lameliranih lepljencev.

- Najbolj smo upogibno trdnost izboljšali pri preizkušancih PUR+O, kjer je znašala $93,3 \text{ N/mm}^2$, in pri PUR+OG, kjer je znašala 101 N/mm^2 .
- Najnižja je bila upogibna trdnost pri preizkušancih MUF+L, kjer je znašala $63,2 \text{ N/mm}^2$, kar je skoraj tretjino manj od trdnosti masivnega nosilca, kjer je znašala $92,8 \text{ N/mm}^2$.
- Preizkušanci lepljeni s PUR lepilom so izkazovali boljše trdnostne lastnosti, kot preizkušanci lepljeni z MUF lepilom.
- Ugotovili smo, da so sintetična vlakna bolj vplivala na izboljšanje upogibne trdnosti preizkušancev kot naravna vlakna.
- Variabilnost gostote preizkušancev je bila velika, saj je povprečna vrednost znašala od 454 do 568 kg/m^3 , kar je imelo vpliv na trdnostne lastnosti.
- Vlažnosti lesa je variirala od 10% do 14% , kar je posledično vplivalo na trdnostne lastnosti.

V raziskavi smo prišli do določenih spoznanj, ki bi jih bilo smiselno upoštevati pri nadaljnjih raziskavah. Težavno je pridobiti več vrst vlaken, ki bi bila povsem primerljiva med seboj, ker vlakna niso namenjena povsem za lesarsko stroko in se uporabljajo za razne druge namene. Velikost vlaken bi morala biti zelo podobna, ker to vpliva na oblepljanje. Smiselno bi bilo uporabiti vlakna, ki bi že bila v povsem razsutem stanju, namesto pletenih, ki smo jih morali razrezati ter razplesti. Prav tako bi bilo smiselno preučiti še druge dejavnike, ki lahko vplivajo na upogibno trdnost.

6 POVZETEK

V diplomski nalogi smo raziskovali upogibno trdnost lepljenih lameliranih lepljencev z dodanimi sintetičnimi ter naravnimi vlakni v lepilne spoje. Trdnost smo hoteli povečati z dodanimi narezanimi in dodanimi celimi vlakni v lepilne spoje. Uporabili smo vlakna jute in lanu ter steklena in ogljikova vlakna dolžin 12 mm in 600 mm. Pri preizkusih smo uporabili dve vrsti lepila: enokomponentno poliuretansko lepilo ter melamin-urea-formaldehidno lepilo.

Nanos lepila je bil 7,2 g na lamelo. V lepilo smo dodali 10 % narezanih ogljikovih vlaken, pri ostalih vlaknih pa je bil dodatek 20 %. Vlakna enake dolžine kot nosilec pri primerih MUF+OG in PUR+OG smo nanašali tako, da smo ugotovili, koliko niti se enakomerno razporedi po širini lamele. Narezana vlakna smo pomešali v lepilo, zaradi dobre oblepljenosti, ter jih nanесли na površino, vlakna enake dolžine kot nosilci smo nanесли na ta način, da smo najprej na spodnjo ploskev nanесли polovico mase lepila, dodali vlakna in nanесли na zgornjo ploskev lamele še drugo polovico mase lepila.

Preizkušance, ki so bili iz petih slojev lamel ter ojačani z različnimi vlakni, smo preizkušali s tritočkovnim upogibom po standardu SIST EN 310. Določili smo tudi vlažnost preizkušancev ter gostoto. Ugotovili smo, da ima na upogibno trdnost velik vpliv vrsta vlaken, mesto, kjer se nahajajo vlakna, gostota lesa in vrsta lepila. Nekatere kombinacije preizkušancev z uporabljenima lepiloma ter vlakni so se izkazale za zelo dobre, saj smo prišli do povečanja upogibne trdnosti, pri nekaterih drugih preizkušancih pa se po trdnosti nismo približali niti primerjalnemu masivnemu vzorcu iz smreke.

7 VIRI

Angles. Microchips and nanotubes: using carbon nanotubes in electronics.

<https://mitangles.wordpress.com/hyer/> (2. 8. 2015)

Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.

Dukarič D. 2011. Primerjava lesenih in jeklenih nosilcev na objektu OŠ Ljudski vrt Ptuj. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru. Fakulteta za gradbeništvo: 78 str.

Fiber. 2015

<https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber> (10. 8. 2015)

Flax fiber. 2012.

<http://www.ellies-whole-grains.com/flax-fiber.html#axzz3j0ay0fHg> (2008–2012)

Glass fiber. 2015

https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber (15. 7. 2015)

Godec M. 1999. Naravoslovje in poznavanje blaga 2. Učbenik Pragersko, Mago: 197 str.

Gorišek Ž. 2012. Les, zgradba in lastnosti. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.

Halilović M., Štok B. 2007. Razvoj elastoplastičnega stanja med upogibom nosilcev.

http://lab.fs.uni-lj.si/lnms/LNMS-slo/teor_meh/Razvoj_elastoplasticnega_stanja.php

Ilkon. Inštitut za les in konstrukcije. Les – Material.

<http://www.ilkon.si/material.html> (10. 8. 2015)

Ivajnsič D. 2012. Tehnološki in ekonomski vidiki uporabe mikrovlaken v betonu. Diplomski projekt, Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 41 str.

Jovanović R., Škundrič P. 1988. Tekstilna vlakna. Beograd, Naučna knjiga: 218 str.

Juta - surovina. 2014.

[https://sk.wikipedia.org/wiki/Juta_\(surovina\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Juta_(surovina)) (16. 8. 2015)

Jute Composites as Wood Substitute. Jute fibre structure

<http://article.sapub.org/10.5923.j.textile.20120106.05.html>

Jute fiber. 2015.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Jute> (26. 7. 2015)

Kariž M. 2009. Lepljen les. Študijsko gradivo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 40.

- Kitek Kuzman M., Hrovatin J. 2006. Leseni lepljeni lamelirani konstrukcijski elementi. Les, 58, 4: 106-114
- Konrad R. 2014. Ojačitev lesenih konstrukcijskih elementov s kontinuiranimi ogljikovi vlakni CFRP kompoziti. Diplomsko naloga. Maribor, Univerza v Mariboru: 61 str.
- Oznake tekstila. Tekstilna vlakna (lastnosti, uporaba in nega).
http://www.oznake-tekstila.si/index.php?option=com_content&view=article&id=156&Itemid=31 (20. 7. 2015)
- Premrov M., Dobrila P. 2008. Lesene konstrukcije. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 347 str.
- Producing natural fibre composites. Flax fibre structure.
<http://www.agrofibrecomposites.com/process.htm> (16. 8. 2015)
- Resnik J. 1997. Lepila in lepljenje lesa. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.
- Richter K. 2013. Ojačevanje betonskih konstrukcij z uporabo vlaknastih polimernih kompozitov. Magistrsko delo, Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 95 str.
- Sever S. 2010. Izboljšanje upogibne trdnosti furnirnih plošč z dodajanjem sintetičnih vlaken. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 58 str.
- SIST EN 301: 2006 Lepila na osnovi fenolov in aminoplastov za nosilne lesene konstrukcije – Razvrstitev in zahteve. 2006
- SIST EN 310: 1993 Lesene plošče – Določanje modula elastičnosti in upogibne trdnosti. Wood – based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993
- SIST EN 322: 1993 Lesne plošče – Določanje vlažnosti. Wood-based panels - Determination of moisture content. 1993
- SIST EN 323: 1993 Lesne plošče – Določanje gostote. Wood – based panels – Determination of density. 1993
- SIST EN 14080: 2013 Lesene konstrukcije – Lepljeni lamelirani les – Zahteve. 1993
- SIST EN 15425: 2008 Adhesives. One component polyurethane for load bearing timber structures. Classification and performance requirements. 2008

- Ščernjavič D. 2008. Lepljen les za konstrukcijske namene. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 67 str.
- Šega B. 2013/14. Lepljen les. Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov. Razvrstitev lepil za lepljenje lesa. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Šernek M. 2004. Konstrukcijski kompozitni les. Les, 56, 7/8: 230-235
- Šernek M. 2009. Uporaba različnih lesnih vrst za konstrukcijske kompozite. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije.
- Šernek M. 2012. Lesni kompoziti za gradnjo. V: Strokovni posvet gradnja lesenih stavb. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Šernek M. 2013. Lepljen les. Študijsko gradivo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo:
- Šešek F. 1975. Blagoznanstvo 2. S tehnologijo za kadre v blagovnem prometu. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 30-31
- Špiler R. 2014. Armiranje lamelno lepljenih lesnih nosilcev s kontinuiranimi ogljikovimi vlakni. Diplomski projekt. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo.
- Velkavrh A. 2013. Izboljšanje lastnosti ivernih plošč z dodajanjem naravnih in sintetičnih vlaken. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 39 str.
- Wei P. X., Wang B. J., Zhou D. G., Dai C. P., Wang Q. Z., Huang S. W. 2013. Mechanical properties of poplar laminated veneer lumber modified by carbon fiber reinforced polymer. Bioresources, 8, 4: 4883-4898
http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_08_4_Wei_Mechanical-Properties_Poplar/2284
- Žarnić R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Milanu Šerneku za strokovne nasvete in pomoč pri nastajanju diplomskega projekta. Zahvala gre tudi viš. pred. mag. Bogdanu Šegi za pomoč pri pridobivanju podatkov za diplomski projekt. Zahvaljujem se tudi tehniškemu sodelavcu Juretu Žigonu, mag. inž. les., za vso pomoč in nasvete pri praktičnem delu diplomskega projekta.

Podjetju Hoja d.d. se zahvaljujem za material in podatke.

Prav tako iskreno hvala vsem, ki so mi na kakršenkoli način pomagali pri nastajanju diplomske naloge na Biotehniški fakulteti, Oddelku za lesarstvo, ter tudi doma.

Na koncu bi se še posebej rad zahvalil staršem, ki so me spodbujali skozi celoten študij, vsej moji družini za podporo in za iskrene nasvete punci ter njeni družini.

PRILOGE

Priloga A: Preglednica izmerjenih dimenzij, mase ter izračunane gostote in mase narezanih vlaken.

	Dol. [mm]	Širina [mm]	Deb. [mm]	Masa1 [g]	Gostota [kg/m³]	Masa0 [g]	Vlaž. [%]
SM 1	49,83	50,04	24,95	33,08	531,72	29,94	10,4
SM 2	50,29	50,46	25	28,86	454,91	26,07	10,7
SM 3	50,01	50,16	24,85	32,22	516,87	29,21	10,1
SM 4	50,13	50,17	24,92	31,81	507,54	28,71	10,7
PUR 1	50,1	49,77	26,49	34,61	523,98	31,08	11,3
PUR 2	50,14	49,95	26,11	33,93	518,87	30,37	11,7
PUR 3	50,07	49,78	26,08	34,13	525,04	30,62	11,4
PUR 4	50	49,95	26,23	34,27	523,13	30,7	11,6
PUR+L 1	50,14	50,08	26,37	31,05	468,92	28,14	10,3
PUR+L 2	49,83	49,85	26,71	29,59	445,98	26,8	10,4
PUR+L 3	50,07	49,9	26,46	28,65	433,37	25,99	10,2
PUR+L 4	50,23	49,75	26,57	29,7	447,31	26,82	10,7
PUR+J 1	50,06	49,85	24,33	32,37	533,14	29,07	11,3
PUR+J 2	50,07	50,04	24,54	29,91	486,46	27,02	10,7
PUR+J 3	50,09	49,84	24,49	30,87	504,92	27,74	11,3
PUR+J 4	50,02	49,68	24,47	29,89	491,55	26,95	10,9
PUR+S 1	50,09	50,12	24,89	33,07	529,23	29,87	10,7
PUR+S 2	50,19	49,9	24,56	33,01	536,66	29,87	10,5
PUR+S 3	50,07	49,71	24,7	32,65	531,09	29,46	10,8
PUR+S 4	50,08	49,99	24,77	33,18	535,06	29,9	10,9
PUR+O 1	50,06	49,98	24,38	31,37	514,27	28,09	11,6
PUR+O 2	50,09	49,93	24,79	32,31	521,13	28,97	11,5
PUR+O 3	50,09	49,78	24,51	31,69	518,53	28,38	11,6
PUR+O 4	50,06	49,82	24,57	32,45	529,56	29,13	11,4
MUF 1	50,09	49,18	26,1	28,18	438,29	24,92	13,1
MUF 2	50,06	49,82	25,83	31,02	481,53	27,3	13,6
MUF 3	50,1	49,61	25,87	28,85	448,69	25,47	13,2
MUF 4	50,05	49,84	25,92	28,99	448,36	25,67	12,9
MUF+L 1	50,03	49,62	27,75	31,5	457,26	27,85	13,1
MUF+L 2	50,07	49,49	26,88	30,09	451,75	26,77	12,4
MUF+L 3	50,08	49,73	26,22	29,49	451,61	26,13	12,8
MUF+L 4	50,1	49,26	26,2	29,54	456,85	26,33	12,1
MUF+J 1	50,07	49,41	24,53	31,45	518,24	27,93	12,6
MUF+J 2	50,08	49,14	24,17	30,48	512,44	27,02	12,8
MUF+J 3	50,1	49,15	24,26	29,87	500,02	26,56	12,4
MUF+J 4	50,03	49,43	24,06	28,57	480,17	25,53	11,9
MUF+S 1	50,04	49,66	24,05	33,81	565,73	30,02	12,6

MUF+S 2	50,05	49,37	24,08	33,64	565,37	29,67	13,3
MUF+S 3	50,02	49,27	24,02	33,26	561,85	29,31	13,4
MUF+S 4	50,14	49,27	24,08	34,59	581,47	30,57	13,1
MUF+O 1	50,05	49,55	24,56	30,55	501,57	27,19	12,3
MUF+O 2	50,08	49,71	24,57	29,65	484,74	26,33	12,6
MUF+O 3	50,01	49,59	24,71	25,03	408,45	22,13	13,1
MUF+O 4	50,07	49,75	24,5	27,49	450,44	24,48	12,3

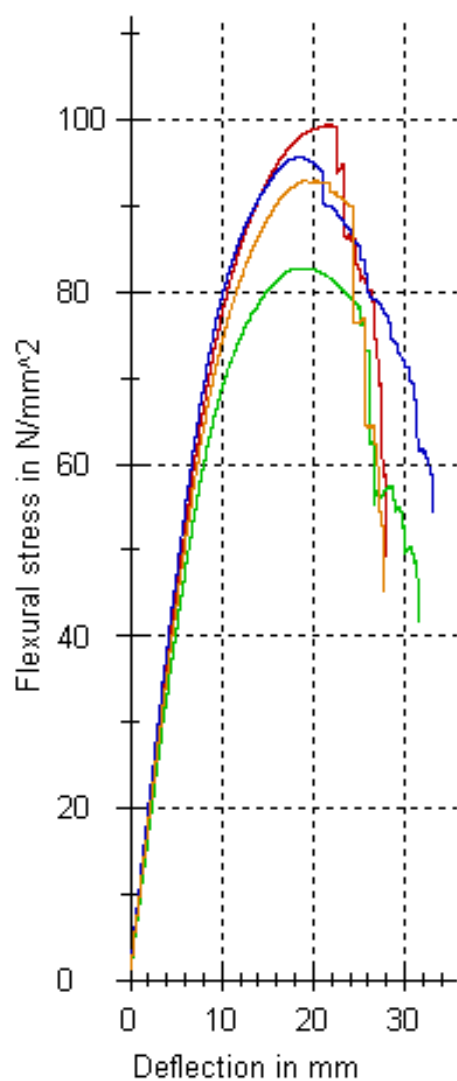
Priloga B: Preglednica izmerjenih dimenzij, mase ter izračunane gostote in mase, celih vlaken

	Dol. [mm]	Širina [mm]	Deb. [mm]	Masa1 [g]	Gost. [kg/m³]	Masa0 [g]	Vlaž. [%]
MUF2 -1	50,19	46,18	26,7	32,15	519,52	28,1	14,41
MUF2 -2	50,17	46,13	25,99	29,44	489,45	25,67	14,69
MUF2 -3	50,18	46,16	24,66	28,33	495,97	24,66	14,88
MUF2 -4	50,2	46,17	24,17	28,38	506,61	24,67	15,04
MUF+OG-1	50,32	46,15	25,33	29,83	507,11	26,17	13,99
MUF+OG-2	50,17	46,14	25,17	31,31	537,38	27,34	14,52
MUF+OG-3	50,21	46,16	25,12	29,75	510,99	25,95	14,64
MUF+OG-4	50,22	46,24	25,14	31,3	536,15	27,39	14,28
PUR+OG-1	50,3	46,19	24,23	32,8	582,65	29,45	11,38
PUR+OG-2	50,22	46,11	24,31	27,4	486,74	24,61	11,34
PUR+OG-3	50,17	46,09	24,45	32,64	577,33	29,28	11,48
PUR+OG-4	50,29	46,25	24,49	28,45	499,46	25,58	11,22

Priloga C: Podatki upogibnih obremenitev vseh preizkušancev

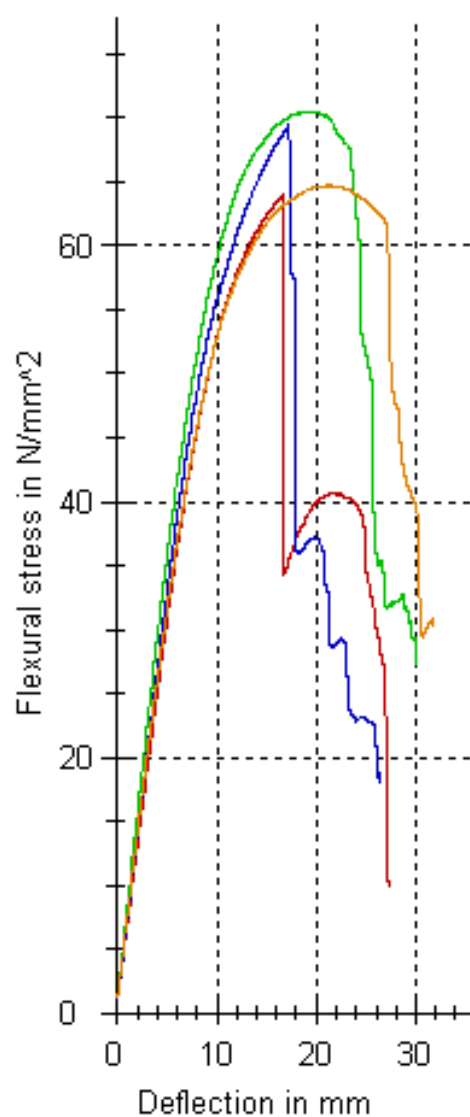
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
■	SM 1	24,91	50,02	4115	99,4	88,02	500	15000
■	SM 2	24,95	50,06	3442	82,8	76,10	500	13700
■	SM 3	24,83	50,12	3944	95,7	73,46	500	15700
■	SM 4	24,82	50,06	3826	93,0	77,52	500	14500

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{Test} s
$\bar{x}$	24,88	50,07	3832	92,8	500	78,77	122,74
s	0,06292	0,04123	285	7,11	0,000	6,39	11,19
v	0,25	0,08	7,45	7,66	0,00	8,11	9,12



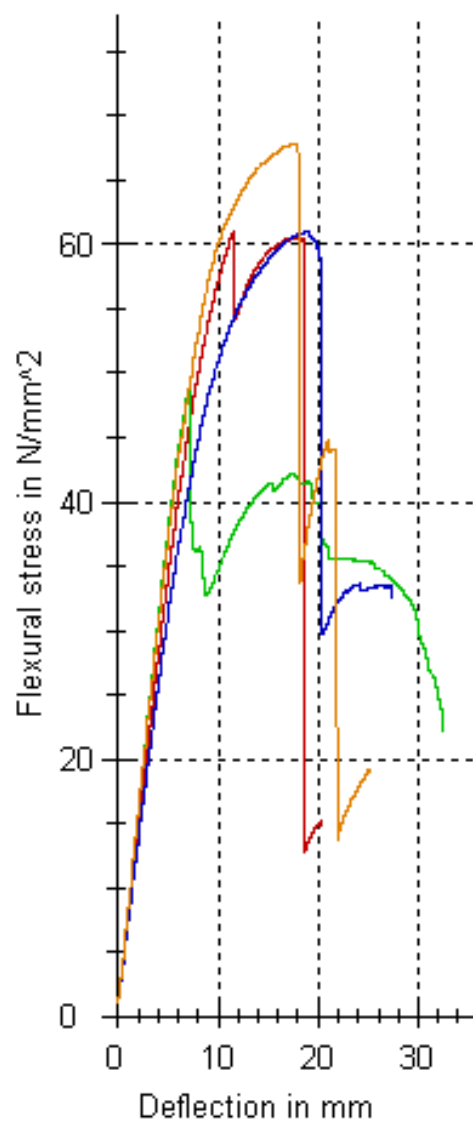
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
	MUF 1	25,8	49,49	2811	64,0	67,28	500	9800
	MUF 2	25,9	49,88	3145	70,5	77,56	500	11600
	MUF 3	25,66	49,86	3040	69,5	69,58	500	10600
	MUF 4	25,84	49,83	2869	64,7	84,36	500	10300

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	25,8	49,77	2966	67,2	500	74,69	117,74
s	0,102	0,1845	154	3,30	0,000	7,81	9,97
v	0,40	0,37	5,19	4,91	0,00	10,45	8,47



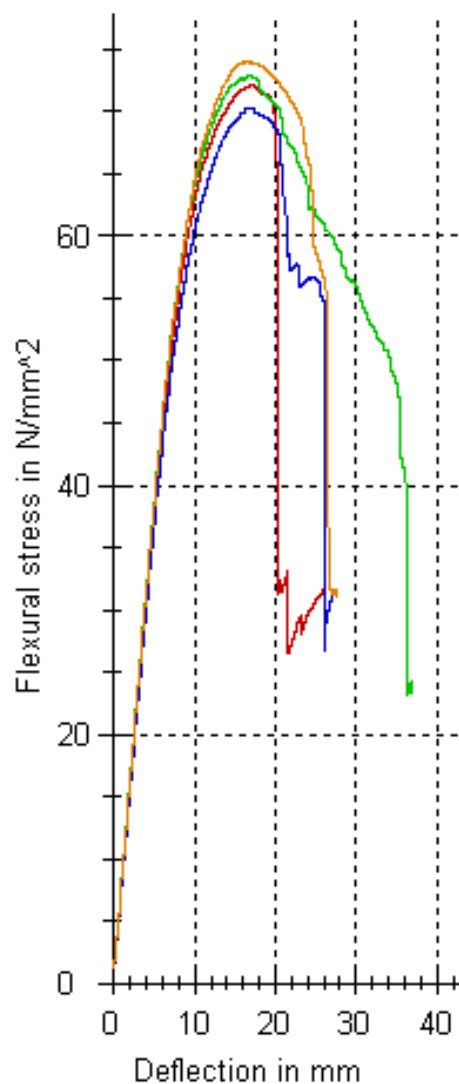
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F _{max} N	f _m N/mm ²	tBreak s	l mm	E _{m,app} N/mm ²
■	MUF+L 1	27,74	49,61	3108	61,1	46,90	500	10200
■	MUF+L 2	26,77	49,62	2323	49,0	29,12	500	11600
■	MUF+L 3	26,34	49,7	2807	61,0	77,22	500	9890
■	MUF+L 4	26,32	49,42	3091	67,7	70,50	500	11900

Series n = 4	t mm	b mm	F _{max} N	f _m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	26,79	49,59	2832	59,7	500	55,94	108,11
s	0,6649	0,1187	367	7,80	0,000	22,10	19,38
v	2,48	0,24	12,94	13,07	0,00	39,52	17,92



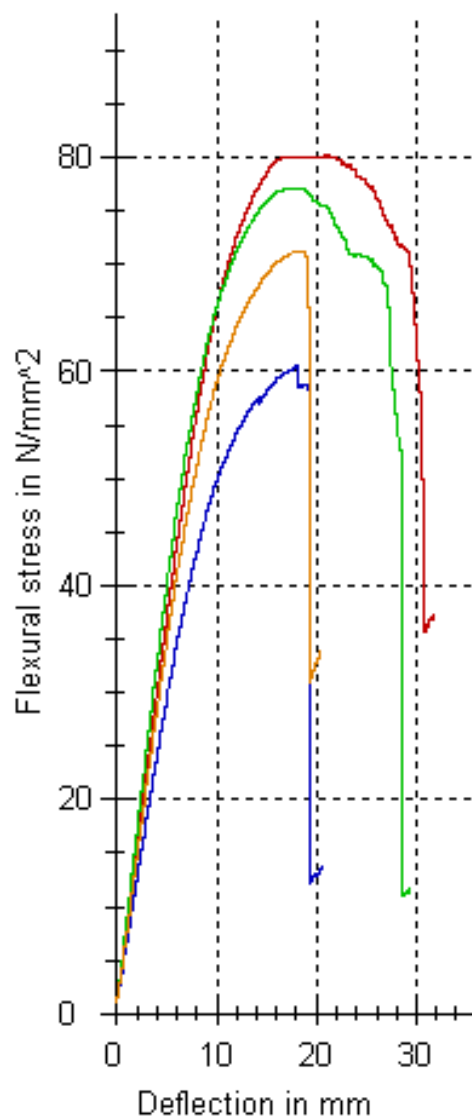
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F _{max} N	f _m N/mm ²	tBreak s	l mm	E _{m,app} N/mm ²
■	MUF+J 1	24,45	49,17	2827	72,1	69,80	500	12700
■	MUF+J 2	24,33	49,4	2839	72,8	67,92	500	13300
■	MUF+J 3	24,13	49,56	2703	70,3	68,02	500	12700
■	MUF+J 4	24,28	49,63	2886	74,0	66,50	500	13200

Series n = 4	t mm	b mm	F _{max} N	f _m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	24,3	49,44	2814	72,3	500	68,06	119,99
s	0,1325	0,2041	78	1,56	0,000	1,35	21,55
v	0,55	0,41	2,77	2,15	0,00	1,99	17,96



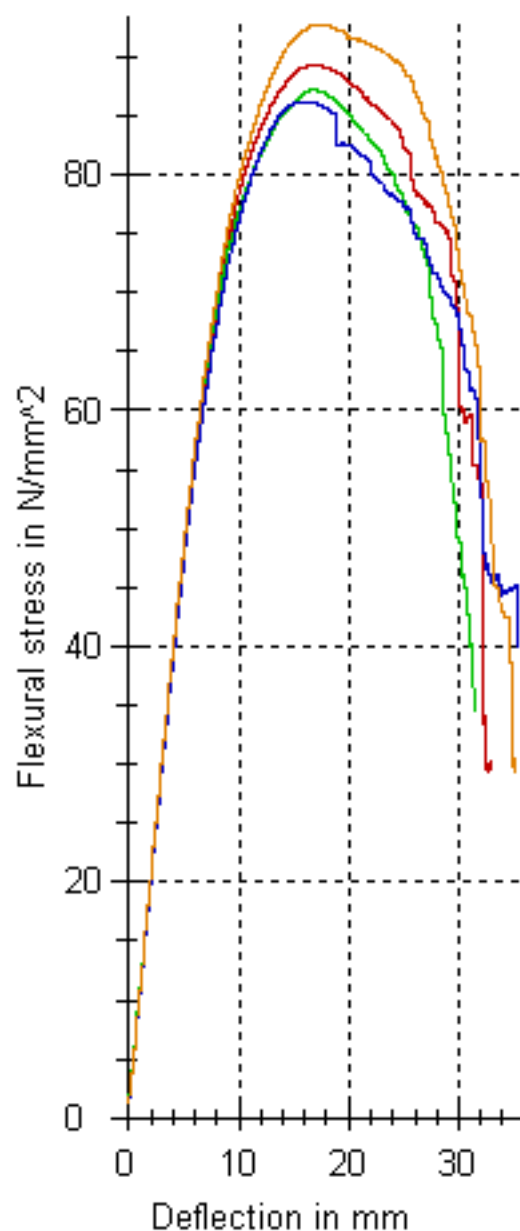
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
	MUF+O 1	24,59	49,57	3201	80,1	86,06	500	12400
	MUF+O 2	24,75	49,59	3123	77,1	71,70	500	13500
	MUF+O 3	24,63	49,71	2433	60,5	72,86	500	9830
	MUF+O 4	24,57	49,67	2850	71,3	75,04	500	11700

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	tTest s
$\bar{x}$	24,64	49,64	2902	72,3	500	76,41	104,21
s	0,08062	0,06608	347	8,64	0,000	6,58	23,14
v	0,33	0,13	11,95	11,96	0,00	8,61	22,21



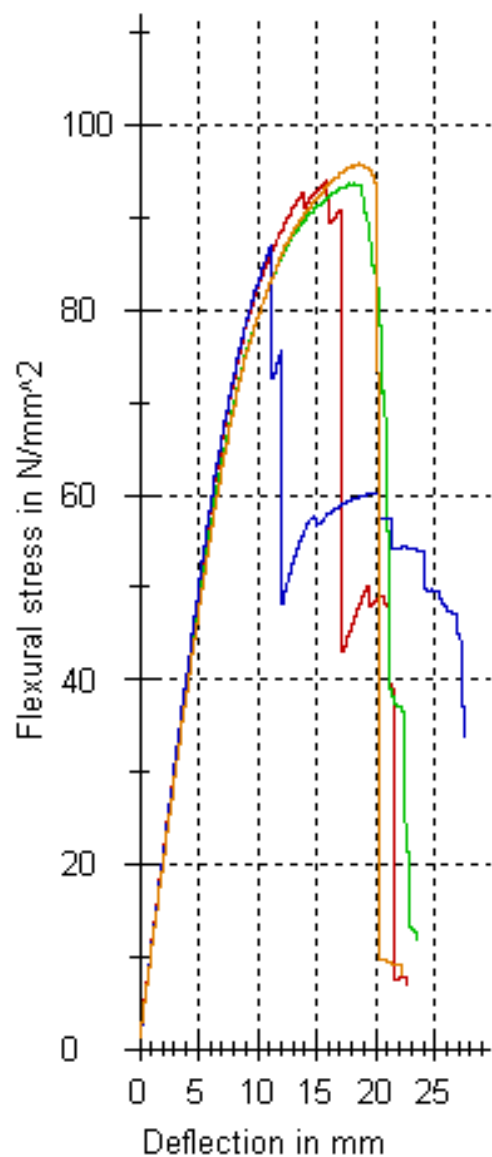
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
■	MUF+S 1	24,05	49,52	3408	89,2	69,48	500	16700
■	MUF+S 2	24,13	49,63	3358	87,2	67,98	500	16400
■	MUF+S 3	24,05	49,37	3281	86,2	66,04	500	16600
■	MUF+S 4	24,2	49,4	3575	92,7	69,70	500	16900

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	24,11	49,48	3406	88,8	500	68,30	144,53
s	0,07228	0,1192	124	2,87	0,000	1,69	16,35
v	0,30	0,24	3,65	3,24	0,00	2,47	11,31



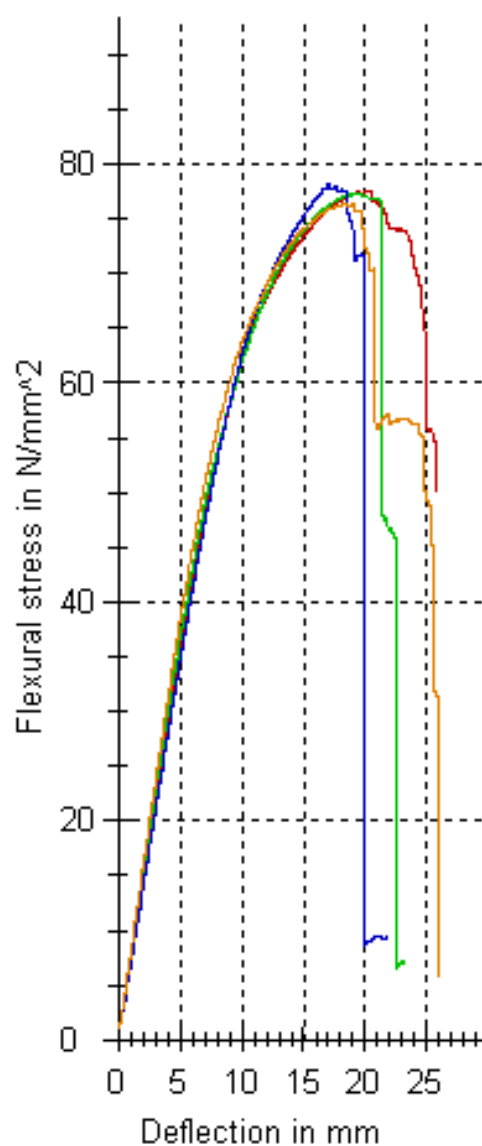
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
■	PUR 1	26,26	49,68	4293	94,0	64,24	500	15900
■	PUR2	25,89	49,9	4179	93,7	73,62	500	15600
■	PUR 3	25,84	49,78	3862	87,1	45,26	500	16200
■	PUR 4	26,09	49,71	4325	95,9	74,86	500	15200

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	26,02	49,77	4165	92,7	500	64,49	100,14
s	0,193	0,09777	211	3,81	0,000	13,67	10,40
v	0,74	0,20	5,07	4,11	0,00	21,20	10,38



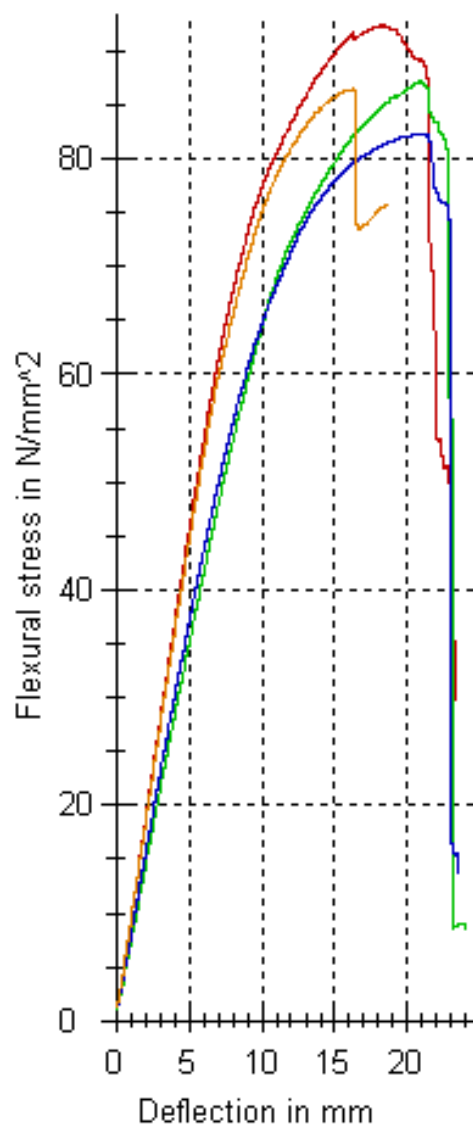
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
■	PUR+L 1	26,31	50	3578	77,5	78,64	500	11600
■	PUR+L 2	26,68	50,05	3666	77,2	76,82	500	11600
■	PUR+L 3	26,45	50,17	3660	78,2	69,10	500	10900
■	PUR+L 4	26,51	49,96	3573	76,3	74,20	500	12200

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{Test} s
$\bar{x}$	26,49	50,05	3619	77,3	500	74,69	100,46
s	0,1533	0,0911	51	0,785	0,000	4,15	9,90
v	0,58	0,18	1,40	1,02	0,00	5,55	9,85



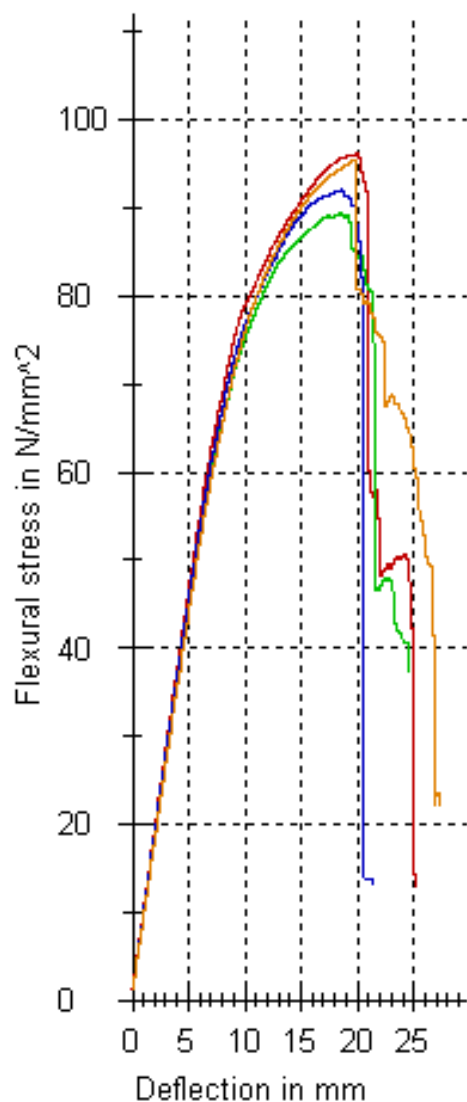
Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F _{max} N	f _m N/mm ²	tBreak s	l mm	E _{m,app} N/mm ²
■	PUR+J 1	24,5	49,95	3693	92,4	73,20	500	15600
■	PUR+J 2	24,48	49,93	3476	87,1	84,54	500	11900
■	PUR+J 3	24,68	50,04	3345	82,3	85,06	500	12600
■	PUR+J 4	24,47	49,53	3417	86,4	66,08	500	15200

Series n = 4	t mm	b mm	F _{max} N	f _m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	24,53	49,86	3483	87,1	500	77,22	91,99
s	0,09912	0,2268	150	4,14	0,000	9,23	10,94
v	0,40	0,45	4,31	4,75	0,00	11,95	11,89



Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
■	PUR+O 1	24,14	49,92	3733	96,2	80,98	500	16000
■	PUR+O 2	24,44	50,1	3569	89,4	74,64	500	15300
■	PUR+O 3	24,48	49,98	3676	92,1	74,70	500	15500
■	PUR+O 4	24,45	50,01	3806	95,5	79,72	500	14900

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	24,38	50	3696	93,3	500	77,51	101,14
s	0,1592	0,075	100	3,15	0,000	3,32	9,34
v	0,65	0,15	2,71	3,38	0,00	4,28	9,24



Legends	Specimen identifier	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	tBreak s	l mm	$E_{m,app}$ N/mm ²
■	PUR+S 1	24,75	50,02	3868	94,7	77,14	500	14800
■	PUR+S 2	24,55	49,85	3694	92,2	75,84	500	14600
■	PUR+S 3	24,7	49,89	3650	89,9	82,90	500	15500
■	PUR+S 4	24,83	49,93	3865	94,2	79,32	500	16000

Series n = 4	t mm	b mm	F_{max} N	f_m N/mm ²	l mm	tBreak s	t _{test} s
$\bar{x}$	24,71	49,92	3769	92,8	500	78,80	108,02
s	0,1179	0,07274	114	2,16	0,000	3,09	7,09
v	0,48	0,15	3,02	2,33	0,00	3,92	6,56

