

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Luka BOLTAR

MOŽNOST IZDELAVE LEPLJENEGA KOMPOZITA IZ BAMBUSA

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**POTENTIAL OF MAKING A GLUED BAMBOO-BASED
COMPOSITE**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2009

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo v laboratoriju Katedre za žagarstvo in lesna tvoriva Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenovalizr. prof. dr. Milana Šerneka, za recenzentko pa prof. dr. Katarino Čufar.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Luka BOLTAR

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*824.86
KG	bambus/lastnosti površine/lepljenje/kompozit
AV	BOLTAR, Luka
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ČUFAR, Katarina (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2009
IN	MOŽNOST IZDELAVE LEPLJENEGA KOMPOZITA IZ BAMBUSA
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	X, 71 str., 6 pregl., 28 sl., 8 pril., 37 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Raziskovali smo primernost bambusa <i>Phyllostachys vivax</i> za izdelavo lepljenih kompozitov. Bambus smo nabrali v zaselku Pristava pri Novi Gorici. Pretežen del raziskovalnega dela smo posvetili raziskovanju interakcije med lepilom in bambusom. Kakovost lepljenja smo ovrednotili z merjenjem kontaktnega kota, strižnim testom lepilnega spoja in merjenjem efektivne globine penetracije lepila. Kontaktni kot fenol-formaldehidnega (FF) lepila smo ugotavljali s tenziometrom po Wilhelmy-jevi metodi. Strižno trdnost FF lepilnega spoja smo ugotavljali po standardu SIST EN 302-1 (2004). Efektivno globino penetracije FF lepila smo izmerili s pomočjo mikroskopa in osebnega računalnika s programom Image-Pro Plus 6.0. Ugotovitve iz teh raziskav smo nato preverili pri izdelavi lepljenega kompozita iz bambusa, iz katerega smo izdelali preizkušance za ugotavljanje mehanskih lastnosti. Modul elastičnosti in upogibno trdnost smo določili z upogibnim testom po standardu SIST EN 310 (1993). Ugotovili smo, da so bili kontaktni koti FF lepila na sveže zbrušenih bambusovih površinah zelo visoki. V primerjavi z rezultati predhodnih testiranj uporabljenega lepila smo dosegli visoke strižne trdnosti lepilnega spoja. Efektivna penetracija FF lepila v bambus je bila zelo plitva. Izdelan lepljen kompozit, slojnata bambusova plošča, je izkazoval visok modul elastičnosti ter visoko upogibno trdnost. To pomeni, da lahko iz proučevanega bambusa s pomočjo FF lepila izdelamo kvaliteten lepljen kompozit.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn

DC UDC 630*824.86

CX bamboo/surface properties/gluing/composite

AU BOLTAR, Luka

AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ČUFAR, Katarina (reviewer)

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

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

PY 2009

TI POTENTIAL OF MAKING A GLUED BAMBOO-BASED COMPOSITE

DT Graduation Thesis (University studies)

NO X, 71 p., 6 tab., 28 fig., 8 ann., 37 ref.

LA sl

AL sl/en

AB We tried to define the suitability of the *Phyllostachys vivax* bamboo for the manufacture of laminated composites. The bamboo was gathered at Pristava near Nova Gorica. Thesis focusses on the interaction between the adhesive and the bamboo. The quality of gluing was evaluated by measuring the contact angle and the effective depth of the glue penetration and with a shear test of the adhesive joint. The contact angle of the phenol-formaldehyde (PF) adhesive was defined by means of tensiometer according to the Wilhelmy method. The shear strength of the PF adhesive joint was determined according to the SIST EN 302-1 (2004) standard. The effective penetration of the PF glue was measured by means of a microscope and a personal computer with the Image-Pro Plus 6.0 program. The findings of the research were then tested at the making of bamboo-based laminated composites that served as test pieces for determining mechanical properties. The module of elasticity and bending strength were defined with a bending test according to the SIST EN 310 (1993) standard. The contact angles of the PF adhesive on freshly-sanded bamboo surfaces were very high. Compared to results of the previously tested adhesive this adhesive joint reached higher shear strength. The effective penetration of the PF adhesive into the bamboo was very low. The laminated composite, a laminated bamboo board, showed a high module of elasticity and high bending strength, so making a high-quality laminated composite when glued with the PF adhesive.

KAZALO VSEBINE

str.

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	2
1.3 CILJI NALOGE	3
2 PREGLED OBJAV	4
2.1 BAMBUS	4
2.1.1 Taksonomija in prirodno okolje bambusa	4
2.1.2 Morfologija in rast bambusa	6
2.1.3 Anatomska zgradba bambusa	7
2.1.4 Kemična sestava bambusa	9
2.1.5 Fizikalne in mehanske lastnosti bambusa	10
2.2 LEPLJENI KOMPOZITI IZ BAMBUSA	11
2.2.1 Izdelki iz (debelejših) bambusovih trakov (Products made of bamboo strips)	13
2.2.1.1 Vezana bambusova plošča (Plybamboo)	13
2.2.1.2 Lamelirana bambusova plošča (Laminated bamboo board)	13
2.2.1.3 Lameliran bambusov pod (Laminated bamboo flooring)	14
2.2.1.4 Druge lamelirane bambusove plošče	15
2.2.2 Izdelki iz (tanjših) bambusovih trakov (Products made of bamboo strips)	16
2.2.2.1 Vezane plošče iz bambusovih rogoznic (Mat plybamboo)	16
2.2.2.2 Vezane plošče iz bambusovih zaves (Curtain plybamboo)	17
2.2.2.3 Lamelirana bambusova plošča iz tanjših trakov (Laminated bamboo of strips)	17
2.2.2.4 Vezane plošče iz bambusovih rogoznic in zaves (Mat-curtain plybamboo)	17
2.2.3 Plošče iz bambusovih iveri (Products made of bamboo chips)	18
2.2.3.1 Bambusova iverna plošča (Bamboo chipboard)	18
2.2.4 Bambusove plošče, narejene iz bambusa v kombinaciji z drugimi materiali	18
2.3 LEPILA ZA IZDELAVO KOMPOZITOV IZ BAMBUSA	19
2.4 SPREMLJANJE UTRJEVANJA LEPILA Z DIELEKTRIČNO ANALIZO	20
2.5 MERJENJE KONTAKTNEGA KOTA Z WILHELMY-EVO METODO	21
2.6 PREGLED RELEVANTNE LITERATURE	25
3 MATERIAL IN METODE	28

3.1	MATERIALI	28
3.1.1	Bambus: <i>Phyllostachys vivax</i>	28
3.1.2	Lepilo	29
3.2	METODE	30
3.2.1	Ugotavljanje kontaktnega kota	30
3.2.1.1	Izdelava preizkušancev	30
3.2.1.2	Ugotavljanje kontaktnega kota	31
3.2.2	Spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo	32
3.2.3	Strižna trdnost lepilnega spoja	34
3.2.3.1	Priprava preizkušancev	34
3.2.3.2	Testiranje preizkušancev	37
3.2.4	Globina penetracije lepila	38
3.2.4.1	Izdelava preparatov	38
3.2.4.2	Slikanje – snemanje preparatov	39
3.2.4.3	Merjenje globine penetracije lepila	39
3.2.5	Slojната bambusova plošča	41
3.2.5.1	Izdelava slojнate bambusove plošče	41
3.2.5.2	Ugotavljanje upogibne trdnosti slojнate bambusove plošče	43
4	REZULTATI.....	46
4.1	KONTAKTNI KOT	46
4.2	SPREMLJANJE UTRJEVANJA LEPILA Z DIELEKTRIČNO ANALIZO	47
4.3	STRIŽNA TRDNOST LEPILNEGA SPOJA	49
4.4	GLOBINA PENETRACIJE FF LEPILA	52
4.5	SLOJNATA BAMBUSOVA PLOŠČA	54
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	55
5.1	KONTAKTNI KOT	55
5.2	SPREMLJANJE UTRJEVANJA LEPILA Z DIELEKTRIČNO ANALIZO	56
5.3	STRIŽNA TRDNOST LEPILNEGA SPOJA	57
5.4	GLOBINA PENETRACIJE FF LEPILA	59
5.5	SLOJNATA BAMBUSOVA PLOŠČA	61
5.6	SKLEPI	63
6	POVZETEK.....	65
7	VIRI	67

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Rezultati kontaktnih kotov [$^{\circ}$] FF lepila in vode na površinah iz različnih plasti stebela bambusa (N=30).....	46
Preglednica 2: Statistični parametri za strižno trdnost lepilnega spoja (f_v [N/mm ²]) in delež loma po bambusu (D. l. b. [%]) glede na plasti stebela v lepilnem spoju ter glede na preizkusni razred (N=60).....	50
Preglednica 3: T-testi razlik strižne trdnosti lepilnega spoja (T-test _{f_v}) in deleža loma po bambusu (T-test _{D.l.b.}).....	52
Preglednica 4: Statistični parametri za globino penetracije [μ m] glede na plasti stebela bambusa v lepilnem spoju (N=30).....	53
Preglednica 5: T-testi razlik v globini penetracije FF lepila med različnimi skupinami preizkušancev glede na plasti stebela bambusa v lepilnem spoju.....	53
Preglednica 6: Modul elastičnosti (E_m [N/mm ²]), upogibna trdnost (f_m [N/mm ²]), gostota (δ [kg/m ³]) ter statistični parametri šestih lamel, izžaganih iz slojnatih bambusovih plošč.....	54

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Bambus <i>Phyllostachys vivax</i> v parku na Pristavi pri Novi Gorici.....	5
Slika 2: Koreninski sistem bambusa: simpodialni (A), monopodialni (B)	6
Slika 3: Preparat prečnega prereza stebela bambusa pri 4-kratni povečavi: prevodno tkivo (A), celice spremljevalke in vlakna (B), osnovno parenhimsko tkivo (C).....	8
Slika 4: Lepljeni nosilci iz bambusa	12
Slika 5: Shematični prikaz izdelovanja lamel iz bambusovega stebela.....	14
Slika 6: Lamelirani bambusovi plošči: na površini samo tangencialne ploskve lamel (A), na površini so samo radialne ploskve lamel (B)	14
Slika 7: Lameliran bambusov pod	15
Slika 8: Lamelirane bambusove plošče.....	15
Slika 9: Površina vezane plošče iz bambusovih rogoznic	16
Slika 10: Zavesa iz bambusa (Qisheng, 2007).....	17
Slika 11: Naprave in oprema za spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo v vroči stiskalnici.....	21
Slika 12: Kontaktni kot tekočine na površini.....	22
Slika 13: Shematski prikaz Wilhelmy-eve metode	23
Slika 14: Shematski prikaz merjenja kontaktnega kota (A), grafični prikaz sile v odvisnosti od globine potopitve (B)	24
Slika 15: Pripomočki in način izdelave ploščic: deščica iz bambusa dimenzije 15×10×5 mm (A), držalo ter način izdelovanja ploščic (B), oženje ploščic (C).....	30
Slika 16: Potek izdelave preizkušancev za strižni test lepilnega spoja: odstranjevanje povrhnjice (1), prečno žaganje kolenc (2), vzdolžno žaganje medkolenčij (3), poravnavanje koritave površine lamel (4), poravnavanje ene stranice lamel (5), vzdolžno robljenje lamel (6), ravnanje površine lamel z obžagovanjem (7), tanjšanje lamel z obžagovanjem (8), sušenje in klimatiziranje lamel (9), skobljanje lamel v šablona (10), brušenje lamel (11), lepljenje lamel (12), robljenje preizkušancev (13), žaganje	

preizkušancev na enotno dolžino (14), žaganje zarez (15), izdelan preizkušane (16).....	35
Slika 17: Oblika in dimenzije preizkušancev za ugotavljanje trdnosti lepilnega spoja pri vzdolžno natezno strižni obremenitvi	37
Slika 18: Tehnološki postopek izdelave slojnate bambusove plošče: stiskanje bambusovih stebel (1), skobljanje bambusovih trakov (2), sušenje in klimatiziranje trakov (3), zlaganje trakov v kalup in nanašanje lepila (4), stiskanje plošče (5), skobljanje neobdelane bambusove plošče (6), olupljeno bambusovo steblo (A), neobdelan bambusov trak (B), obojestransko poskobljan trak (C), obojestransko poskobljan trak z vlažnostjo 8 % (D), neobdelana bambusova slojnata plošča (E), obdelana bambusova slojnata plošča (F)	42
Slika 19: Povprečne vrednosti kontaktnih kotov [°] FF lepila in destilirane vode na površinah iz različnih plasti stebela bambusa	47
Slika 20: Prevodnost (G [S]) FF lepila v lepilnem spoju v odvisnosti od časa utrjevanja	48
Slika 21: Stopnja utrjenosti (α) FF lepila v lepilnem spoju in temperatura (T [°C]) v lepilnem spoju v odvisnosti od časa utrjevanja	48
Slika 22: Povprečna strižna trdnost FF lepilnih spojev, v katerih so bile lepilne ploskve iz različnih plasti bambusa, za preizkusna razreda A1 in A5 po standardu SIST EN 302-1	51
Slika 23: Površina iz zunanjih plasti stebela bambusa (A), površina iz notranjih plasti stebela bambusa (B)	57
Slika 24: Povprečna globina efektivne penetracije (EP [μm]) FF lepila v različne plasti stebela bambusa	59
Slika 25: Preparata narejena iz prečnega preseka lepljenca pri 4-kratni povečavi: lepilni spoj iz zunanjih plasti stebela bambusa (A), lepilni spoj iz notranjih plasti stebela bambusa (B).....	60
Slika 26: Slojnata bambusova plošča.....	61
Slika 27: Upogibna trdnost (f_v [N/mm ²]) (A) ter modul elastičnosti (E_m [N/mm ²]) (B) za nekatere lepljene kompozite iz lesa in bambusa.....	61
Slika 28: Polovice bambusovega stebela pred (levo) in po (desno) segrevanju in sploščevanju v pečici (A), kos bambusovega stebela kvadratne oblike (B), polovice bambusovega stebela po segrevanju in sploščevanju v vrelem olju (C).....	62

KAZALO PRILOG

- Priloga A1:** Dimenzije vzorcev (a, b, d), površinska napetost (γ) FF lepila ter kontaktni kot (θ) FF lepila na površini iz notranjih plasti bambusa
- Priloga A2:** Dimenzije vzorcev (a,b,d), površinska napetost (γ) FF lepila ter kontaktni kot (θ) FF lepila na površini iz zunanjih plasti bambusa
- Priloga A3:** Dimenzije vzorcev (a, b, d), površinska napetost (γ) vode ter kontaktni kot (θ) vode na površini iz notranjih plasti bambusa
- Priloga A4:** Dimenzije vzorcev (a, b, d), površinska napetost (γ) vode in kontaktni kot (θ) vode na površini iz zunanjih plasti bambusa
- Priloga B1:** Dimenzije strižne ravnine (b in l_2), maksimalna sila ($F_{\max}$), strižna trdnost (f_v) in delež loma po bambusu (D.l.b); preizkušanci pripravljeni po navodilih za preizkusni razred A1 standarda SIST EN 302-1
- Priloga B2:** Dimenzije strižne ravnine (b in l_2), maksimalna sila ($F_{\max}$), strižna trdnost (f_v) in delež loma po bambusu (D.l.b); preizkušanci pripravljeni po navodilih za preizkusni razred A5 standarda SIST EN 302-1
- Priloga C1:** Globina penetracije za različne skupine vzorcev (oznake zn, z, n se nanašajo na plasti stebela v lepilnem spoju: zn zunanje-notranje, z zunanje-zunanje, n notranje-notranje)
- Priloga D1:** Parametri za izračun modula elastičnosti in upogibne trdnosti ter čas pri katerem je prišlo do loma preizkušanca

1 UVOD

Bambusovke so zelo razširjene zimzelene rastline iz družine trav (*Gramineae*). Posebnost bambusa je votlo, olesenelo in vlaknato steblo. Steblo je okrepljeno z močnimi prečnimi kolenci, ki ga zapirajo v razmeroma kratkih intervalih. V kolencu je notranji prekat, septum, ki loči dve votlini, povezuje zunanje stene ter krepí in ločuje steblo v »oddelke«. Steblo bambusov se oskrbuje izključno preko korenike in raste izjemno hitro. Bambusi svojo maksimalno višino dosežejo približno v enem letu, v naslednjih letih pa pridobivajo trdnost (Koprivec in Zbašnik-Senegačnik, 2006).

Avtohtona rastišča bambusa se razprostirajo od 51 ° severne do 47 ° južne zemljepisne širine. Samonikla rastišča bambusa so na vseh kontinentih, razen v Evropi (Koprivec in Zbašnik-Senegačnik, 2006).

V Evropi se je pojem bambusa prvič pojavil leta 552 n. š. Takrat so menihi v bambusovih palicah pretihotapili jajčeca sviloprežke iz Kitajske v Carigrad. Leta 1626 je nemški botanik G. E. Rumpf objavil sedem zvezkov z naslovom »Herbarium Amboinense«, kjer je opisal 24 vrst »cevastih dreves« in njihovo uporabo. Leta 1778 je švedski naravoslovec C. Linne v znanost prvič vpeljal opis bambusa. Thomas A. Edison je leta 1880 pospešil razvoj električne žarnice z ogleno nitko, narejeno iz bambusovega vlakna (Koprivec in Zbašnik-Senegačnik, 2006).

Bambus se že tisočletja vsakodnevno uporablja na vseh kontinentih, razen v Evropi. Njegova uporaba je zelo raznovrstna. Bambusovi vršički so kulinarična specialiteta. Iz soka, ki se cedi iz stebela, varijo žganje in pivo. Bambusove palice uporabljajo za različne ročaje, pri gradnji hiš, paviljonov, mostov, gradbenih odrov. Iz bambusovih vlaken pletejo vrvi. Bambusova vlakna v kombinaciji z bombažem uporabljajo za izdelovanje tkanin. V Aziji, Afriki in Latinski Ameriki bambus postaja predvsem zaradi industrije kompozitnih plošč ena od pomembnejših gozdnih surovin (Zheng, 2002).

Različni izdelki iz bambusa se uporabljajo pri izdelavi montažnih hiš, v pohištveni industriji, za izdelavo embalaže, v avtomobilski industriji in še na drugih področjih. Z

razvojem napredne procesne tehnologije se je tudi pomen bambusa spremenil. Dandanes iz bambusa ne izdelujejo samo preprostih kompozitov, ampak tudi kompozite z velikimi trdnostmi in visoko dodano vrednostjo (Zheng, 2002).

Bambus je v Evropi kot okrasna rastlina razširjen že približno 150 let. Veliko izdelkov iz bambusa na evropsko tržišče uvozijo iz Azije. Širše gojenje bambusa za industrijsko uporabo v Evropi preprečuje veliko neznank. Premalo vemo, kako bi se vrste bambusa, ki dobro uspevajo v parkih in botaničnih vrtovih v Evropi, obnesle na obdelovalnih površinah. Raziskati bi morali za evropske razmere primeren in rentabilen način gospodarjenja z bambusovimi nasadi. Po svetu veliko dela v bambusovih nasadih opravijo ročno. To v Evropi zaradi drage delovne sile ne pride v poštev. Pojavlja se tudi vprašanje, kako bi se evropska lesna industrija hitro in brez prevelikih vložkov prilagodila na novo surovino (Gielis, 2001).

V okolici Nove Gorice, na Šempetrskem polju, Biljenskih gričih in bregovih spodnjega toka Vipave je kar nekaj rastišč bambusa. Tradicionalna uporaba bambusa v tem okolju ni prav široka. Uporabljajo ga predvsem kot oporne palice za različne rastline na poljih in vrtovih ter za ročaje orodij.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

V Evropi in Sloveniji izdelava lepljenih kompozitov iz bambusa še ni razširjena. Bambus je lahko surovina za izdelavo različnih lepljenih kompozitov. V okolici Nove Gorice je več rastišč bambusa. Zanima nas, ali je ta bambus primeren za izdelavo lepljenih kompozitov.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da je penetracija lepila v zunanjo plast bambusa težavna, ker je le ta močno zaščitena pred zunanjimi vplivi. Lepilo v bambus slabše penetrira tudi zaradi minimalne tangencialne in radialne prevodnosti celičnih elementov te rastline. Poleg slabe penetracije lepila imamo pri izdelavi kompozitov iz bambusa težave zaradi votle sredice, ki povzroča majhen izkoristek glede na premer stebila. Izdelava kompozitov iz bambusa, ki raste pri nas, je otežena zaradi relativno majhnih premerov stebila.

1.3 CILJI NALOGE

V diplomski nalogi želimo raziskati možnosti izdelave lepljenega kompozita iz bambusa, ki se nahaja na območju zaselka Pristava pri Novi Gorici. Posebno pozornost bomo posvetili interakciji lepila z bambusom. Izmerili bomo kontaktni kot fenol-formaldehidnega lepila na sveže zbrušeni površini bambusa, strižno trdnost lepilnega spoja ter izračunali efektivno penetracijo omenjenega lepila v bambus. Rezultate bomo ovrednotili in primerjali z rezultati za druge vrste bambusa in nekatere lesne vrste. Pridobljene rezultate bomo uporabili pri izdelavi lepljenega kompozita iz bambusa. Izdelanemu kompozitu bomo izmerili upogibno trdnost in glede na rezultate ocenili njegovo kvaliteto ter možnost uporabe.

2 PREGLED OBJAV

2.1 BAMBUS

2.1.1 Taksonomija in prirodno okolje bambusa

Bambus je visoka trava trajnica z olesenelim stblom. Botanično ga uvrščamo v kraljestvo rastlin (*Plantay*), oddelek semenk (*Spermatophyta*), pododdelek kritosemenk (*Magnoliophytina*) in v razred enokaličnic (*Monocotyledoneae*) (Čufar, 2006). To travnico nadaljnjo uvrščamo v red travovcev (*Poales*), v družino trav (*Gramineae*) in v poddružino *Bambusoideae*. Poddružina *Bambusoideae* ima od 60 do 70 rodov in od 1200 do 1500 vrst na svetu. Polovica vseh vrst bambusa raste v Aziji (Ahmad in Kamke, 2000).

Večina bambusov uspeva v topli, zelo vlažni klimi in v plodni zemlji. Nekatere vrste uspevajo v ekstremno mrzlih življenjski okoljih, s temperaturami pod -20 °C. Bambus dobro uspeva v tropskem in subtropskem podnebju. Nekatere vrste uspevajo tudi v podnebnih razmerah Japonske, Kitajske, Čila, ZDA in Evrope (Ahmad in Kamke, 2000).

Bambus je zelo prilagodljiva rastlina, zato lahko uspeva v zelo različnih življenjskih okoljih. Raste na skoraj vseh vrstah prsti, razen na izjemno bazičnih, puščavskih in močvirnih tleh. Bambus uspeva vse od priobalnih območij do nadmorske višine 3000 m (Ahmad in Kamke 2000).

Izjemni raznovrstnosti in prilagodljivosti bambusa se lahko zahvalimo, da so se nekatere vrste dobro obnesle tudi v ZDA, Južni, Zahodni in Srednji Evropi, kjer bambus izvorno ni prisoten (Ahmad in Kamke, 2000).

V diplomski nalogi smo uporabili bambus *Phyllostachys vivax* (slika 1) iz rodu *Phyllostachys*. Domovina rodu *Phyllostachys* je Kitajska. Dandanes srečamo vrste iz rodu *Phyllostachys* v azijskih državah, ki mejijo na Kitajsko, v Evropi, Južni ter Severni

Ameriki. Te vrste bambusa zunaj vzhodne Azije gojijo predvsem kot okrasno rastlino. Bambusi *Phyllostachys* imajo na Kitajskem velik gospodarski pomen. Uporabljajo jih v gradbeništvu, papirni, pohištveni in prehrabeni industriji ter kot okrasne rastline (Zhengping in Stapleton, 1995).



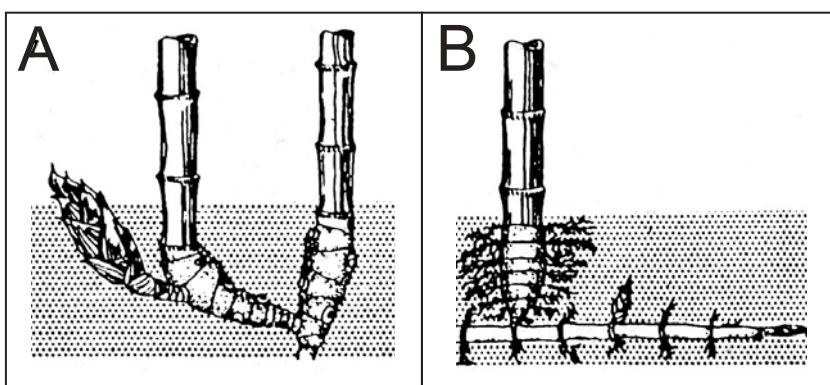
Slika 1: Bambus *Phyllostachys vivax* v parku na Pristavi pri Novi Gorici

Phyllostachys vivax je endemičen v vzhodnih kitajskih pokrajinah Jiangsu in Zhejiang. Rastlina uspeva na peščeni ali ilovnati zemlji ter potrebuje kislo, bazično ali nevtralno prst. Za dobro rast potrebuje prst, ki je vlažna ter bogata s hranili. V rastni dobi potrebuje veliko vlage. Rastišče mora biti v zavetrnih predelih. To vrsto bambusa bolj prizadenejo dolge zmrzali kot pa nizke temperature. Odporna je celo na temperature pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (McClure, 1995).

Phyllostachys vivax gojijo za pridelavo poganjkov, ki so zelo okusni. Iz njegovih stebel izdelujejo razne pletene predmete. Stebla uporabljajo tudi za ročaje raznih kmetijskih orodij. Ta bambus sadijo tudi kot okrasno rastlino (Zhengping in Stapleton, 1995).

2.1.2 Morfologija in rast bambusa

Bambus ima z morfološkega vidika dva glavna dela, koreninski sistem in steblo. Koreninski sistem tvorijo rizomi. Rizom je delno ali v celoti podzemno steblo, iz katerega izraščajo korenine. Pri bambusu se pojavljata dve glavni vrsti rizomov (slika 2), monopodialni in simpodialni (Ahmad in Kamke, 2000).



Slika 2: Koreninski sistem bambusa: simpodialni (A), monopodialni (B) (Dunkelberg, 2000)

Z vidika lesarstva in izdelave kompozitov iz bambusa je bolj zanimiv nadzemljski del te rastline – steblo. Steblo predstavlja največji delež mase rastline (Ahmad in Kamke, 2000).

Ahmad in Kamke (2000) navajata, da znašajo premeri stebel bambusa od 6 mm pa do 300 mm, njihove višine pa od 0,30 m do 36,5 m.

Stebila bambusa so ponavadi prekrita s togim epidermom (povrhnjico), ki je prekrit z voski ter včasih vsebuje silikate. Iz stebel rastejo veje, na katerih so pritrjeni suličasti listi. Na vejah so cvetovi, sadeži in semena. Vrste bambusa se med seboj razlikujejo po zgradbi stebila. Vsem je skupno, da imajo striktno vzdolžno rast, z rahlo ukrivljenim vrhom (Ahmad in Kamke, 2000).

Bambus je hitro rastoča vrsta. V dobrih pogojih lahko doseže maksimalno višino v štirih do šestih mesecih, z dnevnim prirastkom od 15 cm do 18 cm. Z opazovanjem nekaterih

hitro rastočih vrst so ugotovili, da znaša njihov maksimalni dnevni prirastek okrog 40 cm (Ahmad in Kamke, 2000).

Bambus doseže svojo zrelost v dveh do šestih letih, odvisno od vrste. Z dobrim upravljanjem nasada lahko dosežemo triletni cikel sečnje (Ahmad in Kamke, 2000).

V opisu *Phyllostachys vivax* Zhengping in Stapleton (1995) navajata, da stebila tega bambusa dosežejo višino od 5 m do 15 m. Premeri stebel znašajo od 4 cm do 6 cm. Stebila imajo rahlo ukrivljen ali viseč vrh. Barva odraslih stebel oziroma medkolenčij sega od zeleno-rumene do sive. Dolžina medkolenčij znaša od 25 do 35 cm. Kolenca so ponavadi dvoredna in asimetrična. Iz stebila izraščata po dve veji skupaj, ena glavna in ena stranska. Iz terminalne veje rastejo dva ali trije listi. Listi so temno zelene barve, rahlo upognjeni in asimetrični, njihova dolžina znaša od 90 mm do 180 mm, širina pa od 12 mm do 20 mm.

2.1.3 Anatomska zgradba bambusa

Anatomska zgradba bambusovega stebila neposredno vpliva na njegove lastnosti. Bambusi so visoke trave in za razliko od dreves proizvajajo samo primarne poganjke, brez kambija sekundarne rasti. Razlike med 75 rodovi in približno 1250 vrstami so majhne ter niso tako očitne v primerjavi z veliko strukturno raznolikostjo nad 20000 drevesnih vrst. Razlike v anatomski strukturi tkiva so prisotne v stebilih različnih vrst ter tudi vzdolž stebila iste vrste (Liese, 1998).

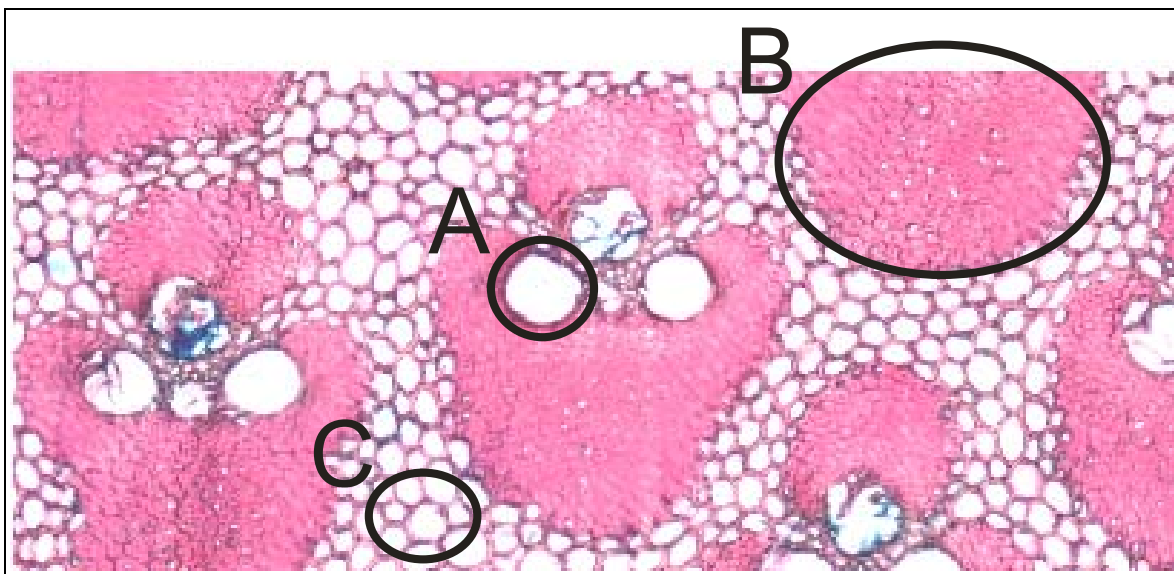
V medkolenčjih so celična tkiva usmerjena strogo aksialno. Med njimi ni nobenih prečnih povezav, kot so na primer trakovi pri drevesih. Zaradi tega je prečno pretakanje hranilnih snovi ter vode zelo oteženo, oziroma je omogočeno le v kolencih (Liese, 1998).

Zunanji obod bambusovega stebila obdaja primarna skorja, katere glavna naloga je preprečevanje vdora vode v notranje tkivo ter varovanje notranjega tkiva pred drugimi zunanjimi dejavniki. Primarno krovno tkivo, ki tvori zunanjo plast primarne skorje, je sestavljeno iz aksialno razpotegnjenih celic, krajših plutastih in kremenastih celic. Med

celicami primarnega krovnega tkiva so reže, stomate, za izmenjavo plinov. Celice krovnega tkiva so na zunanji strani pogosto prekrite s kutinastim slojem iz celuloze in pektinov. Na zunanji strani celic primarnega krovnega tkiva se pogosto pojavlja neenakomerno porazdeljen voskast sloj v obliki ploščic, paličic ali zrn (Liese, 1998).

Med rastjo stebela se počasi razvija prazen prostor v njegovi notranjosti, imenovan lacuna. Najbolj notranji sloj stebela sestavlja neprevodno tkivo iz parenhimskih celic, ki so pogosto zelo odebeljene, sklerificirane (Liese, 1998).

Na mikroskopskem preparatu na sliki 3 lahko vidimo sestavo bambusovega tkiva. Osnovno tkivo bambusovega stebela tvorijo parenhimske celice med katere je razporejeno prevodno tkivo. Parenhimske celice so v glavnem tankostene in med seboj povezane s številnimi enostavnimi piknjami. Prevodno tkivo je sestavljeno iz metaksilemskih trahej in sitastih cevi, ki jih obdajajo celice spremljevalke ter vlakna. Prevodno tkivo bambusa obdano s temnimi celicami spremljevalkami in vlakni se na mikroskopskem preparatu jasno loči od svetlejšega parenhimskega tkiva (Liese, 1998).



Slika 3: Preparat prečnega prereza stebela bambusa pri 4-kratni povečavi: prevodno tkivo (A), celice spremljevalke in vlakna (B), osnovno parenhimsko tkivo (C)

V povprečju je v steblu približno 52 % parenhimskih celic, 40 % vlaken in 8 % prevodnega tkiva. Delež posameznih celičnih elementov v steblih različnih vrst bambusa se zaradi razlik v debelini stene stebla, tipih prevodnega tkiva in obliki skupkov vlaken spreminja. V steblu iste vrste bambusa obstajajo razlike v deležih in oblikah posameznih celičnih elementov. V prečnem preseku stebla lahko opazimo, da je delež celic prevodnega tkiva na zunanji strani večji kot na notranji strani, na zunanji strani imajo celice prevodnega tkiva manjši premer kot na notranji strani. Stene bambusovega stebla se proti vrhu začnejo tanjšati, zato se z višino spreminja tudi oblika in delež celic prevodnega tkiva. Z višino stebla se število celic prevodnega tkiva zmanjša, njihov delež v steblu pa poveča. Delež parenhimskih celic se v prečnem preseku stebla spreminja, povečuje se iz zunanje strani proti notranji. Z višino stebla se zmanjšuje delež parenhima v njem. Vrhnji del stebla vsebuje večji delež vlaken kot parenhimskih celic, v spodnjem delu stebla je ravno obratno (Liese, 1998).

2.1.4 Kemična sestava bambusa

Kemična sestava bambusa je precej podobna kemični sestavi lesa. Glavne kemijske komponente bambusa so celuloza, hemiceluloze in lignin, ki zavzemajo več kot 90 % celotne mase bambusa. V sledeh se v bambusu pojavljajo še smole, voski, tanini in anorganske snovi. V primerjavi z lesom ima bambus večjo vsebnost alkalnih ekstraktivov ter neorganskih vključkov (Xiaobo, 2004).

Bambus vsebuje poleg celuloze in lignina tudi druge organske komponente. V bambusu so zaznali 2-6 % škroba, 2 % deoksidiranih saharidov, 2-4 % maščob in 0,8-6 % proteinov. Vsebnost ogljikovih hidratov v bambusu pomembno vpliva na trajnost in življenjsko dobo bambusa (Xiaobo, 2004).

Odpornost bambusa proti plesnim, napadu gliv in insektov je zelo odvisna od njegove kemične sestave. Bambus je zelo dovzeten za napad gliv in insektov. Naravna trajnost bambusa je od enega do 36 mesecev, odvisno od vrste in rastišča. Večja vsebnost škroba naredi bambus bolj občutljiv na plesni, napad gliv in insektov. Bambus se razkaja

počasneje, če je v njem prisotna večja količina benzen-etanolovih ekstraktivov (Xiaobo, 2004).

V bambusu so prisotni tudi neorganski vključki, to so anorganski minerali, predvsem silikati, kalcij in kalij ter mangan in magnezij. Vsebnost silikatov je največja v epidermu. Bambus je težko impregnirati, ker steblo obdaja tog epiderm prekritim z voskom (Xiaobo, 2004).

Kemična sestava bambusa se spreminja glede na njegovo starost, pozicijo in plast v steblu. Yusoff et al. (1992, cit. po Xiaobo, 2004) so proučevali kemično sestavo enoletnega, dvoletnega in triletnega bambusa (*Gigantochloa scortechinii*). Ugotovili so, da se vsebnost holoceluloze ni bistveno spreminjala glede na starost bambusa. Vsebnost alfa celuloze, lignina, ekstraktivov, neorganskih vključkov in pentozanov se je povečevala s starostjo bambusa.

2.1.5 Fizikalne in mehanske lastnosti bambusa

Mehanske in fizikalne lastnosti bambusovega stebela so povezane z njegovo anatomsko strukturo (Liese, 1998). Odvisne so od številnih dejavnikov, kot so vrsta bambusa, rastišče in njegova klima, gospodarjenje v nasadu, način sečnje, starost, gostota bambusa, vsebnost vlage, lokacija v steblu ter biodegradacija (Ahmad in Kamke, 2000).

Večji del mehanskih lastnosti bambusovega stebela je odvisnih od njegove gostote, ki je od 500 kg/m^3 do 900 kg/m^3 . Gostota je odvisna od količine vlaken v steblu, od njihovega premera ter od debeline celične stene. Navedene količine, od katerih je odvisna gostota, se spreminjajo glede na položaj v steblu, vrsto in starost bambusa. S starostjo stebela se povečuje debelina celične stene vlaken. Porast debeline celične stene vlaken povzroči povečanje gostote bambusa, ki se najbolj povečuje do tretjega leta starosti. V zunanjem delu stebela je količina vlaken večja, zato ima ta del večjo gostoto kot njegova notranjost. Gostota bambusa se povečuje tudi vzdolž stebela od spodaj navzgor. V spodnjem delu

stebila je celična stena tanjša, število celic prevodnega tkiva je večje, kar prispeva k manjši gostoti (Liese, 1998).

Krčenje bambusa je odvisno od zrelosti vlaken in koncentracije prevodnih elementov. Starejša stebila so bolj dimenzijsko stabilna kot mlajša. Vrh stebila bambusa, z večjim deležem celic prevodnega tkiva in manjšo vlažnostjo, ima večji radialni in tangencialni skrčec. Kolenca zelo vplivajo na mehansko trdnost bambusa. Imajo namreč večjo gostoto, manjše skrčke ter manjšo natezno trdnost v primerjavi z medkolenčji (Liese, 1998). Latif et al. (1993, cit. po Ahmad in Kamke, 2000) navajajo, da so tangencialni skrčki pri bambusu *B. Blumeana* znašali od 6,4 % do 20,1 %, radialni pa od 5,4 % do 9,5 %. Tewari (1992, cit. po Ahmad in Kamke, 2000) navaja, da se tangencialno in radialno krčenje prične takoj, ko bambus začne izgubljati vlažnost. Obnašanje lesa je namreč drugačno, saj se les začne krčiti šele, ko njegova vlažnost pade pod vlažnost točke nasičenja celičnih sten.

Modul elastičnosti in tlačna trdnost bambusa se povečujeta z dolžino vlaken. Večja debelina celičnih sten vlaken prispeva k povečanju tlačne trdnosti vzporedno z vlakni ter modula elastičnosti, zmanjšuje pa porušitveno trdnost (Liese, 1998). Xiaobo (2004) navaja, da je povprečna upogbna trdnost 5 let starega bambusa *Phyllostachys pubescens* znašala 184,8 MPa, povprečen modul elastičnosti pa 13293 MPa.

2.2 LEPLJENI KOMPOZITI IZ BAMBUSA

V začetku šestdesetih let prejšnjega stoletja so številni znanstveniki začeli raziskovati možnosti izdelave lepljenih kompozitov iz bambusa. To so povečini plošče, narejene iz mehansko in v določenih primerih tudi kemično predelanega bambusa (Qisheng in sod., 2001). Kasneje so začeli izdelovati kompozite drugačnih oblik, na primer lepljenih nosilcev (slika 4) in raznih podpornih stebrov. V zadnjem času je ves razvoj usmerjen v kompozite iz bambusa v kombinaciji z drugimi narvanimi ali sintetičnimi materiali.



Slika 4: Lepljeni nosilci iz bambusa (Stamm, 2002)

V petdesetih letih so razvili več tipov bambusovih kompozitnih plošč, od katerih jih je danes v širši uporabi približno dvajset. Qisheng in sod. (2001) bambusove kompozitne plošče razvrščajo na tri načine: glede na tehnološki postopek izdelave, glede na obliko ter glede na končno uporabo. Glede na tehnološki postopek izdelave ločijo plošče iz debelejših ali tanjših bambusovih trakov, iverne plošče ter kompozitne plošče iz bambusa v kombinaciji z drugimi materiali. Glede na obliko bambusovih kompozitnih plošč ločijo med vezanimi bambusovimi ploščami, lameliranimi bambusovimi ploščami iz trakov, ploščami iz iveri ter med kompozitnimi ploščami iz bambusa v kombinaciji z drugimi materiali. Glede na končno uporabo bambusove kompozitne plošče razvrščajo v naslednje skupine: vezane bambusove plošče za avtomobilsko industrijo, bambusove talne obloge ter bambusove kompozitne plošče, ki se uporabljajo v pohištveni industriji.

Debeline bambusovih kompozitnih plošč v grobem znašajo od 2 mm do 40 mm. Njihove dimenzije lahko prilagajamo glede na tehnološke zmožnosti in zahteve kupcev.

V nadaljevanju so opisane nekatere bambusove kompozitne plošče. Razvrščene so glede na tehnološki postopek izdelave. Slovenskih izrazov za bambusove kompozitne plošče v večini primerov še ni. Zraven dobesednih prevodov v slovenščino so navedeni tudi angleški izrazi, ki jih navajajo Qisheng in sod. (2001). Terminologija na področju lepljenih kompozitov iz bambusa ni natančno opredeljena, zato obstaja precejšnja verjetnost, da so plošče poimenovane tudi drugače.

2.2.1 Izdelki iz (debelejših) bambusovih trakov (Products made of bamboo strips)

2.2.1.1 Vezana bambusova plošča (Plybamboo)

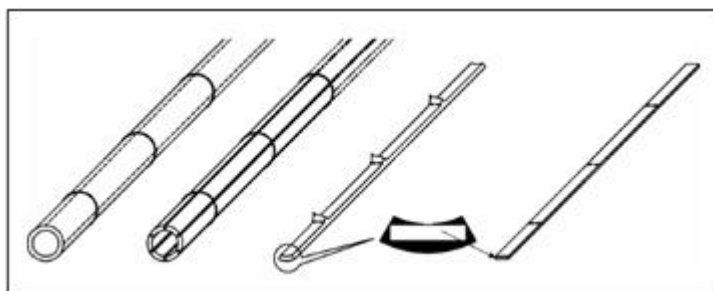
Bambusovo steblo najprej razcepijo na več delov. Razcepljene kose bambusovega stebela sploščijo s pomočjo visoke temperature in povišanega tlaka. Trakovom nato poskobljajo površini ter jih vzdolžno obrobijo. Po obdelavi so trakovi navadno široki 60 mm do 120 mm in debeli od 4 mm do 9 mm. Obdelane trakove imenujejo tudi bambusov furnir, čeprav to ni pravi rezan ali luščen furnir. Po obdelavi se na trakovih pojavljajo velike razpoke, ki v nekaterih primerih niso samo površinske (Qisheng in sod., 2001).

Nato na trakove nanesejo fenol-formaldehidno lepilo, jih zložijo v plasti plošče ter stisnejo v vroči stiskalnici. Plošče imajo 3 do 5 plasti, ki so med seboj prekržane. Vezana bambusova plošča ima velike dimenzije, dobro trdnost, majhne deformacije in dobro dimenzijsko stabilnost. Gostota plošče znaša od 800 kg/m^3 do 850 kg/m^3 , njena upogibna trdnost znaša 90 N/mm^2 . Poraba lepila je razmeroma nizka ter znaša približno 40 kg/m^3 plošč (Qisheng in sod., 2001).

Tehnologija izdelovanja plošč s segrevanjem in sploščevanjem delov bambusovega stebela je relativno preprosta. Izkoristek materiala je visok. Tako izdelanih plošč zaradi globokih razpok v trakovih ne moremo uporabiti za dekorativne namene (Qisheng in sod., 2001).

2.2.1.2 Lamelirana bambusova plošča (Laminated bamboo board)

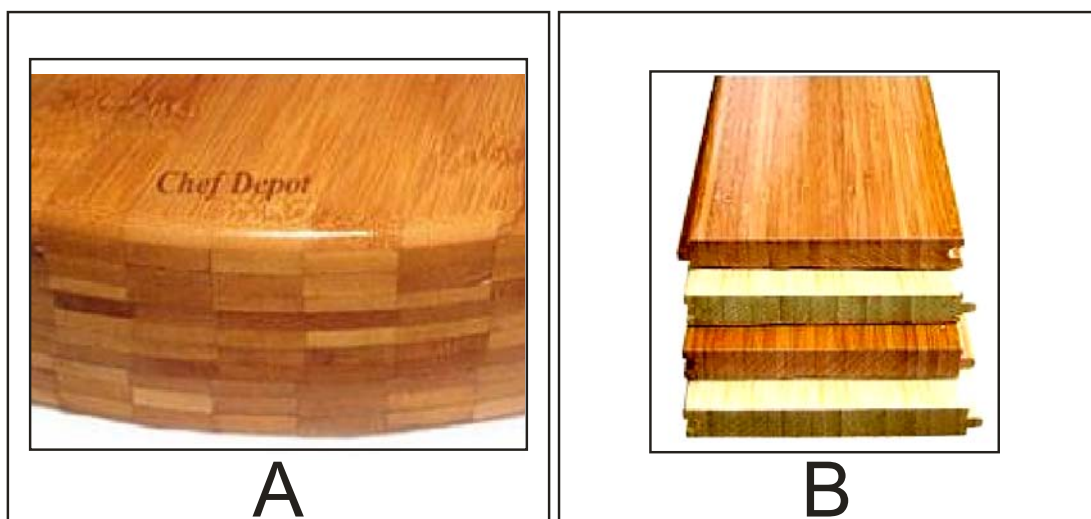
Lamelirana bambusova plošča je sestavljena iz enako širokih in debelih lamel. Lamele naredijo iz bambusovih stebel. Bambusova stebela z dvolistnim enoosnim krožnim žagalnim strojem in s skobeljnim strojem štiristransko obdelajo (slika 5). Pri takem izdelovanju lamel je izkoristek surovine majhen. V izdelovanje lamel je vloženega veliko dela. Lamele nimajo površinskih razpok, kar pripomore k dodani vrednosti iz njih izdelanih plošč (Qisheng in sod., 2001).



Slika 5: Shematični prikaz izdelovanja lamel iz bambusovega stebela (Bransal in Prasad, 2004)

V plošči so vse lamele orientirane v isto smer. Zložene so tako, da na površini plošče lahko vidimo samo tangencialne ali samo radialne ploskve lamel (slika 6). Plošče stiskajo v dveh smereh, ploskovno in bočno (Qisheng in sod., 2001).

Površina lamelirane bambusove plošče je gladka. Uporabljajo jo za izdelovanje pohištva, za notranje dekoracije ter namesto visoko kakovostnega lesa (Qisheng in sod., 2001).



Slika 6: Lamelirani bambusovi plošči: na površini samo tangencialne ploskve lamel (A), na površini so samo radialne ploskve lamel (B) (Bamboo Flooring..., 2009)

2.2.1.3 Lameliran bambusov pod (Laminated bamboo flooring)

Lameliran bambusov pod je narejen iz enako debelih in enako širokih trakov. Plasti trakov v plošči so obrnjene v isto smer ali pa so med seboj zamaknjene za 90 °. Pri končnem

izdelku so debeline plošč med 9 mm in 18 mm, širine med 90 mm in 150 mm. Dolžine lameliranega bambusovega poda so do 1800 mm (Qisheng in sod., 2001).



Slika 7: Lameliran bambusov pod (Everlasting..., 2009)

Qisheng in sod. (2001) navajajo, da so tehnološki standardi izdelave lameliranih bambusovih podov zelo striktni. Izdelki so dobre kakovosti in lepega izgleda. Postopek izdelave je zapleten. Surovina za izdelavo bambusovega lameliranega poda mora biti zelo kvalitetna. Še posebej je pomembno, da so stebila sveža in imajo velik premer.

2.2.1.4 Druge lamelirane bambusove plošče

V poglavjih 2.2.1.2 in 2.2.1.3 so omenjene le osnovne oblike lameliranih bambusovih plošč. Na tržišču se pojavljajo lamelirane bambusove plošče, ki imajo lamele orientirane na različne načine.



Slika 8: Lamelirane bambusove plošče (Stamm, 2002)

2.2.2 Izdelki iz (tanjših) bambusovih trakov (Products made of bamboo strips)

Bambusova stebila vzdolžno razcepijo in iz njih naredijo trakove, debele od 0,5 mm do 3 mm, široke od 10 mm do 20 mm. Iz trakov nato izdelajo bambusove rogoznice ali jih uporabijo v druge namene (Qisheng in sod., 2001).

2.2.2.1 Vezane plošče iz bambusovih rogoznic (Mat plybamboo)

Iz trakov, debelih od 0,8 mm do 1,2 mm, spletejo rogoznice. Po sušenju rogoznice oblepijo in stisnejo v ploščo. Izdelek ima 2 do 5 plasti. Večina takih plošč je tanjših in se uporabljajo za embalaranje ter pokrivanje železniških vagonov. Debelejše plošče uporabljajo kot opazne plošče pri betoniranju ali za dno tovornjakov (Qisheng in sod., 2001).

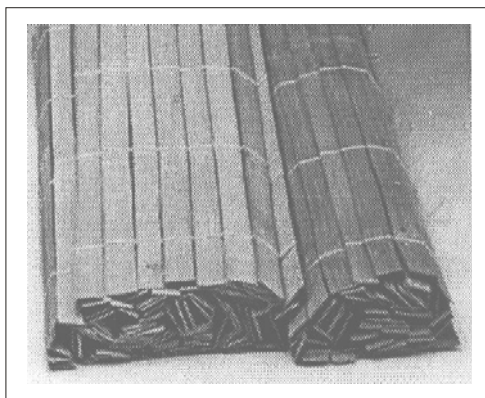


Slika 9: Površina vezane plošče iz bambusovih rogoznic (Bamboocomposites, 2009)

Cepljenje bambusovih stebel in izdelovanje rogoznic sta preprosti operaciji, za katere ne potrebujejo dragega orodja. Za izdelovanje trakov lahko uporabimo tudi tanjša stebila (Qisheng in sod., 2001).

2.2.2.2 Vezane plošče iz bambusovih zaves (Curtain plybamboo)

Trakove zložijo vzporedno enega zraven drugega ter jih povežejo z vrvjo. Dobijo tako imenovane zaves (slika 10). Na zaves po sušenju nanesejo lepilo, jih zložijo v ploščo in stisnejo v vroči stiskalnici. Če so zaves na površini plošče narejene pazljivo iz finih trakov, lahko po brušenju dobijo zelo gladko ploščo. Debelino trakov lahko prilagajajo glede na končno uporabo plošče. Te plošče imajo širok spekter uporabe (Qisheng in sod., 2001).



Slika 10: Zaves iz bambusa (Qisheng, 2007)

2.2.2.3 Lamelirana bambusova plošča iz tanjših trakov (Laminated bamboo of strips)

Po sušenju trakove oblepijo, zložijo in nato stisnejo v ploščo. Trakove oblepijo tako, da jih namakajo v fenol-formaldehidnem lepilu. Nato jih vzporedno zložijo enega zraven drugega v ploščo. Plošče stiskajo pri visokem tlaku, zato lahko dosežejo gostoto nad 1000 kg/m^3 . Lamelirano bambusovo ploščo iz tanjših trakov uporabljajo za dno tovornjakov, avtobusov in železniških vagonov (Qisheng in sod., 2001).

2.2.2.4 Vezane plošče iz bambusovih rogoznic in zaves (Mat-curtain plybamboo)

Pri izdelavi teh plošč za površinske sloje uporabljajo rogoznice, namočene v lepilo. Notranji sloji plošč so iz bambusovih zaves. Posamezne plasti plošče so med seboj zamaknjene za 90° . Plošče stisnejo pri visokem tlaku. Obstaja tudi možnost, da rogoznice

na površini plošče oblepijo s papirjem, namočenim v melaminske ali fenol-formaldehidne smole.

Zavese in rogoznice ponavadi izdelujejo na podeželju, tovarna jih nato odkupi, obdela in zlepi v ploščo. Tehnološki postopek izdelave teh plošč je preprost. Trajnost plošč je dolga. Vezane plošče iz bambusovih rogoznic in zaves večinoma uporabljajo za izdelovanje opažev pri betoniranju (Qisheng in sod., 2001).

2.2.3 Plošče iz bambusovih iveri (Products made of bamboo chips)

2.2.3.1 Bambusova iverna plošča (Bamboo chipboard)

Proces izdelave bambusovih ivernih plošč je podoben procesu izdelave ivernih plošč iz lesa: izdelava iveri, sušenje in oblepljenje le-teh, natresanje iveri v pogačo ter vroče stiskanje. Izkoristek surovine pri izdelavi teh plošč je visok. Za izdelavo enega m³ plošč potrebujejo približno 1,3 t materiala. Za plošče lahko uporabimo tudi tanjša bambusova stebela, vrhove stebel in ostanke bambusa (Qisheng in sod., 2001).

Bambusova iverna plošča, zlepljena s fenol-formaldehidnim lepilom, ima dobre mehanske lastnosti, dobro dimenzijsko stabilnost ter nizko absorpcijo vode. Plošče lahko ojačamo, če na njihove površine prilepimo bambusove rogoznice ali zavese (Qisheng in sod., 2001).

Glede na velikost iveri se razlikujejo tudi plošče. Na trgu lahko dobimo vse od navadnih ivernih do OSB plošč.

2.2.4 Bambusove plošče, narejene iz bambusa v kombinaciji z drugimi materiali

Da bi izboljšali kvaliteto bambusovih plošč, povečali izkoristek surovine in znižali stroške proizvodnje, so začeli raziskovati možnosti kombiniranja bambusa z drugimi materiali. Izkazalo se je, da bambus lahko uporabimo v kombinaciji z enim ali več materiali. Na

tržišču so že kompozitne plošče bambus-les, bambus-cement, bambus-mavec ... Taki kompoziti obdržijo dobre lastnosti bambusovih kompozitov, njihove slabosti pa poskušajo z dodajanjem drugih materialov izničiti (Zheng in Chen, 2008).

Bambus-cement in bambus-mavec kompoziti imajo večjo trdnost in so odpornejši na atmosferske vplive. Poleg tega so ognjevarni, dokaj dobri zvočni izolatorji ter ne vsebujejo sintetičnih lepil in škodljivih kemičnih komponent (Zheng in Chen, 2008).

V zadnjem času razvijajo vse več materialov, v katerih so za izboljšanje mehanskih lastnosti vgrajena bambusova vlakna.

Ker sta les in bambus poceni materiala in se ju da preprosto obdelati, je največ kompozitov narejenih s kombiniranjem teh dveh surovin. Pogosto kompozitnim ploščam bambus-les dodajo še različne impregnirane papirje in folije (Qisheng in sod., 2001).

2.3 LEPILA ZA IZDELAVO KOMPOZITOV IZ BAMBUSA

Lepila, ki jih uporabljajo v proizvodnji lepljenih bambusovih kompozitov, so v glavnem urea-formaldehidna in fenol-formaldehidna ter so podobna lepilom, ki jih uporabljajo v industriji lesnih kompozitov.

Struktura in kemična sestava bambusa sta nekoliko drugačni kot pri lesu. Omočitev površine bambusa je slabša od omočitve površine lesa, to onemogoča dobro adhezijo lepila z bambusom. Lepila, ki jih uporabljajo za lepljenje lesa, niso najbolj primerna za lepljenje bambusa. Pri razvoju lepil za lepljenje bambusa morajo upoštevati prej omenjene lastnosti tega materiala. Zadnje čase razvoj teži tudi k izdelavi okolju in ljudem čim manj škodljivih lepil (Zheng in Chen, 2008).

Eden od ciljev pri razvoju lepil za lepljenje bambusovih kompozitnih plošč je izboljšanje lastnosti fenol-formaldehidnega lepila tako, da bi lepilo utrnilo hitreje pri nižji temperaturi. Želijo doseči utrjevanje lepila pod 115 ± 5 °C in čase utrjevanja znižati pod 100 s, ne da bi

poslabšali lastnosti lepila in znatno zvišali ceno proizvodnje. Če bi z razvojem lepil dosegli prej omenjene lastnosti, bi znižali porabo toplote za vroče stiskanje ter skrajšali čas lepljenja. Zmanjšali bi tudi verjetnost parnega udara in zvijanja plošč med odpiranjem stiskalnice (Zheng in Chen, 2008).

2.4 SPREMLJANJE UTRJEVANJA LEPILA Z DIELEKTRIČNO ANALIZO

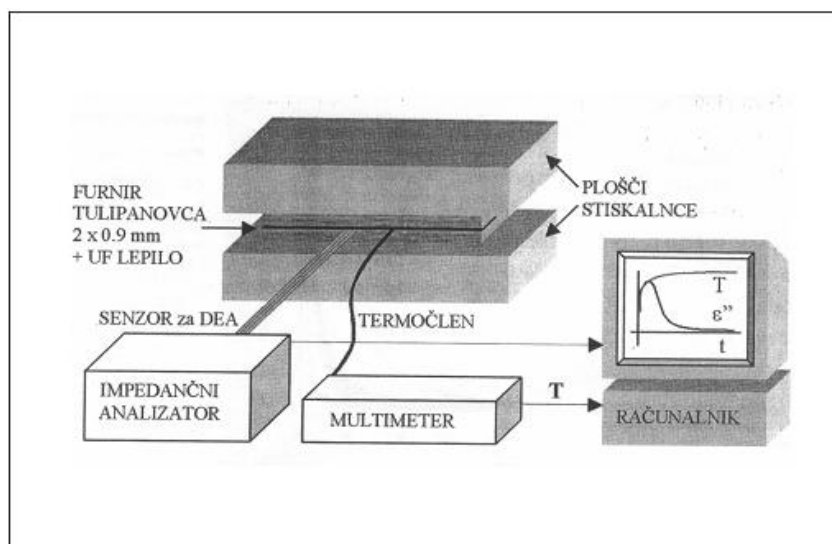
Pred lepljenjem preizkušancev za strižni test lepilnega spoja in pred lepljenjem plošč smo morali določiti optimalen čas vročega stiskanja. Čas stiskanja preizkušancev ali plošče smo ugotavljali s spremljanjem utrjevanja lepilnega spoja z dielektrično analizo. V nadaljevanju je ta metoda podrobneje predstavljena.

Spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo temelji na merjenju sprememb dielektričnih lastnosti lepila. Te spremembe so povezane s spremembo viskoznosti in utrjenosti lepila. Z merjenjem dielektričnih lastnosti lepila je mogoče ugotoviti soodvisnost med stopnjo utrjenosti, temperaturo in časom stiskanja (Šernek, 2004).

Na začetku lepljenja je lepilo tekoče in ima visoko dielektrično vrednost. Ko lepilo utrjuje, se število dipolov manjša zaradi nastajanja makromolekul in difuzije vode iz lepila v les. Manj kot je dipolov v lepilu, nižja je njegova dielektrična vrednost. Med procesom utrjevanja se dielektrična vrednost zmanjšuje in je na koncu lepljenja, ko ni več značilnih kemičnih in fizikalnih sprememb v lepilu, konstantna (Šernek, 2004).

Dielektrične lastnosti merimo z impedančnim analizatorjem pri različnih frekvencah elektromagnetnega polja na področju od Hz do MHz. V izmeničnem električnem polju material izkazuje svoje dielektrične lastnosti: dielektrično vrednot (ϵ') in tangens izgubnega kota ($\tan\delta$). Dielektrična vrednost je mera za električno energijo, ki se absorbira in shrani v obliki električne polarizacije v snovi, ki je v elektromagnetnem polju. Tangens izgubnega kota je mera za del energije, ki se absorbira v dielektriku in se spremeni v toploto. Praktično vse dielektrične meritve temeljijo na merjenju napetosti in toka med parom elektrod, s čimer je mogoče ugotoviti prevodnost in kapacitivnost med elektrodama. Za

spremljanje utrjevanja lepil se uporabljajo tanki in ravni senzorji, ki jih lahko vstavimo v lepilni spoj med dve površini, ki ju bomo lepili (Šernek, 2004).



Slika 11: Naprave in oprema za spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo v vroči stiskalnici (Šernek, 2004)

Na sliki 11 lahko opazimo, da poleg impedančnega analizatorja uporabljamo pri spremljanju utrjevanja lepila z dielektrično metodo tudi termočlen, povezan s multimetrom, ki nam beleži temperaturo v lepilnem spoju. Impedančni analizator in multimeter sta povezana z osebnim računalnikom, kjer se izpišejo podatki za veličine, ki jih merimo. Na sliki 11 je na shemi za osebni računalnik prikazan tudi značilen graf, ki ga dobimo pri tej analizi. Iz grafa je razvidno, da se temperatura v lepilnem spoju povečuje in nato po določenem času ustali, dielektrična vrednost pada ter se prav tako po določenem času ustali.

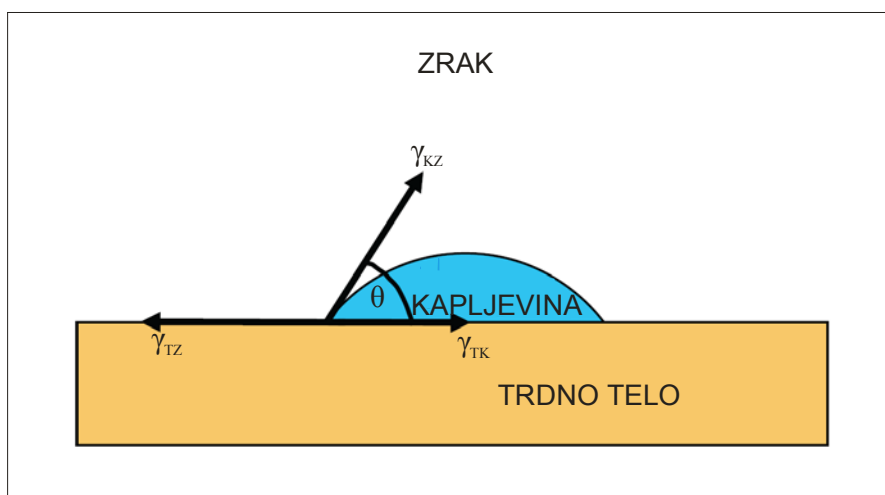
2.5 MERJENJE KONTAKTNEGA KOTA Z WILHELMY-EVO METODO

Pri lepljenju kompozitov je pomembna interakcija lepila s površinami, ki jih lepimo. Teorije navajajo, da sta omočitev površine in penetracija lepila ključna dejavnika pri interakciji med lepilom in površino (Ahmad in Kamke, 2000). Omočitev in penetracija nista edina dejavnika, ki vplivata na tvorbo lepilnega spoja. Marra (1992 cit. po Ahmad in

Kamke, 2000) navaja pet stopenj pri oblikovanju lepilnega spoja: nanos in tok lepila, prenos lepila, omočitev površine, penetracija lepila, utrditev lepila.

Omočitev površine je eden od ključnih faktorjev, ki sodelujejo pri oblikovanju lepilnega spoja (Ahmad in Kamke, 2000). S pojmom omočitev površine opisujemo gibljivost molekul lepila, ki prispeva k približevanju molekul lepila k površini in njegovi fizikalni povezanosti z molekulami lesa (Marra, 1992).

Ena od metod za ovrednotenje omočitve površine je merjenje kontaktnega kota tekočine na površini. Kontaktni kot je kazalec privlačnosti tekočine s površino. Oblika kapljice, ki jo kanemo na površino, je odvisna od kohezijskih sil na treh nivojih: površina telesa, tekočina in zrak okoli (Ahmad in Kamke, 2000).



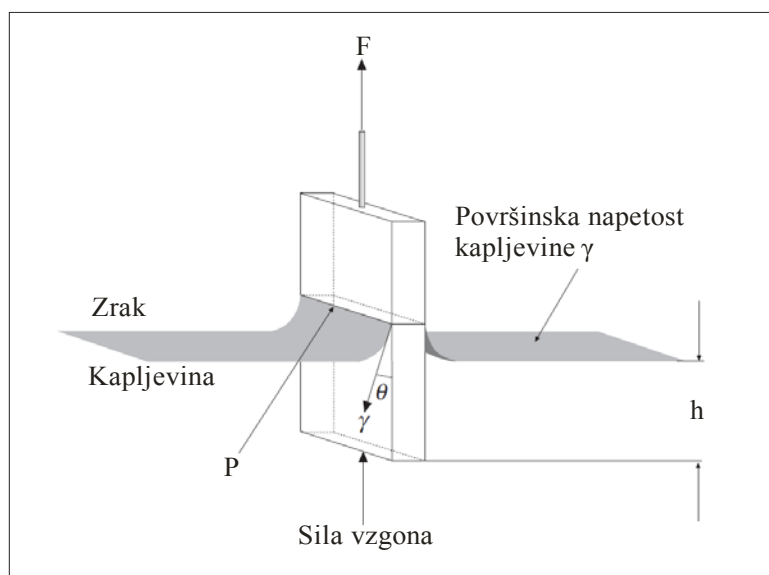
Slika 12: Kontaktni kot tekočine na površini (Sernek, 2002)

Na sliki 12 je prikazan kontaktni kot in dejavniki, ki vplivajo nanj. Z znakom γ označujemo medfazne površinske napetosti. Na kontaktni kot vplivajo tri medfazne površinske napetosti med: površino trdnega telesa in zrakom γ_{TZ} , površino trdnega telesa in kapljevino γ_{TK} ter kapljevino in zrakom γ_{KZ} . Ko je kontaktni kot nič, je omočitev površine popolna. To pomeni, da se tekočina spontano popolnoma razlije po površini (Sernek, 2002).

Wilhelmy-eva metoda je ena od metod merjenja kontaktnega kota. Ta metoda temelji na enačbi (1), ki jo je zapisal Wilhelmy (1863):

$$F = P\gamma \cos \theta - \rho Ahg \quad \dots (1)$$

V enačbi (1) F predstavlja silo, P predstavlja obseg stranice ploščice (slika 13), ki je vzporedna s površino tekočine, γ predstavlja površinsko napetost tekočine, θ je kontaktni kot, ρ predstavlja gostoto tekočine, A predstavlja površino stranice ploščice, ki je vzporedna s površino tekočine, h predstavlja globino potopitve ploščice, g pa je težnostni pospešek (Walinder, 2000).



Slika 13: Shematski prikaz Wilhelmy-eve metode (Walinder, 2000)

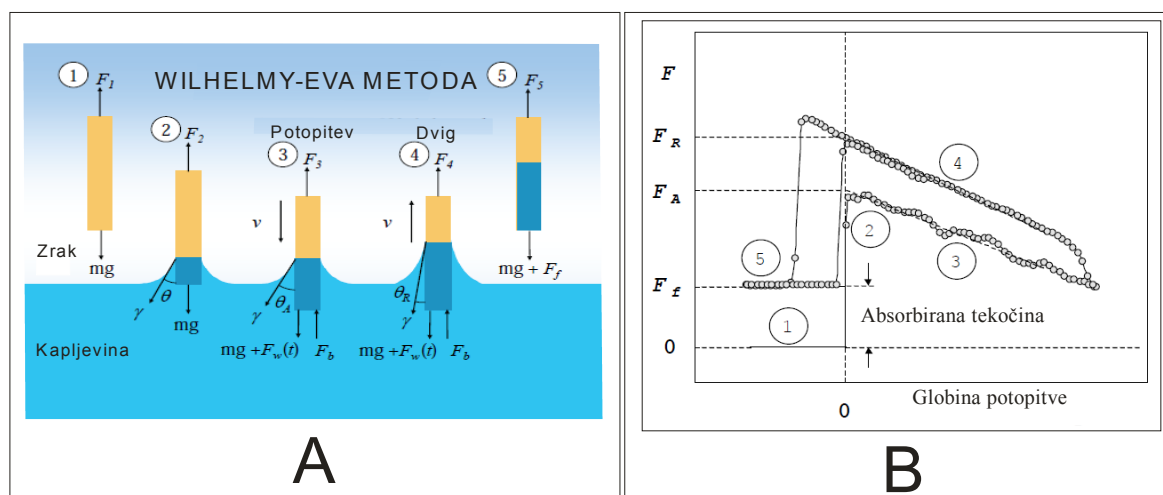
Na sliki 13 je shematski prikaz Wilhelmy-eve metode. Sila F je sila delno potopljene ploščice ter je uravnovešena s silo omočitve ($P\gamma \cos \theta$) in silo vzgona (ρAhg). Sila omočitve je enaka sili, ki jo povzroča masa kapljevine v menisku kontaktnega kota. Sila vzgona je enaka sili, ki jo povzroča masa tekočine, ki se umakne ploščici, ko se potaplja (Walinder, 2000).

Tenziometer, s katerim merimo kontaktni kot po Wilhelmy-evi metodi, nam zaznava dinamično silo med merjenjem kontaktnega kota oz. med ciklom potapljanja in izvlečenja

ploščice iz tekočine. Hitrost potopitve in izvlečenja je relativno nizka, zato ponavadi njen vpliv na sile omočitve površine zanemarimo. Pri merjenju kontaktnega kota tekočin na površini lesa ponavadi dobimo povprečno vrednost kontaktnega kota. Pričakovati je, da se kontaktni koti na izredno heterogeni površini lesa spreminjajo. Pri merjenju kontaktnega kota na površini lesa se srečamo še s problemom kapilarnega toka in sorpcije kapljevine v les. Zaradi teh dveh pojavov se med testiranjem masa testirane ploščice nenehno spreminja. To smo v enačbi (2) v primerjavi z enačbo (1) tudi upoštevali. Oznaka $F_w(t)$ predstavlja silo, ki jo povzroči masa kapljevine, ki se absorbira v telo med merjenjem kontaktnega kota.

$$F(h, t) = P\gamma \cos \theta + F_w(t) - \rho Ahg \quad \dots (2)$$

Na sliki 14 (B) je prikazan graf izvlečne sile v odvisnosti od globine potopitve. Iz grafa je razvidno, da ima meritev 5 stopenj. Na sliki 14 (A) je posamezna stopnja meritve tudi shematsko prikazana.



Slika 14: Shematski prikaz merjenja kontaktnega kota (A), grafični prikaz sile v odvisnosti od globine potopitve (B) (Bryne, 2008)

2.6 PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

Z možnostjo izdelave lepljenih kompozitov iz bambusa so se ukvarjali različni avtorji. Veliko prispevkov je objavljenih pod okriljem International Network for Bamboo and Rattan, ki izdaja Journal of Bamboo and Rattan.

Ahmad in Kamke (2003) sta v svojem prispevku objavila analizo *Dendrocalamus strictus*, imenovanega Calcutta bambus, za izdelavo lepljenih kompozitov. Ukvarjala sta se z lastnostmi površine bambusa: pH, odbojnostjo (buffer capacity), omočitvijo ter površinsko napetostjo površine. Posebej sta bila pozorna na spreminjanje lastnosti površine vzdolž stebela. Ugotovila sta, da ima Calcutta bambus podobne lastnosti površine kot večina komercialnih lesnih vrst Združenih državah Amerike. Omočitev radialnih in tangencialnih površin je bila podobna. Minimalno razliko v omočitvi površine in v pH-ju površine sta zaznala vzdolž stebela. Opazila sta, da je omočitev površin kolenc slabša od omočiteve površin medkolenčij. Za izdelavo lepljenih kompozitov iz tega bambusa lahko uporabimo ista lepila kot pri izdelavi kompozitov iz lesa. Navajata, da minimalne razlike v lastnostih površine različnih delov stebela olajšajo postopek lepljenja. Zaradi razlik v omočitvi površine kolenc in medkolenčij bi lahko imeli manjše težave pri izdelavi lepljenih kompozitov iz tega bambusa.

Ahmad in Kamke (2005) sta objavila še en članek o bambusu *Dendrocalamus strictus*, Calcutta bambus. V njem sta predstavila mehanske in fizikalne lastnosti tega bambusa z vidika izdelave lepljenih kompozitov. Precej pozornosti sta namenila razliki mehanskih in fizikalnih lastnosti glede na položaj v stebelu in glede na starost stebela. Izmerila sta gostoto, ravnovesno vlažnost, natezno in tlačno trdnost vzporedno z vlakni, upogibno trdnost ter proučila krčenje. Ugotovila sta, da se gostota tega bambusa ne spreminja vzdolž stebela. Gostoti medkolenčij in kolenc pa se razlikujeta. Radialno krčenje Calcutta bambusa se ne razlikuje od tangencialnega. Vzdolžno krčenje je manjše od radialnega ali tangencialnega. Gostota Calcutta bambusa in njegovi skrčki so večji kot pri lesnih vrstah, ki se uporabljajo za izdelavo lepljenih kompozitov. Ravnovesna vlažnost Calcutta bambusa je podobna ravnovesni vlažnosti lesa. Natezna, tlačna in upogibna trdnost se razlikujejo glede na položaj v stebelu. V glavnem ima vrh stebela tega bambusa najboljše mehanske lastnosti.

Glede na rezultate sta avtorja ocenila, da bi pri izdelavi lepljenega kompozita iz Calcutta bambusa največ težav povzročale razlike v lastnostih kolenc in medkolečij. Menila sta, da je ta vrsta bambusa primerna za izdelavo lepljenih kompozitov.

Cherdchim in sod. (2004) so proučevali termično preoblikovanje bambusovih stebel. Raziskovali so vpliv različne temperature lanenega olja na sploščevanje bambusovih stebel. V raziskavi so uporabili bambus *Dendrocalamus asper* Backer. Polovice bambusovih stebel z debelino stene 3 mm in dolžino 150 mm so namakali v vodi pri sobni temperaturi, da so dosegli točko nasičenja celičnih sten v bambusu. Nato so polovice segrevali v lanenem olju pri različnih temperaturah. Vsako polovico stebela so med segrevanjem obremenili s silo 20 N. Glede na višino loka polovice stebela so izračunali stopnjo sploščanja v odvisnosti od časa. Ugotovili so, da je po deformaciji preizkušance možno razdeliti na dve skupini, na preizkušance, ki so se segrevali v olju s temperaturo pod 115 °C, in preizkušance, ki so se segrevali v olju nad omenjeno temperaturo. Preizkušanci iz prve skupine so se počasi in le deloma sploščili, preizkušanci iz druge skupine pa so se hitreje in popolnoma sploščili.

Li in Shupe (2004) sta proučevala omočitev predhodno kemično obdelanih površin treh vrst bambusa iz Hondurasa. Površine omenjenih vrst bambusa sta pred sušenjem namakala v raztopini klorovodikove kisline ali natrijevega hidroksida ali v destilirani vodi. Po sušenju sta izmerila kontaktne kote urea-formaldehidnega lepila, fenol-formaldehidnega lepila, izocianatnega lepila ter destilirane vode na površinah iz notranjih, zunanjih in sredinskih plasti stebel. Odkrila sta, da na kontaktni kot vpliva vrsta bambusa, sloj, iz katerega je narejena površina bambusa, predhodna kemična obdelava bambusa in tekočina, ki jo uporabimo za ugotavljanje kontaktnega kota.

V slovenščini je malo gradiva s področja bambusovih kompozitnih plošč. To je razumljivo, saj v našem okolju uporaba bambusa in izdelkov iz njega ni razširjena. S pojavom globalizacije so bambus in različni izdelki iz njega prišli tudi k nam. Koprivec in Zbašnik-Senegačnik (2006) sta v svojem prispevku predstavili bambus in njegovo uporabo. Navedli sta, da bambus tam, kjer najboljše uspeva, uporabljajo za gradnjo že več stoletij. Opisali sta prednosti bambusa, kot so lahkost, elastičnost, trdnost in naravni videz. Omenjata, da se

bambus v arhitekturi uporablja v obliki ravnih in upognjenih palic ter kot kompozitno gradivo za pohištvo, talne in fasadne obloge. Avtorici navajata, da je bambus biološko hitro razgradljiv ter da ima nizko naravno odpornost. Opišeta naravne, tradicionalne in kemične metode zaščite bambusa. V prispevku sta predstavili tudi različne možnosti uporabe bambusa v arhitekturi.

3 MATERIAL IN METODE

V diplomski nalogi uporabljen bambus *Phyllostachys vivax* smo posekali v zaselku Pristava pri Novi Gorici. Pri poskusih smo uporabili fenol-formaldehidno lepilo tipa A, proizvajalca Fenolit.

Iz bambusovih stebel smo izdelali ploščice in na njih izmerili kontaktni kot fenol-formaldehidnega lepila in destilirane vode. Kontaktni kot smo merili s tenziometrom po Wilhelmy-evi metodi. Strižni test lepilnega spoja smo ugotavljali po standardu SIST EN 302-1 (2004). Pred lepljenjem preizkušancev smo z dielektrično metodo ugotovili optimalen čas utrjevanja lepila. Iz kosov preizkušancev, ki so ostali po preizkušanju strižne trdnosti lepilnega spoja, smo izdelali preparate za mikroskopiranje. S pomočjo mikroskopa in sistema za analizo slike na osebnem računalniku smo izmerili in izračunali efektivno globino penetracije lepila v bambus. Iz bambusa smo izdelali slojnato bambusovo ploščo. Nato smo po standardu SIST EN 310 (1993) izmerili silo loma ter izračunali modul elastičnosti in upogibno trdnost plošče.

3.1 MATERIALI

3.1.1 Bambus: *Phyllostachys vivax*

Bambus, ki smo ga uporabili v diplomski nalogi, smo posekali na Pristavi pri Novi Gorici. Tam so konec 19. stoletja zasnovali eksotičen park, v katerem so posadili tudi bambus iz roda *Phyllostachys* (Klančič-Golob, 1973).

Predvidevamo, da se je bambus iz parka razširil po Pristavi. Rastišče, na katerem smo sekali bambus, se nahaja ob Kostanjeviški cesti. Leži na jugozahodnem pobočju Panovca ter je dobro zavarovano pred vplivi s severa, zlasti pred burjo iz Vipavske doline. Spomladi in jeseni tam pihajo topli vetrovi z morja. Snega in slane skorajda ni. Geološka podlaga je dobro topni fliš, ki daje dobro in hranljivo prst. Na Goriškem je letno 2000 sončnih ur. Povprečna letna temperatura je 13,1 °C, srednja temperatura v rastni dobi pa 18,4 °C.

Rastna doba traja od 15. marca do 30. oktobra. Količina letnih padavin je 1520 mm, od tega 992 mm v rastni dobi (Klančič-Golob, 1973).

Bambus na tem rastišču doseže višino do 12 m. Premeri odraslih stebel so od 60 mm do 100 mm. Debelina stene odraslega stebela je pri tleh 5 mm do 9 mm ter se proti vrhu tanjša. Za izdelavo preizkušancev in plošč smo uporabili samo 0,5 m dolg spodnji del stebela.

Rod *Phyllostachys* ima 51 vrst, zato je zelo težko določili posamezno vrsto bambusa. S pomočjo identifikacijskega ključa in opisov vrst roda *Phyllostachys* (Zhengping in Stapleton, 1995) smo sklepali, da je bambus, ki smo ga uporabili, *Phyllostachys vivax*.

3.1.2 Lepilo

Pri raziskavah v okviru diplomske naloge smo uporabili fenol-formaldehidno lepilo tipa A, proizvajalca Fenolit. Uporablja se v proizvodnji vezanih plošč ter za furniranje. Lepilo je primerno za vroče ali hladno lepljenje. Pri hladnem lepljenju proizvajalec priporoča dodajanje BP-345 aditivov. Izdelki, zlepljeni z lepilom Tip A, zadostujejo kriterijem standarda AW-100 (isti pogoji kot za razred D-3 pri SIST EN 204).

Lepilo je fenol-formaldehidna smola tipa rezol, raztopljena v vodi. Vsebnost suhe snovi, ki so jo določili po standardu (DIN 16916 T2 (P)), znaša 45-47 %. Kislini delež v lepilu znaša 7-8 %. Iztočni čas lepila pri 20 °C in 4 mm premeru šobe iztočne čaše znaša od 90 s do 110 s. Delež NaOH v lepilu znaša 6-7 %. Vsebnost prostega formaldehida je manjša od 0,2 %. Vsebnost prostega fenola je manjša od 0,2 %. Proizvajalec navaja, da je skladiščni čas lepila pri 20 °C najmanj 30 dni.

Jošt (2008) je v raziskavi ugotovil še nekatere druge lastnosti tega lepila. Gostota lepila je znašala 1,207 g/cm³. Čas želiranja lepila je bil pri 100 °C 24 min in 45 s, vrednost pH lepila je znašala 10,7.

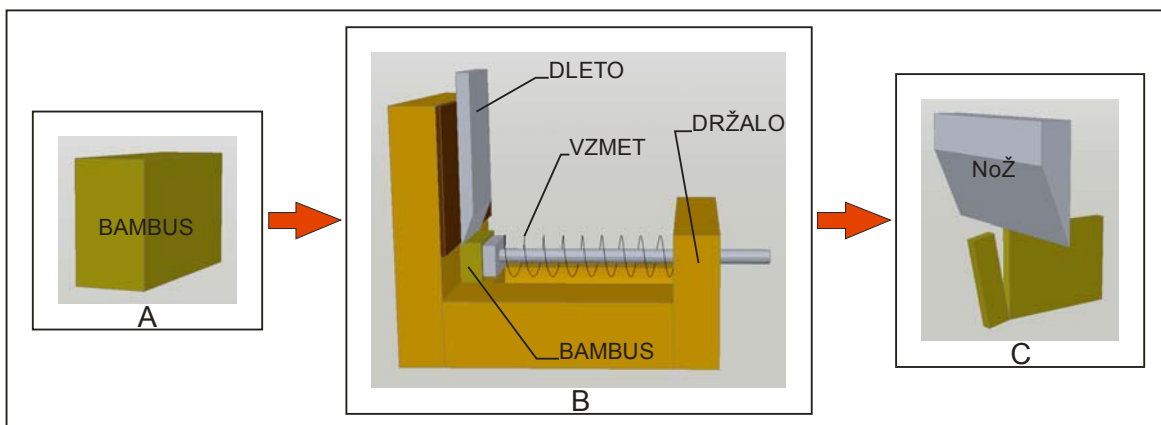
3.2 METODE

3.2.1 Ugotavljanje kontaktnega kota

3.2.1.1 Izdelava preizkušancev

Za ugotavljanje kontaktnega kota z Wilhelmy-evo metodo s tenziometrom smo izdelali ploščice iz bambusa velikosti $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$. Polovico ploščic smo izdelali iz zunanjih, polovico iz notranjih plasti stebela bambusa.

Ploščice smo naredili iz lamel dimenzije $15\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, ki smo jih izdelali po istem postopku kot za strižni test lepilnega spoja. Ena površina lamel je bila iz zunanjih plasti, druga pa iz notranjih plasti stebela bambusa. Lamele smo narezali na 10 mm dolge koščke (slika 15 (A)). Iz njih smo s pomočjo šablone oziroma držala (slika 15 (B)) in dleta naredili 10 mm dolge, 15 mm široke in 1 mm do 2 mm debele ploščice. Nato smo ploščice zožili s cepljenjem (slika 15 (C)), da je njihova širina znašala $10 \pm 1\text{ mm}$. Nazadnje smo z brusilnim papirjem zbrusili vse robove in obe ploskvi ploščice. Po brušenju smo ploščice prijemali samo s pinceto.



Slika 15: Pripomočki in način izdelave ploščic: deščica iz bambusa dimenzije $15 \times 10 \times 5\text{ mm}$ (A), držalo ter način izdelovanja ploščic (B), oženje ploščic (C)

3.2.1.2 Ugotavljanje kontaktnega kota

Kontaktni kot FF lepila in v vode smo ugotavljali po Wilhelmy-evi metodi s tenziometrom K100 proizvajalca KRÜSS. Tenziometer je bil povezan osebni računalnikom, s pomočjo katerega smo v program KRÜSS laboratory desktop U3.31 vnašali podatke o ploščicah ter uravnavali parametre merjenja. Program nam je po končanem merjenju izpisal želene podatke. Preden smo lahko začeli z ugotavljanjem kontaktnega kota, smo morali s tenziometrom izmeriti površinsko napetost lepila oziroma vode.

Postopek merjenja površinske napetosti FF lepila smo začeli s pripravo čaše za lepilo. Čašo s prostornino 50 ml smo sprali z destilirano vodo, jo nato obrisali z alkoholnim robčkom, ponovno sprali z destilirano vodo, obrisali s papirnato brisačo ter vanjo vlili lepilo. Za vsako meritev smo potrebovali od 15 ml do 20 ml lepila. Nato smo čašo vstavili v tenziometer. Za merjenje površinske napetosti smo uporabili platinasto ploščico, ki jo predpisuje proizvajalec tenziometra. Platinasto ploščico smo najprej sprali z destilirano vodo, jo s krožnimi gibi segrevali nad plamenom, da je zažarela, in jo nato vstavili v posebno držalo v tenzimetru. Pred meritvijo smo v program KRÜSS laboratory desktop U3.31 vpisali gostoto lepila, hitrost potapljanja ploščice, minimalno in maksimalno globino potopitve ploščice ter temperaturo v prostoru. Hitrost potapljanja ploščice je znašala 12 mm/min. Minimalna globina potopitve ploščice je bila 0 mm, maksimalna globina potopitve je bila 6 mm. Temperatura v prostoru se je gibala med 21 °C in 23 °C. Po končani meritvi nam je program samodejno izpisal površinsko napetost lepila. Platinasto ploščico smo nato vzeli iz tenziometra in jo sprali z destilirano vodo.

Po meritvi površinske napetosti lepila smo začeli z ugotavljanjem kontaktnega kota lepila na sveže zbrušeni površini bambusa. Najprej smo ploščici iz bambusa izmerili dimenzije: dolžino in širino s kljunastim merilom, debelino s mikrometrom. Vse dimenzije smo podajali na dve decimalni mesti natančno. S pomočjo pincete in posebnega držala smo ploščico vpeli v tenziometer. V program smo nato vpisali dimenzije ploščice, površinsko napetost lepila, hitrost premikanja ploščice pred dotikom, občutljivost dotika, hitrost potapljanja ploščice, globino potopitve pred merjenjem ter maksimalno globino potopitve. Hitrost premikanja pred dotikom ploščice z lepilom je znašala 6 mm/min. Občutljivost

dotika ploščice s površino lepila je bila 1 g. Hitrost potopitve ploščice med merjenjem sile je znašala 12 mm/min. Globina potopitve ploščice pred merjenjem je bila 2 mm. Maksimalna globina potopitve ploščice je bila 6 mm.

Program KRÜSS laboratory desktop U3.31 nam je po končani meritvi izrisal graf sile v odvisnosti od globine potopitve ploščice. Nato smo korelacijsko premico v programu čim bolj približati podatkom na krivulji, da je bil faktor korelacije čim bliže 1. Faktor korelacije smo določali na odseku krivulje, kjer so bili podatki za silo izmerjeni na globini potopitve ploščice od 2 mm do 6 mm. Na osnovi naklona korelacijske premice in enačbe 2 smo izračunali kontaktni kot.

Po končani meritvi smo iz tenziometra vzeli ploščico in čašo z lepilom. Čašo smo sprali z destilirano vodo, ploščico iz bambusa pa zavrgli.

Izvedli smo dvanajst meritev s ploščicami iz zunanjih plasti stebela ter dvanajst meritev s ploščicami iz notranjih plasti stebela bambusa. Za vsako meritev smo uporabili sveže lepilo.

Ugotavljanje kontaktnega kota vode na sveže zbrušeni površini bambusa se bistveno ni razlikovalo od ugotavljanja kontaktnega kota lepila. Razlika je bila le v tem, da je potekalo v drugem mediju, vodi, zato je bilo čiščenje čaš in opreme bistveno lažje.

Kontaktni kot vode smo ugotavljali šestkrat. Tri meritve smo opravil s ploščicami iz notranjih, tri s ploščicami iz zunanjih plasti stebela bambusa.

3.2.2 Spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo

V okviru raziskav za diplomsko nalogo smo izvajali vroče lepljenje. Pred vsakim glavnim lepljenjem smo izvedli poskusno lepljenje. Pri poskusnem lepljenju smo s spremljanjem utrjevanja lepila z dielektrično analizo (Šernek, 2004) določili optimalni čas stiskanja. V nadaljevanju je opisan potek spremljanja utrjevanja lepila z dielektrično analizo, ki smo jo izvedli pred lepljenjem lamel za strižni test lepilnega spoja.

Spremljanje utrjevanja FF lepila z dielektrično analizo smo izvajali s IDEX senzorjem, model 066S, proizvajalca Micromet Instruments, ki smo ga priklopili na Agilent 4285A Precision LCR Meter. Na lameli smo nanесли lepilo ter nato v lepilni spoj vstavili senzor. Lepilo smo nanесли tudi po senzorju. Nato smo lameli sestavili v dvoslojni lepljenec in ga povili z lepilnim trakom, da se med stiskanjem ne bi premaknili.

Poleg merjenja prevodnosti lepila smo merili tudi temperaturo v lepilnem spoju. Med lameli, na kateri smo prej nanесли lepilo, smo vstavili termočlen. Uporabljali smo termočlen tipa J, ki je bil preko multimetra povezan z osebnim računalnikom. Lameli s termočlenom smo prav tako povili z lepilnim trakom, da se med stiskanjem ne bi premaknili.

Lameli s senzorjem ter lameli s termočlenom smo vstavili v vročo stiskalnico. Temperatura plošč stiskalnice je znašala 160 ± 5 °C, specifični tlak stiskanja je znašal 15 bar. Dielektrične lastnosti v lepilnem spoju smo merili pri frekvenci elektromagnetnega polja 100 kHz.

LCR Meter in multimeter sta bila povezana z osebnim računalnikom, s pomočjo katerega smo v programu Agilent Vee Pro spremljali meritve. Na ekranu so se nam vsako sekundo izpisale vrednosti za pet veličin: kapacitivnost, tangens izgubnega kota, induktivnost, prevodnost ter temperaturo. Podatke smo po končanem merjenju prenesli v program Microsoft Excel in iz njih po enačbi (3) izračunali stopnjo utrjenosti lepilnega spoja

$$\alpha = \frac{G_{\max} - G(t)}{G_{\max} - G_{\min}} \quad \dots (3)$$

Kjer je:

- α ... stopnja utrjenosti lepilnega spoja
- $G_{\max}$... začetna ali maksimalna prevodnost [S]
- $G(t)$... prevodnost ob času t [S]
- $G_{\min}$... minimalna prevodnost [S]

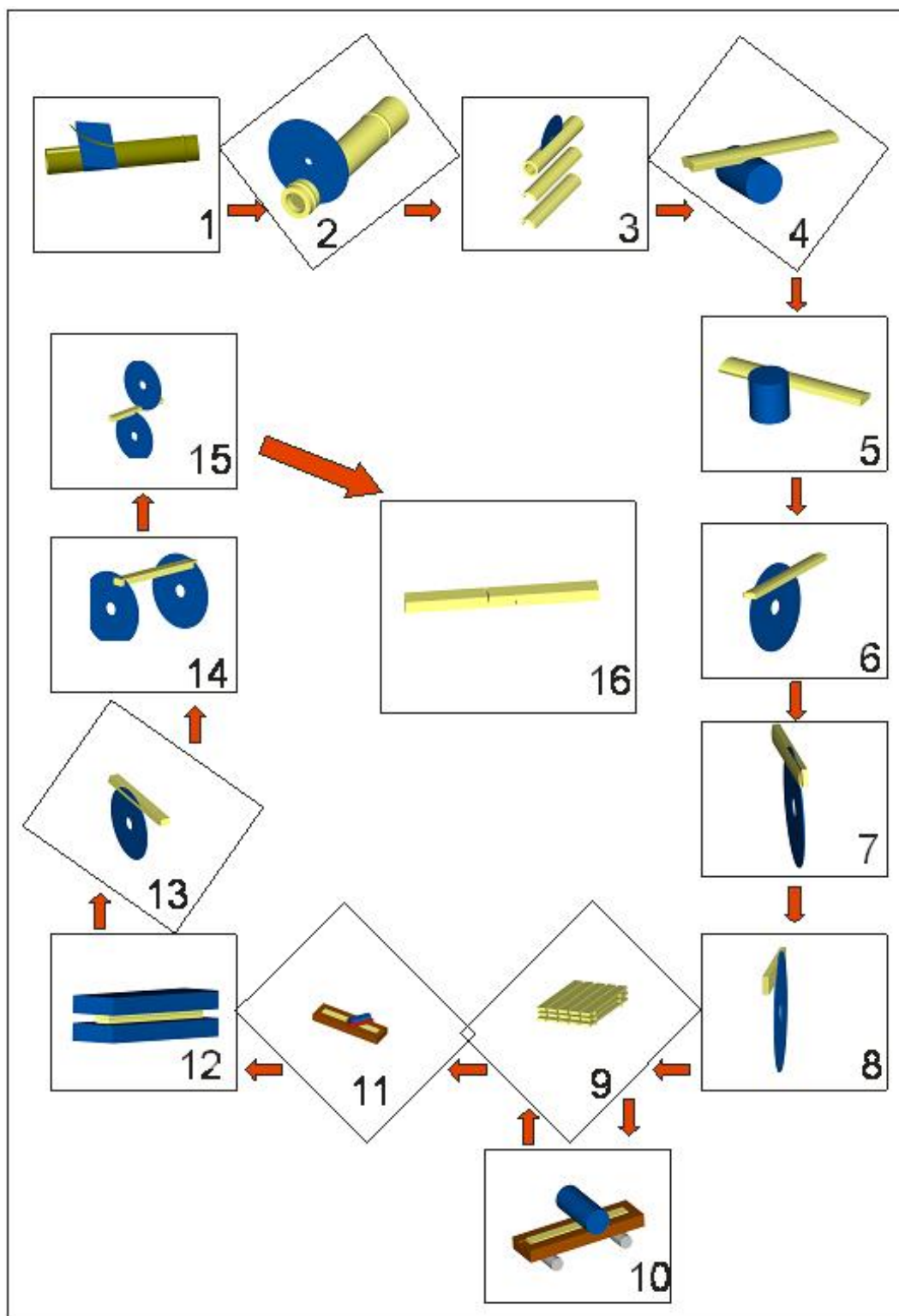
3.2.3 Strižna trdnost lepilnega spoja

3.2.3.1 Priprava preizkušancev

Preizkušance za strižni test lepilnega spoja smo naredili iz sveže posekanega bambusa. Pri pripravi vzorcev smo sledili pogojem standarda SIST EN 302-1 (2004). Zaradi narave in oblike materiala, ki smo ga imeli na razpolago, smo morali nekaj pogojev standarda prilagoditi. Postopek izdelave preizkušancev je shematsko prikazan na sliki 16.

Sveže posekanim bambusovim stebлом smo z rezilnikom odstranili zgornjo, trdo povrhnjico (slika 16 (1)). Nato smo z nadmiznim krožnim žagalnim strojem odžagali kolenca in dobili votle tulce medkolenčja. Medkolenčja smo z nadmiznim krožnim žagalnim strojem vzdolžno razžagali na lamele, široke približno 2 cm. Na poravnalnem skobeljnem stroju smo poravnali koritavo površino ter eno stranico lamel (slika 16 (4), (5)). Nato smo s podmiznim enolistnim krožnim žagalnim strojem obrobili lamele na drugi strani, da je njihova širina znašala 15 ± 1 mm. Na istem stroju smo nato z obžagovanjem zravnali drugo ploskev ter še enkrat poravnali ploskev, ki smo je predhodno skobljali. Pri tej operaciji smo lamele stanjšali na debelino $5,5 \pm 0,5$ mm. Ena od ploskev lamel je imela lastnosti zunanjih, druga lastnosti notranjih plasti stebela bambusa.

Standard SIST EN 302-1: EN 302-1:2004) predpisuje, da mora biti vlažnost lamel med lepljenjem 12 ± 1 %. Lamele smo sušili v laboratorijskem sušilniku SO-250N proizvajalca Elektromedicina pri 51 ± 1 °C in maksimalni hitrosti kroženja zraka. Vlažnost lamel smo ugotavljali gravimetrično. Lamele smo pri teh pogojih sušil 7 dni do absolutno suhega stanja. Nato smo jih klimatizirali v klima komori Heraeus-VÖTSCH VTRK 500MU pri standardnih pogojih ($T = 20$ °C, $\phi = 65$ %) do vlažnosti 12 ± 1 %. Med klimatiziranjem smo lamele še enkrat poskobljali na debelinskem skobeljnem stroju. Lamele so bile za skobljanje na debelinskem skobeljnem stroju prekratke, zato smo jih skobljali v šabloni (slika 16 (10)). Po tej operaciji je debelina lamel znašala $4 \pm 0,5$ mm.



Slika 16: Potek izdelave preizkušancev za strižni test lepilnega spoja: odstranjevanje povrhnjice (1), prečno žaganje kolenc (2), vzdolžno žaganje medkolenčij (3), poravnavanje koritave površine lamel (4), poravnavanje ene stranice lamel (5), vzdolžno robljenje lamel (6), ravnanje površine lamel z obžagovanjem (7), tanjšanje lamel z obžagovanjem (8), sušenje in klimatiziranje lamel (9), skobljanje lamel v šabloni (10), brušenje lamel (11), lepljenje lamel (12), robljenje preizkušancev (13), žaganje preizkušancev na enotno dolžino (14), žaganje zarez (15), izdelan preizkušanec (16)

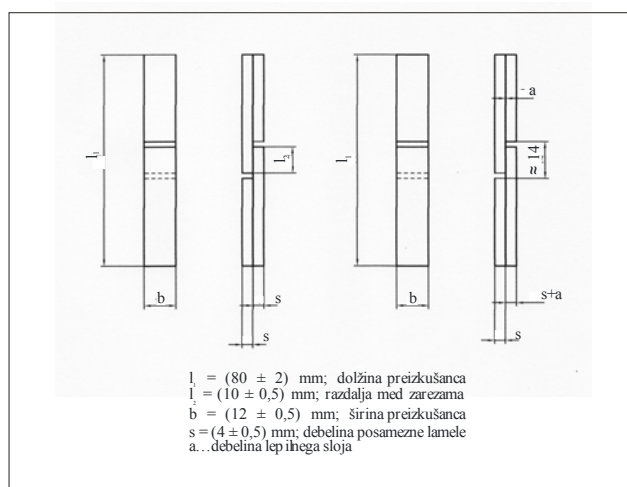
Vročje lepljenje preizkušancev smo izvajali v laboratorijski stiskalnici LS 600 proizvajalca JAVOR. Na podlagi podatkov za FF lepilo Tip A, proizvajalca Fenolit, smo določili temperaturo plošč stiskalnice, ki je znašala 160 ± 5 °C. Čas stiskanja je znašal 7 min.

Preden smo na lamele nanесли lepilo, smo vsako lepilno površino še enkrat zbrusili. Nanos lepila je znašal 200 g/m^2 . Masa lepila, ki smo ga nanесли na eno lepilno ploskev, je znašala 0,69 g. Pri izračunu potrebne mase lepila smo upoštevali povprečno površino lamele, ki je znašala $0,00345 \text{ m}^2$.

Specifični tlak stiskanja je znašal 15 bar. Pri izračunu potrebnega tlaka stiskanja na stiskalnici smo prav tako upoštevali povprečno površino lamele.

Lepili smo po dve in dve lameli skupaj na tri načine, glede na to, katera ploskev je bila v lepilnem spoju. Deset parov lamel smo zlepili tako, da sta bili v lepilnem spoju obe notranji ploskvi, deset parov tako, da sta bili v spoju obe zunanji ploskvi, deset pa tako, da sta bili v spoju po ena zunanja ter ena notranja ploskev.

Zlepljene lamele smo tri dni pustili v prostoru, da so se ohladile pri sobni temperaturi. Nato smo iz njih izžagali preizkušance za strižni test lepilnega spoja. Preizkušance smo obdelovali na miznem enolistnem krožnem žagalnem stroju. Najprej smo jih vzdolžno robili na enotno širino, ki je znašala $12 \pm 0,5$ mm. Nato smo jih čelili na enotno dolžino, ki je znašala 80 ± 2 mm. Nazadnje smo preizkušancem naredili še po eno zarezo na vsaki strani, kot je prikazano na sliki 17.



Slika 17: Oblika in dimenzije preizkušancev za ugotavljanje trdnosti lepilnega spoja pri vzdolžno natezno strižni obremenitvi (SIST EN 302-1:2004)

Po zgoraj navedenem postopku smo pripravili 60 preizkušancev. Trideset smo jih pred testiranjem 7 dni klimatiziral v klima komori pri standardnih pogojih, kot zahteva standard SIST EN 302-1 (2004) za razred A1. Preostalih trideset smo pripravili tako, da smo jih najprej 6 ur kuhali v vreli vodi, nato smo jih 2 uri hladili v vodi pri 20 °C ter jih nato sušili v standardni klimi, dokler niso dosegli mase, ki so jo imeli pred kuhanjem. Te pogoje predpisuje standard SIST EN 302-1 (2004) za razred A5.

3.2.3.2 Testiranje preizkušancev

Testiranje preizkušancev smo opravljali na univerzalnem testirnem stroju ZWICK Z 100. Delovanje stroja smo uravnavali s pomočjo programa testXpert II na osebni računalniku povezanem z univerzalnim testirnim strojem. Pred vsakim merjenjem smo v program vpisali širino preizkušanca ter razdaljo med zarezama. Preizkušance smo obremenjevali s konstantnim pomikom čeljusti 0,6 mm/min, da je prišlo do loma v 30 do 90 sekundah. Po končani meritvi nam je program avtomatično izpisal silo potrebno za lom ter izračunal strižno trdnost lepilnega spoja. Izračun je temeljil na enačbi (4).

$$f_v = \frac{F_{\max}}{b \times l_2} \quad \dots (4)$$

Kjer je:

- f_v ... strižna trdnost lepilnega spoja [N/mm^2]
- $F_{\max}$... sila, pri kateri je prišlo do loma [N]
- b ... širina preizkušanca [mm]
- l_2 ... razdalja med zarezaoma [mm]

Po strižnem testu lepilnega spoja smo za vsak preizkušanec posebej vizualno ocenili delež loma po bambusu.

Podatke za strižno trdnost lepilnega spoja ter za delež loma po bambusu smo med seboj statistično primerjali s T-testom. Skupine preizkušancev smo med seboj ločili po sledečih oznakah: oznaka »zn« je predstavljala preizkušance, ki so imeli v lepilnem spoju eno ploskev iz zunanjih, drugo pa iz notranjih plasti bambusa; oznaka »z« je predstavljala preizkušance, ki so imeli obe ploskvi lepilnega spoja iz zunanjih plasti stebela; oznaka »n« je predstavljala preizkušance, ki so imeli obe ploskvi lepilnega spoja iz notranjih plasti stebela. Poleg omenjenih oznak smo preizkušance med seboj ločili še z oznakama A1 in A5, odvisno od tega, ali so bili pripravljeni po navodilih za preizkusni razred A1 ali A5 standarda SIST EN 302-1 (2004).

3.2.4 Globina penetracije lepila

3.2.4.1 Izdelava preparatov

Za merjenje penetracije FF lepila v bambus smo morali izdelati preparate za mikroskopiranje. Preparate smo naredili iz preizkušancev, ki so ostali po testiranju strižne trdnosti lepilnega spoja za razred A1 (SIST EN 302-1: EN 302-1:2004). V vsaki skupini je bilo deset preizkušancev. Skupine so se med seboj razlikovale glede na to, katere plasti stebela bambusa so bile v lepilnem spoju. V prvi skupini so bili preizkušanci, ki so imeli v lepilnem spoju eno ploskev iz zunanjih, drugo iz notranjih plasti stebela. V drugi skupini so bili preizkušanci, ki so imeli obe ploskvi iz notranjih plasti stebela, v tretji skupini pa

preizkušanci, ki so imeli obe ploskvi lepilnega spoja iz zunanjih plasti stebela. Preizkušance smo najprej skrajšali, da smo jih lahko vpeli v mikrotom (LEICA SM 2000 R). Nato smo pričeli z rezanjem preparatov. Preparato smo rezali prečno na lepilni spoj. Po rezanju smo vsak preparat obarvali, da se je lepilo vizualno čim bolj ločilo od bambusa. Nazadnje smo preparate dali na urno steklo ter jih pokrili s krovnim steklom.

3.2.4.2 Slikanje – snemanje preparatov

Preparate za mikroskopiranje smo najprej pregledali pod svetlobnim mikroskopom Nikon Eclipse E 800. Preparat smo postavili na objektno mizico mikroskopa, da je bil lepilni spoj na sredini vidnega polja ter da je potekal v ravni liniji. Nato smo sliko izostrili in osvetlili. S premikanjem objektne mizice v vodoravni smeri smo se postavili na skrajni levi del preparata. Objektno mizico smo nato premikali od leve proti desni. V vidno polje mikroskopa smo vsakič zajeli nov del lepilnega spoja. Dolžina lepilnega spoja na preparatu je znašala 6 vidnih polj mikroskopa pri 4-kratni povečavi.

Nato smo na mikroskop pritrdili kamero PIXElink, PL-A66Z ter začeli z snemanjem oz. slikanjem preparatov. Kamera je bila povezana z osebnim računalnikom, s pomočjo katerega smo v programu Adobe Photoshop obdelovali slike. Za vsak preparat smo posneli šest slik. Tako smo dobili celotno mikroskopsko sliko lepilnega spoja enega preparata.

3.2.4.3 Merjenje globine penetracije lepila

Slike preparatov smo analizirali z računalniškim programom Image-Pro Plus 6.0. Za vsak preparat smo analizirali vseh šest slik. Najprej smo vsaki sliki s pomočjo barvnih filtrov in senčenja čim bolj poudarili lepilni spoj. Nato smo lepilni spoj izločili iz slike. Lepilo v lepilnem spoju je bilo na sliki obarvano črno. Program nam je nato izmeril ploščino vsakega objekta (FF lepila). Objekti so bili vsi s črno obarvani elementi na sliki. Pri tem smo imeli nekaj težav, saj so se nekatere celične in kemične komponente bambusa podobno obarvale kot FF lepilo. Podatke smo prenesli v program Microsoft Office Excel

2003 in izračunali efektivno penetracijo lepila v bambus. Izračun efektivne penetracije je temeljil na enačbi (5) (Šernek, 1999).

$$EP = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{x_0} \quad \dots (5)$$

Kjer je:

- EP ... efektivna penetracija [μm]
- A_i ... površina posameznega objekta [μm^2]
- n ... število objektov
- x_0 ... širina merilnega pravokotnika [μm]

Računalniški program Image-Pro Plus 6.0 vse meritve podaja v pikslih, zato smo morali enačbo (5) nekoliko prilagoditi. Najprej smo s pomočjo slike, na kateri je bila merilna skala, izračunali pretvornik iz pikslov v μm . En piksel je znašal 0,146 μm . Širina slike je znašala 1230 pikslov ali 179,58 μm . Efektivno globino penetracije za en preparat smo izračunali po enačbi (6).

$$EP = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{x_0 \times 6} \times 0,146 \quad \dots (6)$$

Kjer je:

- EP ... efektivna penetracija [μm]
- A_i ... površina posameznega objekta [piksel^2]
- x_0 ... širina merilnega pravokotnika [1230 pikslov]
- 0,146 ... pretvornik iz pikslov v μm [$\mu\text{m}/\text{piksel}$]

Vsota $\sum A_i$ v enačbi (6) je vsota plosčin vseh črnih objektov oziroma vsota vseh plosčin FF lepila na 6 slikah enega preparata. V enačbi (6) x_0 predstavlja širino enega merilnega

pravokotnika. Za vsak preparat smo imeli 6 slik, zato smo širino merilnega pravokotnika množili s 6. Enačbo za EP smo pomnožili s pretvornikom 0,146 μm /piksel, da smo dobili končni rezultat v μm .

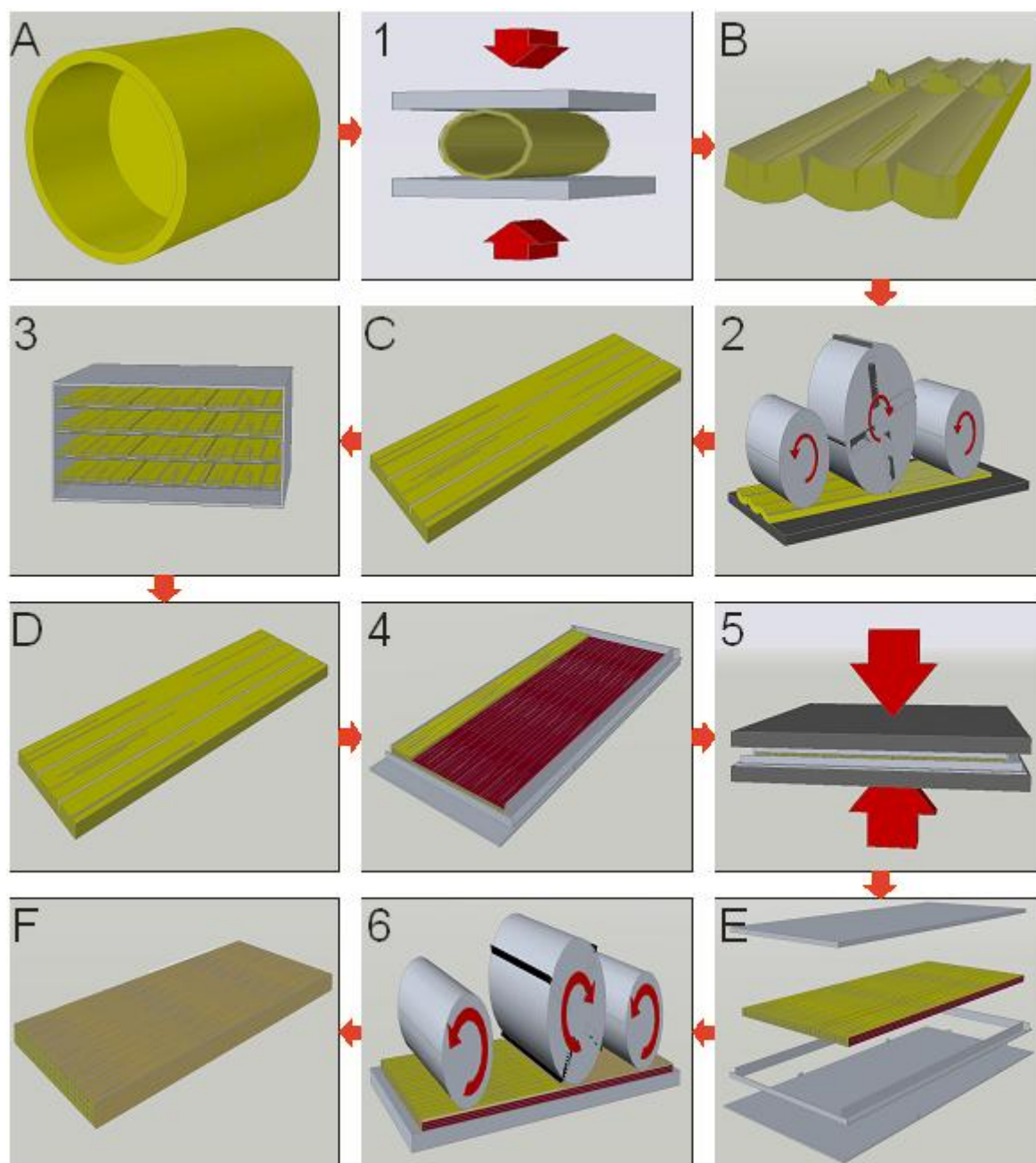
3.2.5 Slojnata bambusova plošča

3.2.5.1 Izdelava slojnate bambusove plošče

Izdelavo slojnate bambusove plošče smo poskušali čim bolj poenostaviti. Postopek, po katerem smo izdelali ploščo, je podoben postopku izdelave vezane bambusove plošče (Plybamboo). V primerjavi s postopkom izdelave vezane bambusove plošče smo izpustili segrevanje polovic ali tretjin bambusovih stebel v vreli vodi pri visoki temperaturi.

Za izdelavo slojnate bambusove plošče smo uporabili 0,5 m dolge spodnje dele bambusovih stebel, saj smo želeli dobiti čim debelejšje bambusove trakove. Na sliki 18 je prikazan postopek izdelave slojnate bambusove plošče. Stebla bambusa smo takoj po poseku olupili, nato smo jih pet mesecev sušili pri sobnih pogojih. Po petih mesecih smo 0,5 m dolga stebla bambusa vstavili v stiskalnico ter jih stisnili pri 50 bar. Iz vsakega stebila smo dobili dva ali več neobdelanih trakov (glej sliko 18 (B)). Neobdelanim bambusovim trakovom smo z dletom odstranili kolenca ter jih nato obojestransko poskobljali na debelinskem skobeljnem stroju. Trakov nismo skobljali na enako debelino, ampak smo pazili, da smo odstranili zgornjo in spodnjo plast stebila bambusa.

Obdelane bambusove trakove smo nato sušili v laboratorijskem sušilniku SO-250 N, proizvajalca Elektromedicina do absolutno suhega stanja. Sušili smo jih pri 50 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ ter pri maksimalni hitrosti kroženja zraka. Vlažnost trakov smo ugotavljali gravimetrično. Absolutno suhe trakove smo nato klimatizirali v klima komori VTRK-500 MU proizvajalca Heraeus-VÖTSCH na ravnovesno vlažnosti 8 %. Po klimatiziranju smo trakove sortirali v štiri debelinske razrede. V prvem razredu so bili trakovi tanjši od 3 mm, v drugem so bili trakovi debeli 3 mm do 4 mm, v tretjem 4 mm do 5 mm, v četrtem razredu so bili trakovi debelejši od 5 mm.



Slika 18: Tehnološki postopek izdelave slojnat bambusove plošče: stiskanje bambusovih stebel (1), skobljanje bambusovih trakov (2), sušenje in klimatiziranje trakov (3), zlaganje trakov v kalup in nanašanje lepila (4), stiskanje plošče (5), skobljanje neobdelane bambusove plošče (6), olupljeno bambusovo steblo (A), neobdelan bambusov trak (B), obojestransko poskobljan trak (C), obojestransko poskobljan trak z vlažnostjo 8 % (D), neobdelana bambusova slojnata plošča (E), obdelana bambusova slojnata plošča (F)

Vsaka plast plošče je bila iz trakov istega debelinskega razreda. Posamezno plast trakov smo zložili v kalup (slika 18 (4)) dimenzij 560 mm × 200 mm × 30 mm. Površine kalupa smo zaščitili s papirjem za peko, da se plošča med lepljenjem ni sprijela nanje. Ko smo

zložili eno plast trakov, smo nanjo nanесли FF lepilo TIP A, proizvajalca Fenolit. Nanos lepila je znašal 200 g/m^2 . Za posamezno plast plošče, s povprečno površino $0,1 \text{ m}^2$, smo porabili 20 g lepila. Ko je bila plošča sestavljena, smo čez kalup postavili železno ploščo dimenzij $500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ter vse skupaj vstavili v stiskalnico. Temperatura plošč stiskalnice je znašala $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Čas stiskanja plošče je znašal 1080 s. Specifični tlak stiskanja je znašal 15 bar do 20 bar. Izdelane slojnatе bambusove plošče so imele 4 ali 5 slojev. Število slojev v plošči smo prilagajali glede na debelino trakov v njej.

3.2.5.2 Ugotavljanje upogibne trdnosti slojnatе bambusove plošče

Upogibno trdnost slojnatе bambusove plošče smo ugotavljali po standardu SIST EN 310 (1993). Po stiskanju smo plošče en dan ohlajali v prostoru pri sobnih pogojih ter nato iz njih izžagali lamele, ki smo jih potrebovali za testiranje. Lamele smo nato na debelinskem skobeljnem stroju poskobljali na enotno debelino, ki je znašala 17 mm. Dolžina lamel je po standardu SIST EN 310 (1993) morala znašati 390 mm, širina pa $50 \pm 1 \text{ mm}$. Lamele smo nato klimatizirali do njihovega uravnoteženja v klima komori VTRK-500 MU proizvajalca Heraeus-VÖTSCH pri standardnih pogojih.

Lamele smo testirali na univerzalnem testirnem stroju ZWICK Z 100. Predpisana razdalja (SIST EN 310, 1993) med podporami je znašala 340 mm. Sprememba sile, s katero smo obremenjevali lamele je standardizirana in je bila taka, da je do loma prišlo po 30 s do 90 s. Univerzalni testirni stroj je bil povezan z osebnim računalnikom. S pomočjo računalniškega programa testXpert II smo uravnavali parametre merjenja. Program nam je po končani meritvi izpisal silo, pri kateri je prišlo do loma, ter izračunal modul elastičnosti in upogibno trdnost posamezne lamele. Izračun modula elastičnosti in upogibne trdnosti je temeljil na enačbah 7 in 8:

$$E_m = \frac{l_1^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t^3 \times (a_2 - a_1)} \quad \dots (7)$$

Kjer je:

- E_m ... modul elastičnosti [N/mm²]
- l_1 ... razdalja med podporama [mm]; $l_1 = t \times 20$
- b ... širina lamele [mm]
- t ... debelina lamele [mm]
- $F_1 \approx 0,1 \times F_{\max}$ [N]
- $F_2 \approx 0,4 \times F_{\max}$ [N]
- $F_{\max}$... maksimalna sila [N]
- a_1 ... deformacija, ki jo povzroči sila F_1 [mm]
- a_2 ... deformacija, ki jo povzroči sila F_2 [mm]

$$f_m = \frac{3 \times F_{\max} \times l_1}{2 \times b \times t^2} \quad \dots (8)$$

Kjer je:

- f_m ... upogibna trdnost [N/mm²]
- $F_{\max}$... maksimalna sila [N]
- l_1 ... razdalja med podporama [mm]; $l_1 = t \times 20$
- b ... širina lamele [mm]
- t ... debelina lamele [mm]

Lamele smo nato stehali. S pomočjo mase in že prej izmerjenih dimenzij smo po enačbi (9) izračunali gostoto vsake lamele.

$$\delta = \frac{m \times 10^{-3}}{l \times b \times t \times 10^{-9}} \quad \dots (9)$$

Kjer je:

- δ ... gostota lamele [kg/m^3]
- m ... masa lamele [g]
- l ... dolžina lamele [mm]
- b ... širina lamele [mm]
- t ... debelina lamele [mm]

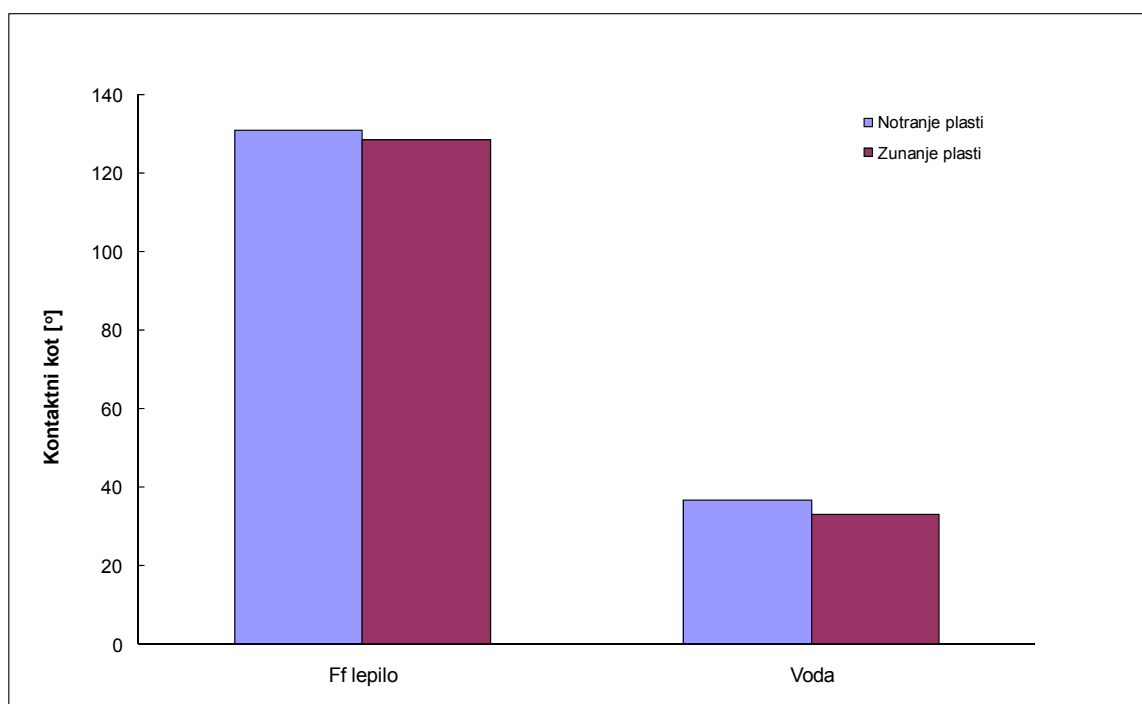
4 REZULTATI

4.1 KONTAKTNI KOT

V preglednici 2 so predstavljeni statistični parametri kontaktnih kotov FF lepila in vode na sveže zbrušenih površinah iz bambusa. Izračunani so iz podatkov v prilogah A1, A2, A3, A4. Graf na sliki 19 prikazuje povprečne vrednosti kontaktnih kotov FF lepila in destilirane vode na površinah bambusa iz notranjih in zunanjih plasti stebela.

Preglednica 1: Rezultati kontaktnih kotov [°] FF lepila in vode na površinah iz različnih plasti stebela bambusa (N=30)

Vrste medija in preizkušane plasti stebela		Statistični parametri kontaktnih kotov [°]				
		Najmanjša vrednost	Največja vrednost	Povprečna vrednost	Standardni odklon	Koeficient variacije [%]
FF lepilo	Zunanje plasti stebela	117,6	133,1	128,4	4,4	3,4
	Notranje plasti stebela	123,8	140,3	130,9	5,6	4,3
Voda	Zunanje plasti stebela	32,9	43,1	36,8	5,5	7,4
	Notranje plasti stebela	25,2	39,7	33,1	7,4	22,2

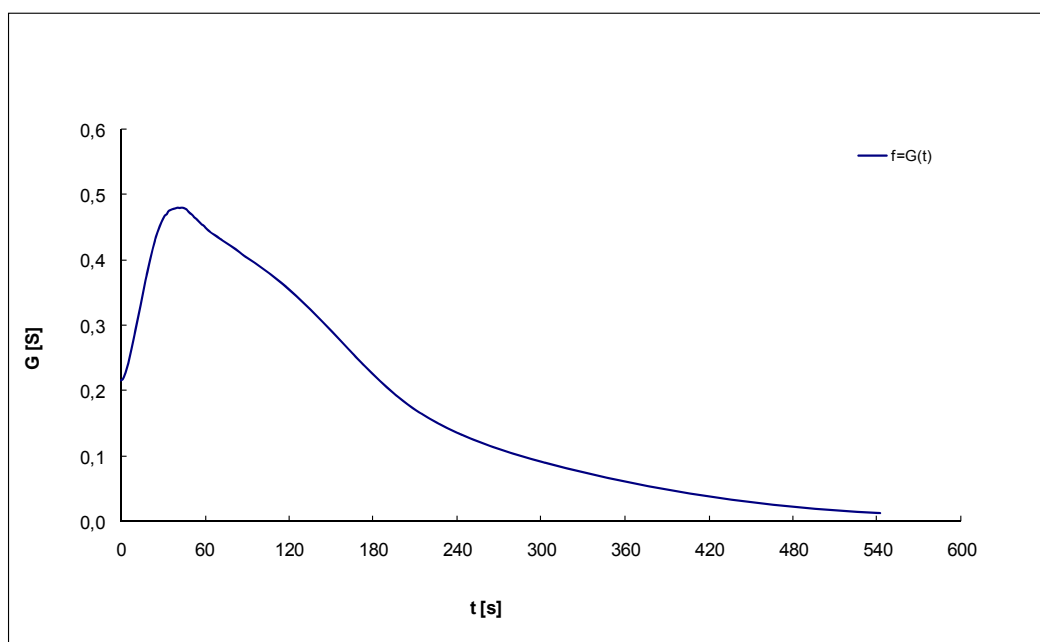


Slika 19: Povprečne vrednosti kontaktnih kotov [°] FF lepila in destilirane vode na površinah iz različnih plasti stebela bambusa

Razlika med povprečnima vrednostma kontaktnih kotov FF lepila na površinah iz zunanjih oz. notranjih plasti stebela je znašala 2,5 ° ter ni bila statistično značilna ($p=0,278$). Razlika med povprečnima vrednostma kontaktnih kotov vode na površinah iz zunanjih in notranjih plasti stebela je znašala 3,7 ° ter prav tako ni bila statistično značilna ($p=0,521$).

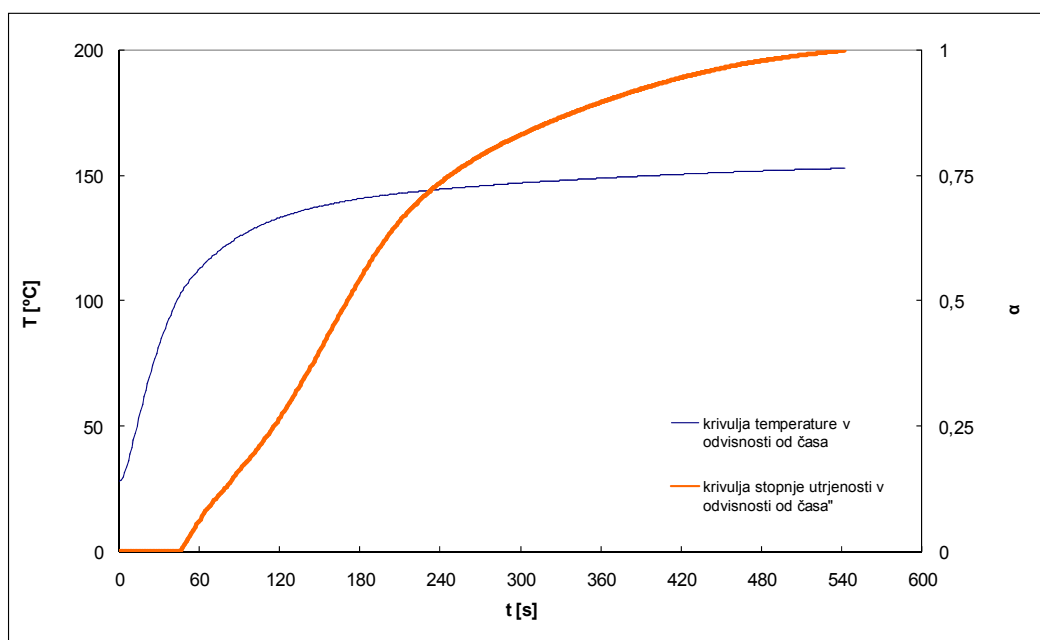
4.2 SPREMLJANJE UTRJEVANJA LEPILA Z DIELEKTRIČNO ANALIZO

Podatki za prevodnost (G) FF lepila v lepilnem spoju v odvisnosti od časa so predstavljeni na grafu na sliki 20. Iz grafa je razvidno, da je prevodnost najprej naraščala ter po 33 s dosegla največjo vrednost. Nato je prevodnost začela padati, najprej hitreje, nato počasneje, po 500 s je bila skoraj konstantna.



Slika 20: Prevodnost (G [S]) FF lepila v lepilnem spoju v odvisnosti od časa utrjevanja

Na grafu na sliki 21 so predstavljeni podatki za stopnjo utrjenosti (α) FF lepila v lepilnem spoju v odvisnosti od časa utrjevanja in za temperaturo (T) v lepilnem spoju v odvisnosti od časa utrjevanja.



Slika 21: Stopnja utrjenosti (α) FF lepila v lepilnem spoju in temperatura (T [°C]) v lepilnem spoju v odvisnosti od časa utrjevanja

Na začetku je temperatura v lepilnem spoju hitro naraščala, nato je bilo njeno naraščanje počasnejše, nakar se je po 400 s počasi ustalila. Stopnja utrjenosti je začela naraščati šele po 33 s. Ta čas je sorazmeren s časom, ko je prevodnost lepila dosegla najvišjo vrednost. Stopnja utrjenosti je na začetku naraščala hitreje, po približno 350 s se je njeno naraščanje umirilo. Pri 542 s je dosegla vrednost 1.

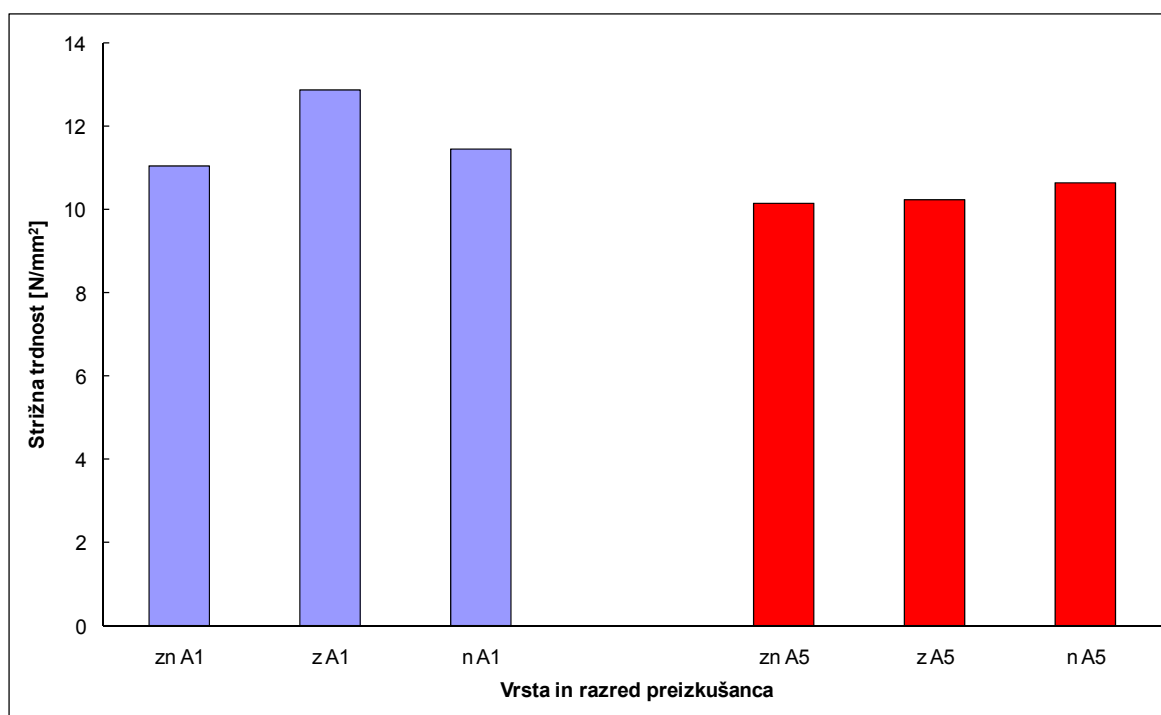
4.3 STRIŽNA TRDNOST LEPILNEGA SPOJA

V prilogah B1, B2 so navedene dimenzije strižnih ravnin, vrednosti za silo loma lepilnega spoja, strižne trdnosti lepilnega spoja ter vrednosti za delež loma po bambusu. V prilogi B1 so vrednosti, ki smo jih dobili pri meritvah po pogojih za preizkusni razred A1 standarda SIST EN 302-1 (2004). Vrednosti v prilogi B2 smo dobili pri meritvah po pogojih za preizkusni razred A5. V preglednici 3 so prikazani statistični parametri strižne trdnosti lepilnega spoja (f_v) ter deleža loma po bambusu (D. l. b.).

Preglednica 2: Statistični parametri za strižno trdnost lepilnega spoja (f_v [N/mm²]) in delež loma po bambusu (D. l. b. [%]) glede na plasti stebela v lepilnem spoju ter glede na preizkusni razred (N=60)

Preizkusni razred	Plasti stebela v lepilnem spoju	Statistični parametri	f_v [N/mm ²]	D. l. b. [%]
Preizkusni razred A1	Zunanje-notranje (zn)	Najmanjša vrednost	9,4	70
		Največja vrednost	12,8	100
		Povprečna vrednost	11,0	90
		Standardni odklon	1,2	14
		Koeficient variacije [%]	10,6	16
	Zunanje-zunanje (z)	Najmanjša vrednost	10,7	60
		Največja vrednost	15,0	100
		Povprečna vrednost	12,9	94
		Standardni odklon	1,5	13
		Koeficient variacije [%]	11,6	14
	Notranje-notranje (n)	Najmanjša vrednost	8,2	90
		Največja vrednost	13,3	100
		Povprečna vrednost	11,5	99
		Standardni odklon	1,7	3
		Koeficient variacije [%]	14,4	3
Preizkusni razred A5	Zunanje-notranje (zn)	Najmanjša vrednost	4,5	70
		Največja vrednost	12,4	100
		Povprečna vrednost	10,1	92
		Standardni odklon	2,1	11
		Koeficient variacije [%]	21,2	12
	Zunanje-zunanje (z)	Najmanjša vrednost	8,74	70
		Največja vrednost	13	100
		Povprečna vrednost	10,2	95
		Standardni odklon	1,2	10
		Koeficient variacije [%]	11,9	10
	Notranje-notranje (n)	Najmanjša vrednost	7,8	80
		Največja vrednost	11,8	100
		Povprečna vrednost	10,6	98
		Standardni odklon	1,4	6
		Koeficient variacije [%]	13,6	7

Najmanjša izmerjena strižna trdnost FF lepilnega spoja je bila v skupini preizkušancev, kjer so bile lepilne ploskve iz zunanjih in notranjih plasti stebila, pripravljene po pogojih za preizkusni razred A5, in je znašala 4,5 N/mm². Največja izmerjena vrednost je bila v skupini preizkušancev, kjer so bile lepilne ploskve iz zunanjih plasti stebila bambusa, pripravljene po pogojih za preizkusni razred A1, ter je znašala 15,0 N/mm². Povprečna vrednost vseh meritev je znaša 11,1 N/mm². Na sliki 22 je predstavljen graf, na katerem so povprečne vrednosti strižne trdnosti FF lepilnih spojev preizkušancev iz bambusa.



Slika 22: Povprečna strižna trdnost FF lepilnih spojev, v katerih so bile lepilne ploskve iz različnih plasti bambusa, za preizkusna razreda A1 in A5 po standardu SIST EN 302-1

Povprečne vrednosti deleža loma po bambusu niso pri nobeni skupini padle pod 90 %. Razlika med najmanjšim in največjim deležem loma po bambusu za preizkušance razreda A1 je bila 40 %. Razlika med najmanjšim in največjim deležem loma po bambusu za preizkušance razreda A5 je bila 30 %.

V preglednici 4 so prikazani rezultati T-testov. S T-testom smo primerjali podatke za strižno trdnost lepilnega spoja ter delež loma po bambusu iz prilog B1 in B2.

Preglednica 3: T-testi razlik strižne trdnosti lepilnega spoja ($T\text{-test}_{fv}$) in deleža loma po bambusu ($T\text{-test}_{D.l.b.}$)

T-test/skupini preizkušancev	p_{fv}	$p_{D.l.b.}$
znA1-zA1	0,007	0,513
zA1-nA1	0,059	0,241
nA1-znA1	0,534	0,065
znA5-zA5	0,909	0,534
zA5-nA5	0,497	0,424
nA5-znA5	0,545	0,162
znA1-znA5	0,259	0,731
zA1-zA5	0,001	0,845
nA1-nA5	0,262	0,660

Iz preglednice 4 je razvidno, da je pri primerjavi povprečne vrednosti strižne trdnosti lepilnega spoja s T-testom prišlo do statistično značilne razlike med skupinami preizkušancev znA1 in zA1, zA1 in zA5. Statistično značilni razliki sta se približali povprečni vrednosti skupin zA1 in nA1. Pri primerjavi povprečnih vrednosti deleža loma po bambusu nismo dobili statistično značilne razlike. V tem primeru sta se ji približali le povprečni vrednosti skupin nA1 in znA1.

4.4 GLOBINA PENETRACIJE FF LEPILA

V preglednici 5 so prikazani statistični parametri za globino penetracije FF lepila v plasti stebela bambusa. Izračunani so iz podatkov, ki so v prilogi C1.

V preglednici 5 lahko vidimo, da je razlika v povprečnih vrednostih globine penetracije pri preizkušancih, ki so imeli obe lepilni ploskvi iz notranjih plasti stebela bambusa in tistimi, ki so imeli obe lepilni ploskvi iz zunanjih plasti stebela, znašala 0,86 μm . Povprečni globini penetracije pri preizkušancih z lepilnima ploskvama iz zunanjih in notranjih plasti stebela ter preizkušancev z lepilnima ploskvama iz zunanjih plasti stebela sta se razlikovali za 0,54

μm . Razlika v povprečni globini penetracije med preizkušanci z lepilnima ploskvama iz notranjih in zunanjih plasti stebela ter preizkušanci z lepilnima ploskvama iz notranjih plasti stebela je znašala $0,40 \mu\text{m}$.

Preglednica 4: Statistični parametri za globino penetracije [μm] glede na plasti stebela bambusa v lepilnem spoju (N=30)

Globina penetracije [μm] glede na plasti stebela bambusa v lepilnem spoju			
Statistični parametri	Zunanje-notranje	Zunanje-zunanje	Notranje-notranje
Najmanjša vrednost	1,61	0,69	1,29
Največja vrednost	2,72	2,53	3,42
Povprečna vrednost	2,08	1,54	2,41
Standardni odklon	0,37	0,50	0,69
Koeficient variacije [%]	17,58	32,42	28,81

V prilogi C1 so navedene globine penetracije FF lepila v treh različnih skupinah preizkušancev glede na plasti stebela v lepilnem spoju. V preglednici 6 so rezultati T-testov, ki so bili izračunani za globino penetracije različnih skupin preizkušancev.

Preglednica 5: T-testi razlik v globini penetracije FF lepila med različnimi skupinami preizkušancev glede na plasti stebela bambusa v lepilnem spoju

Skupini preizkušancev	p
Zunanje-notranje – zunanje-zunanje	0,017
Zunanje-notranje – notranje-notranje	0,226
Zunanje-zunanje – notranje-notranje	0,005

Statistično značilna razlika je bila med skupino preizkušancev, ki so imeli eno lepilno ploskev iz zunanjih, drugo iz notranjih plasti stebela, in skupino preizkušancev, kjer sta bili obe lepilni ploskvi iz zunanjih plasti stebela. Med skupino preizkušancev, kjer sta bili obe lepilni ploskvi iz notranjih plasti stebela, in skupino preizkušancev, kjer sta bili obe lepilni ploskvi iz zunanjih plasti stebela, je prav tako bila statistično značilna razlika.

4.5 SLOJNATA BAMBUSOVA PLOŠČA

V preglednici 7 so podani modul elastičnosti, upogibna trdnost in gostota šestih lamel, izžaganih iz slojnatih bambusovih plošč. Ostale veličine lamel so podane v prilogi D1.

Preglednica 6: Modul elastičnosti (E_m [N/mm²]), upogibna trdnost (f_m [N/mm²]), gostota (δ [kg/m³]) ter statistični parametri šestih lamel, izžaganih iz slojnatih bambusovih plošč

	Št. preizkušanca	E_m [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	δ [kg/m ³]
	1	14400	153	722
	2	11600	103	681
	3	15800	170	772
	4	14500	171	736
	5	16000	200	714
	6	14700	168	738
Statistični parametri	Najmanjša vrednost	11600	103	681,0
	Največja vrednost	16000	200	772,0
	Povprečna vrednost	14325	159	727,2
	Standardni odklon	1575	32	30,1
	Koeficient variacije [%]	11	20	4,1

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 KONTAKTNI KOT

Kontaktne kote FF lepila so bili večji od kontaktnih kotov vode. To smo pričakovali, ker ima voda nižjo viskoznost od FF lepila.

Velikost kontaktnih kotov FF lepila ter vode se ni bistveno razlikovala glede na to, ali so bile površine iz notranjih ali zunanjih plasti bambusa. Majhne razlike v kontaktnih kotih FF lepila na površinah iz različnih plasti bambusa olajšajo postopek izdelave lepljenega kompozita. Lamele ali trakove iz bambusa lahko v lepljenem kompozitu poljubno obračamo, ker se z vidika kontaktnega kota vse plasti podobno omočijo oz. lepijo.

Rezultati kontaktnih kotov FF lepila na površinah iz bambusa so bili precej visoki. Marra (1992) navaja, da je pri kontaktnem kotu nad 90° zelo majhna privlačnost med lepilom in površino lesa, zato se v tem primeru lepilo slabo razlije po površini. To prispeva k slabši omočitvi površine in slabši adheziji med lepilom in lesom. Slaba omočitev površine bambusa lahko povzroči težave pri oblepljanju površine, zato je smiselno poiskati rešitve, ki bolj aktivirajo površino bambusa oz. bolj privlačijo molekule lepila. Li in Shupe (2004) sta merila kontaktne kote FF lepila na površinah treh vrst bambusa iz Hondurasa. Preizkušance sta po poseku in pripravi lamel 30 min namakala v kopeli 0,1 M HCl ali kopeli 0,1 M NaOH ali destilirani vodi pri 60°C . Ko so se lamele posušile na primerno vlažnost, sta izmerila kontaktne kote. Kontaktne kote, ki sta jih izmerila, so bili na intervalu med $63,9^\circ$ in $77,7^\circ$. Mi smo izmerili za $53,7^\circ$ do $62,6^\circ$ večje kontaktne kote. Potrebno je poudariti, da sta uporabila druge vrste bambusa kot mi. Vendar ni pričakovati, da bi se struktura bambusa med posameznimi vrstami tako razlikovala, da bi bili kontaktne kote na njihovih površinah v razponu od 60° do 140° . Iz tega lahko sklepamo, da predhodna kemična obdelava površin bambusa vpliva na zmanjšanje kontaktnih kotov na njih.

Z namakanjem bambusovih trakov v vodni kopeli pri 60 °C bi, glede na rezultate Li in Shupe (2004), dosegli manjše kontaktne kote FF lepila na površini bambusa, iz katerega smo izdelali slojnete bambusove plošče.

5.2 SPREMLJANJE UTRJEVANJA LEPILA Z DIELEKTRIČNO ANALIZO

Povečanje prevodnosti FF lepila v spoju je posledica segrevanja lepila, ki postane bolj viskozno. Predpostavili smo, da se utrjevanje FF lepila začne šele, ko se lepilni spoj segreje na zadostno temperaturo in sicer je bilo to takrat, ko je prevodnost začela padati. Počasnejše padanje prevodnosti oziroma skoraj konstantna prevodnost v lepilnem spoju nam je nakazala, da so se procesi v utrjujočem FF lepilu umirili. Prevodnost FF lepila se je po 500 s ustalila, zato smo z meritvami zaključili po 542 s.

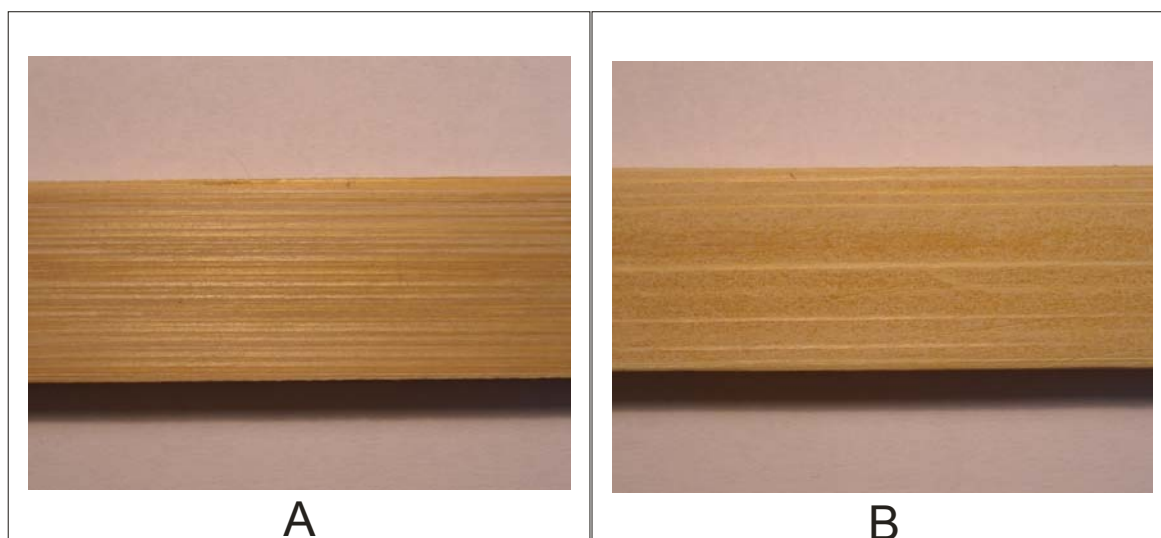
Zaradi postopnega prehoda toplote s plošč stiskalnice skozi bambus do lepilnega spoja je bilo naraščanje temperature v lepilnem spoju postopno. Toplotni tok teži k izenačevanju temperature med eno in drugo točko. Večja kot je temperaturna razlika med točkama, hitrejši je toplotni tok. Na začetku je bila razlika v temperaturi plošč stiskalnice in lepilnega spoja večja, zato je temperatura v lepilnem spoju naraščala hitreje.

Stopnjo utrjenosti lepila v lepilnem spoju smo po enačbi (3) računali glede na največjo in najmanjšo izmerjeno prevodnost lepila. Pri največji izmerjeni prevodnosti je bila stopnja utrjenosti 0, pri najmanjši pa 1. Enačba (3) je nekoliko poenostavljena, saj predpostavlja, da je reakcija utrjevanja zanemarljiva, vse dokler prevodnost ne doseže maksimalne vrednosti ($G_{\max}$). Do te točke je stopnja utrjenosti 0. Stopnja utrjenosti lepila je po 542 s dosegla 1, ker smo takrat izmerili najnižjo prevodnost. Če bi prevodnost merili več časa, bi stopnja utrjenosti dosegla vrednost 1 kasneje. V tem primeru bi se krivulja stopnje utrjenosti v odvisnosti od časa počasneje približevala vrednosti 1. Stopnja utrjenosti lepilnega spoja je po 420 sekundah dosegla vrednost 0,95. Menili smo, da je taka stopnja utrjenosti lepila dovolj visoka za zagotovitev ustrezne trdnosti ter da čas stiskanja lamel lahko znaša 420 s.

5.3 STRIŽNA TRDNOST LEPILNEGA SPOJA

Ugotovili smo, da se povprečne vrednosti strižne trdnosti za posamezno skupino preizkušancev nekoliko razlikujejo. Povprečne vrednosti za preizkušance preizkusnega razreda A5 so nižje od povprečnih vrednosti za preizkušance razreda A1. To smo tudi pričakovali, saj so preizkusni pogoji razreda A5 bolj ostri od pogojev razreda A1.

Preizkušance smo testirali v dveh preizkusnih razredih, da bi ugotovili, kako se različne plasti bambusa lepijo, oziroma da bi razlike lažje zaznali, jih ovrednotili ter uporabili pri izdelavi lepljenega kompozita iz bambusa. Iz povprečnih vrednosti ni razvidno, da se je katera od plasti stebela bambusa boljše lepila od preostalih. Najvišjo povprečno strižno trdnost pri preizkusu za preizkusni razred A1 so dosegli preizkušanci, ki so imeli v lepilnem spoju površine iz zunanjih plasti stebela. Pri preizkusu za preizkusni razred A5 so največjo natezno strižno trdnost dosegli preizkušanci, ki so imeli v lepilnem spoju površine iz notranjih plasti stebela. Predvidevali smo, da bodo lepilni spoji s površinami iz zunanjih plasti dosegli bistveno drugačne strižne trdnosti od lepilnih spojev s površinami iz notranjih plasti stebela bambusa. Razliko smo pričakovali zaradi različne strukture materiala notranjih oziroma zunanjih plasti stebela. Drugačna struktura materiala je vidna že s prostim očesom (slika 23).



Slika 23: Površina iz zunanjih plasti stebela bambusa (A), površina iz notranjih plasti stebela bambusa (B)

Rezultati T-testov v preglednici 4 so zanimivi, ker so se statistično značilne razlike med skupinami pojavljale, kjer ne bi pričakovali. Na primer statistično značilna razlika je bila med povprečnima vrednostma skupin preizkušancev znA1 in zA1. Statistično značilno razliko bi zaradi večje razlike v strukturi bambusa pričakovali tudi med povprečnima vrednostma skupin rezultatov zA1 in nA1, kjer pa je ni bilo.

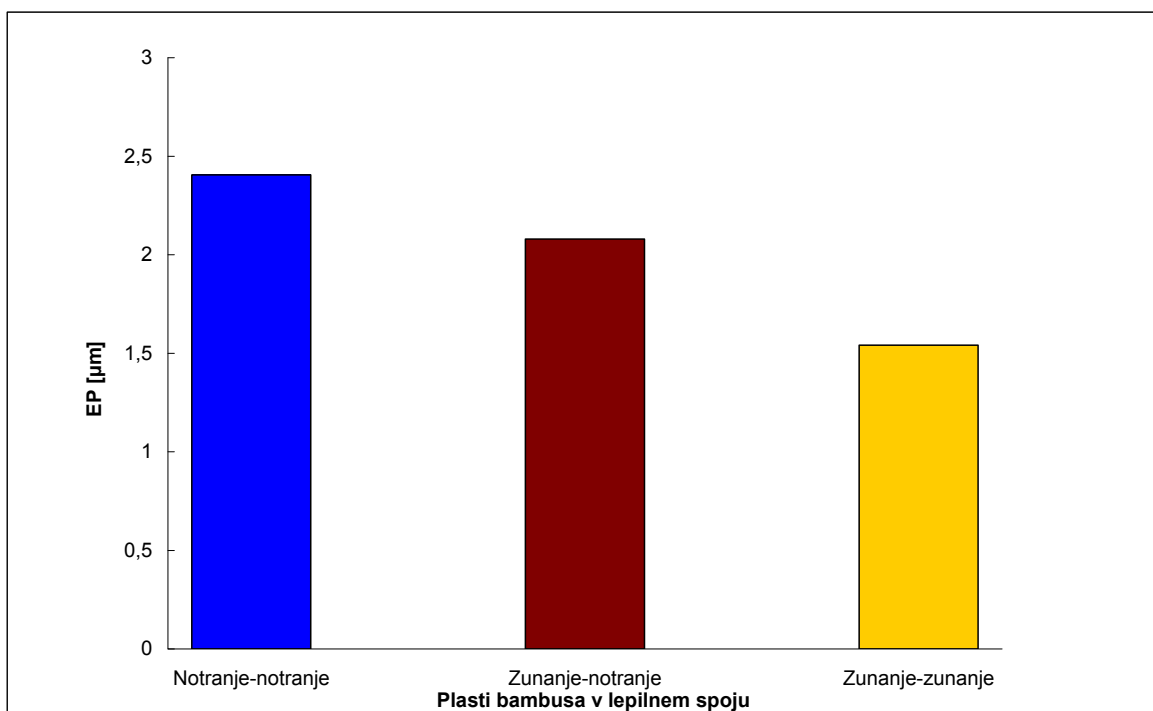
Razlog, da nismo zaznali razlik v strižni trdnosti lepilnega spoja glede na strukturo materiala v lepilni ploskvi, je lahko večkratno skobljanje lamel. S skobljanjem smo odstranili skrajno zunanje in skrajno notranje plasti bambusa, med katerimi so razlike v strukturi materiala največje. Drug razlog je lahko premajhno število rezultatov za posamezno skupino preizkušancev. Pri tako majhnem številu rezultatov so statistične obdelave podatkov manj zanesljive.

Vsi lepilni spoji so dosegli zadovoljive ali celo nadpovprečne strižne trdnosti. Povprečna vrednost vseh meritev je znaša $11,1 \text{ N/mm}^2$, najmanjša izmerjena vrednost je bila $4,5 \text{ N/mm}^2$, največja pa $15,0 \text{ N/mm}^2$. Jošt in Šernek (2008) navajata, da je maksimalna strižna trdnost izmerjena po metodi ABES (automatic bonding evaluation system) za to lepilo znašala $8,9 \text{ N/mm}^2$. Preizkus sta izvajala z $1,1 \text{ mm}$ debelim in 30 mm širokim bukovim furnirjem.

Drugi pokazatelj kvalitete lepilnega spoja je odstotek loma po bambusu. Čim višji je, tem boljši je lepilni spoj. Na primer 100% lom po bambusu potrjuje, da je lepilni spoj prenesel večje obremenitve kot bambus. Pri beleženju odstotka loma po bambusu smo opazili, da je lepilni spoj dobro držal. Povprečne vrednosti za omenjeni kazalnik kvalitete lepljenja niso padle pod 90% . Pri statistični primerjavi podatkov za odstotek loma po bambusu smo ugotovili, da med povprečnimi vrednostmi različnih skupin preizkušancev ni bilo statistično značilne razlike. To pomeni, da je bil odstotek loma po bambusu neodvisen od plasti bambusa v lepilnem spoju.

5.4 GLOBINA PENETRACIJE FF LEPILA

Graf na sliki 24 prikazuje povprečno efektivno penetracijo FF lepila v bambus. Opazimo lahko, da je bila le-ta nizka v primerjavi z efektivno penetracijo lepila v les, kjer lahko dosežemo globino tudi nekaj deset μm . V raziskavi bambusa *Dendrocalamus strictus* sta Ahmad in Kamke (2000) proučevala penetracijo FF lepila v omenjeni bambus. Izmerila sta skoraj 5-krat večjo maksimalno globino penetracije kot mi.

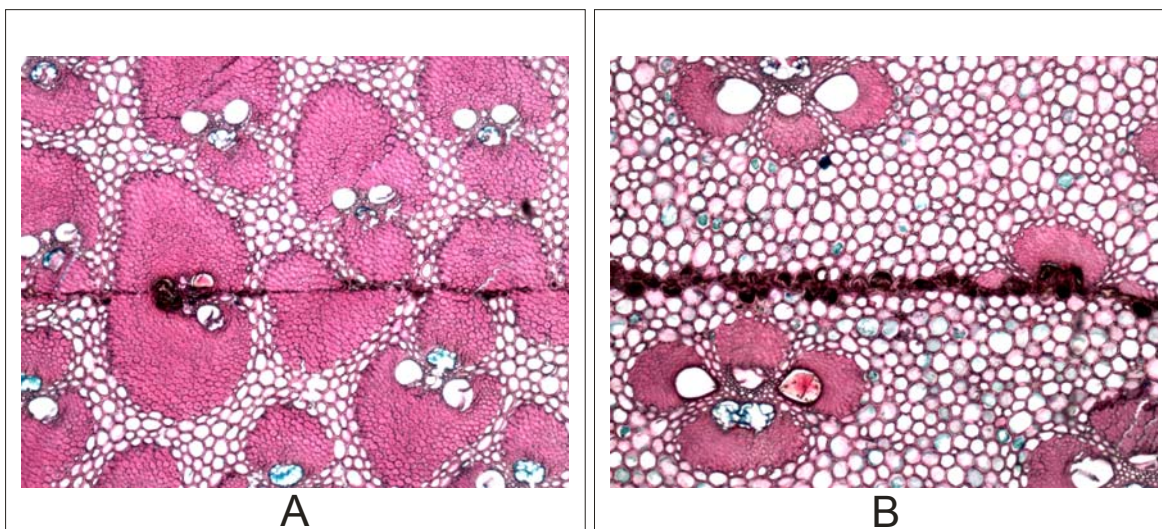


Slika 24: Povprečna globina efektivne penetracije (EP [μm]) FF lepila v različne plasti stebela bambusa

Povprečna efektivna globina penetracije FF lepila v lepilnih spojih iz notranjih plasti je bila večja od povprečne efektivne penetracije v lepilnih spojih iz zunanjih plasti stebela. Razlika je bila tako velika, da statistično lahko trdimo, da so imeli preizkušanci ene skupine drugačno strukturo kot preizkušanci iz druge skupine. Povprečna efektivna globina penetracije v lepilnih spojih iz zunanjih in notranjih plasti stebela je bila večja od povprečne efektivne penetracije v lepilnih spojih iz zunanjih plasti stebela. Tudi v tem primeru je bila razlika tako velika, da lahko trdimo, da so imeli preizkušanci iz prve skupine statistično drugačno strukturo kot preizkušanci iz druge skupine.

Lepilo je na sliki 25 obarvano s črno barvo. Opazimo lahko, da je lepilo prodrlo samo v površinski sloj celic in da je v različne tipe celic prodrlo različno. V parenhimske celice ter v celice prevodnega tkiva je prodrlo in zapolnilo lumne. V celice spremljevalke in vlakna zaradi majhnih lumnov lepilo ni prodrlo.

Zunanje plasti bambusovega stebela imajo večje število manjših celic prevodnega tkiva in s tem večje število celic spremljevalk in vlaken, v katere lepilo ne more prodreti. Parenhimske celice in celice prevodnega tkiva zunanjih plasti bambusa imajo manjši premer, zato vanje prodre manj lepila. To sta poglavitna vzroka za slabšo penetracijo lepila v zunanje plasti bambusa. Te razlike lahko opazimo na sliki 25, kjer sta prikazana lepilni spoj iz zunanjih plasti stebela bambusa (A) in lepilni spoj iz notranjih plasti stebela bambusa (B).



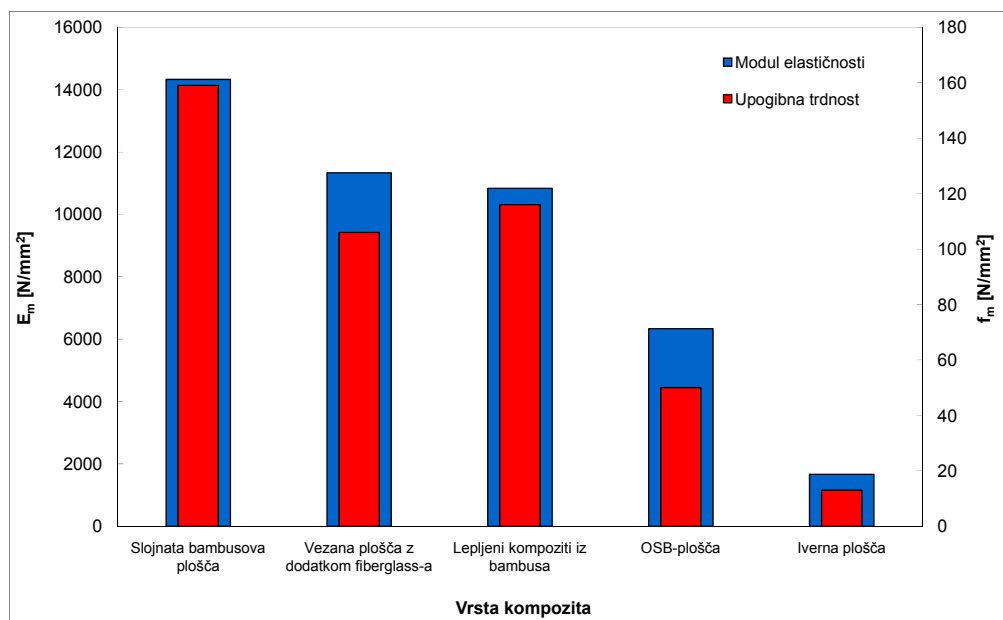
Slika 25: Preparata narejena iz prečnega preseka lepljenca pri 4-kratni povečavi: lepilni spoj iz zunanjih plasti stebela bambusa (A), lepilni spoj iz notranjih plasti stebela bambusa (B)

5.5 SLOJNATA BAMBUSOVA PLOŠČA



Slika 26: Slojnata bambusova plošča

Na sliki 26 je slojnata bambusova plošča, ki smo jo izdelali v okviru raziskave. Na sliki 27 je prikazana primerjava za povprečno upogibno trdnost in modul elastičnosti med izdelano slojnato bambusovo ploščo in drugimi lepljenimi lesnimi kompoziti.

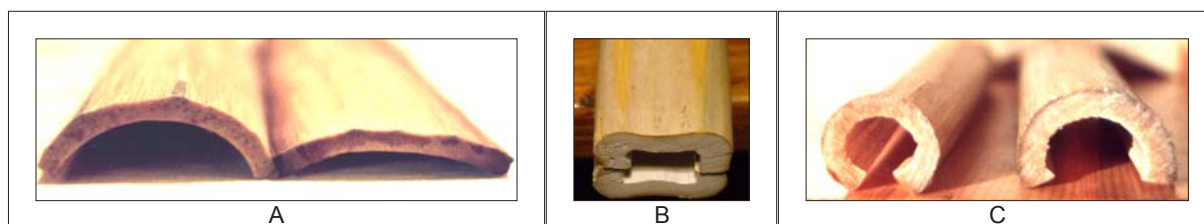


Slika 27: Upogibna trdnost (f_v [N/mm²]) (A) ter modul elastičnosti (E_m [N/mm²]) (B) za nekatere lepljene kompozite iz lesa in bambusa (Surova iv. pl., 2008; OSB, 2006; Hrazsky in Kral, 2007; Zheng in Chen, 2008)

Na sliki 27 lahko opazimo, da je izdelan lepljen kompozit iz bambusa dosegel visoko upogibno trdnost in elastični modul. Take rezultate smo dobili zaradi izdelave plošče iz vzdolžnih trakov in testiranja plošče vzdolžno s potekom vlaken. Realnejšo sliko o izdelani slojnati bambusovi plošči bi dobili, če bi izvedli še teste tlačne, razslojne in strižne trdnosti.

V postopku izdelave slojnate bambusove plošče smo polovice bambusovih stebel hladno stiskali, da smo jih porušili in iz njih dobili trakove. Zaradi tega so bile površinske razpoke bambusovih trakov večje, kot če bi jih vroče stiskali. Večje površinske razpoke so povzročile večjo porabo lepila ter zmanjšale estetsko vrednost plošče.

Izdelane slojnate bambusove plošče bi lahko glede na njihove lastnosti uporabili za širok nabor končnih izdelkov. Plošče s tako upogibno trdnostjo bi lahko uporabili za dno vseh vrst transportnih sredstev, industrijske pode ter za elemente, kjer se pojavljajo visoke obremenitve. Visok modul elastičnosti nakazuje morebitno uporabo takih plošč za športne rekvizite, kjer so velike obremenitve, kot na primer deske za rolke, smuči in snežne deske. Preden smo izdelali slojnato bambusovo ploščo, smo razmišljali o izdelavi lepljenega kompozita drugačne zasnove in oblike. Ukvarjali smo se s sploščevanjem polovic stebel bambusa. Polovice bambusovih stebel smo segrevali v vrelem jedilnem olju ali v pečici pri 150 °C ter jih med segrevanjem obtežili. Nato smo želeli vzgojiti bambusova stebela kvadratne oblike (slika 28 (B)) ter jih zlepi v ploščo. Noben od prej omenjenih poskusov ni uspel. Stebla smo le delno sploščili (slika 28 (A), (C)). Vzgojili smo premalo kvadratnih stebel bambusa. S sploščevanjem in vzgajanjem stebel kvadratnih oblik smo se ukvarjali, ker se iz bambusa, ki smo ga imeli na razpolago, težko izdelala lamele, primerne za lepljene plošče.



Slika 28: Polovice bambusovega stebela pred (levo) in po (desno) segrevanju in sploščevanju v pečici (A), kos bambusovega stebela kvadratne oblike (B), polovice bambusovega stebela po segrevanju in sploščevanju v vrelem olju (C)

5.6 SKLEPI

Glavne rezultate raziskovalnega dela v okviru opravljene diplomske naloge lahko povzamemo v naslednjih ugotovitvah.

Ugotovili smo, da se velikosti kontaktnih kotov FF lepila na sveže zbrušeni površini bambusa niso bistveno razlikovale glede na to, ali je bil preizkušanec iz zunanje ali notranje plasti bambusa. To dejstvo so nam podkrepile tudi meritve kontaktnega kota vode. Vrednosti kontaktnih kotov FF lepila so bile od 117° do 140° . Smiselno bi bilo raziskati vpliv predhodne kemične obdelave površin iz bambusa na zmanjšanje kontaktnih kotov.

Z natezno strižnim testom FF lepilnega spoja smo ugotovili, da so se strižne trdnosti minimalno razlikovale glede na plasti bambusa v lepilnem spoju. Z uporabljenim FF lepilom smo dosegli strižne trdnosti do $15,0 \text{ N/mm}^2$. Povprečna vrednost vseh meritev je znašala $11,1 \text{ N/mm}^2$. Delež loma po bambusu je bil od 60 % do 100 %, povprečne vrednosti za posamezno skupino preizkušancev pa niso padle pod 90 %. Ti rezultati pomenijo, da je bilo lepljenje bambusa s FF lepilom kvalitetno in zadostno za izdelavo kompozitov iz bambusa.

Opazili smo, da je bila efektivna globina penetracije FF lepila v bambus *Phyllostachys vivax* zelo plitva in je znašala od $0,69 \mu\text{m}$ do $3,42 \mu\text{m}$. Povprečna vrednost efektivne globine penetracije v lepilnih spojih iz notranjih plasti je bila za $0,86 \mu\text{m}$ večja od povprečne vrednosti efektivne globine penetracije v lepilnih spojih iz zunanjih plasti stebela bambusa.

Slojmate bambusove plošče, ki smo jih izdelali v okviru raziskave, so imele visok modul elastičnosti in visoko upogibno trdnost. Povprečen modul elastičnosti 14325 N/mm^2 ter povprečna upogibna trdnost 159 N/mm^2 uvrščata te plošče v zgornji trdnostni razred lepljenih kompozitov. Trdnostne lastnosti izdelane slojmate bambusove plošče bi bilo z vidika uporabe smiselno proučiti še s kakšnim drugim mehanskim testom.

Zaključimo lahko, da je iz bambusa *Phyllostachys vivax* s pomočjo FF lepila možno izdelati kvaliteten kompozit za splošno uporabo in glede na mehanske lastnosti tudi za konstrukcijsko uporabo.

Preden bi pri nas industrijsko proizvedli prvo bambusovo ploščo, bi morali še marsikaj raziskati. Proučiti bi morali sušenje bambusa. Oceniti bi morali zalogo bambusa v Sloveniji, raziskati, katere vrste bambusa uspevajo pri nas, ter ugotoviti, katere vrste bi pri nas lahko uspevale. Raziskati bi morali gospodarjenje z nasadi bambusa in ugotoviti kakšen način gospodarjenja je primeren za naše okolje. Morali bi se poglobiti v tehnološki postopek izdelave plošče ter poiskati primerno tehnologijo za industrijsko obdelavo bambusa. Nenazadnje pa bi morali oceniti tudi rentabilnost proizvodnje lepljenih bambusovih plošč pri nas.

6 POVZETEK

V diplomski nalogi smo proučevali primernost bambusa *Phyllostachys vivax* za izdelavo lepljenih kompozitov. Bambus smo posekali na rastišču v zaselku Pristava pri Novi Gorici. Interakcijo lepila z bambusom ter kvaliteto lepilnega spoja smo ovrednotili z merjenjem kontaktnega kota, strižnim testom lepilnega spoja ter merjenjem globine penetracije lepila. Ugotovitve iz omenjenih raziskav smo nato v praksi preverili in izdelali slojnatu bambusovo ploščo. Pri eksperimentih smo uporabljali FF lepilo tipa A proizvajalca Fenolit.

Kontaktne kot FF lepila smo merili na sveže zbrušenih površinah iz bambusa. Polovico ploščic smo naredili iz zunanjih plasti, polovico pa iz notranjih plasti bambusa. Kontaktni kot smo merili s tenziometrom po Wilhelmy-evi metodi.

Poizkusi, ki smo jih izvedli, so vsebovali tudi vroče lepljenje. Zato smo za ugotavljanje optimalnega časa vročega lepljenja uporabili dielektrično analizo, s katero smo časovno spremljali utrjevanje lepila v vroči stiskalnici.

Kvaliteto lepilnega spoja smo ocenili s strižnim testom, ki smo ga izvajali po nekoliko prirejenem standardu SIST EN 302-1 (2004). Preizkušance smo pripravili po postopku za preizkusni razred A1 in A5. S strižnim testom smo ugotavljali ali se površine bambusa iz različnih plasti stebela lepijo različno in ovrednotili kvaliteto lepilnega spoja.

Iz preizkušancev, ki smo jih prej uporabili pri preizkusu strižne trdnosti lepilnega spoja, smo naredili mikroskopske preparate. Preparato smo nato s pomočjo mikroskopa in kamere posneli in posnetke prenesli na osebni računalnik. Nato smo v programu Image-Pro Plus 6.0 za vsak preparat posebej izmerili oziroma izračunali efektivno penetracijo FF lepila v bambus.

Zadnji del raziskovalnega dela diplomske naloge je obsegal izdelavo in preizkušanje lepljenega kompozita iz bambusa. Izdelali smo slojnato bambusovo ploščo ter ji z upogibnim testom določili modul elastičnosti in upogibno trdnost.

Ugotovili smo, da so bili kontaktni koti FF lepila na sveže zbrušeni površini bambusa razmeroma visoki. Povprečna vrednost kontaktnega kota na površinah iz zunanjih plasti stebela je znašala $128,4^\circ$, na površinah iz notranjih plasti stebela pa $130,9^\circ$. Strižni test lepilnega spoja je pokazal, da ni statistično značilne razlike v trdnosti spoja glede na plasti stebela v njem. Za preizkusni razred A1 smo dosegli povprečno strižno trdnost $11,7 \text{ N/mm}^2$, za razred A5 pa $10,2 \text{ N/mm}^2$. Povprečen delež loma po bambusu je bil v vseh primerih nad 90 %. Efektivna globina penetracije lepila se je razlikovala glede na to, iz katerih plasti stebela so bile lepilne ploskve. Povprečna efektivna penetracija FF lepila v lepilnem spoju iz notranjih plasti stebela je znašala $2,41 \mu\text{m}$. V lepilnem spoju iz zunanjih plasti stebela je povprečna efektivna penetracija FF lepila znašala $1,54 \mu\text{m}$. Slojnate bambusove plošče, ki smo jih izdelali, so dosegle povprečni upogibni modul 14325 N/mm^2 ter povprečno upogibno trdnost 159 N/mm^2 .

Velik kontaktni kot FF lepila in njegova majhna efektivna penetracija sta nakazovali težave pri lepljenju površin iz bambusa. Visoke strižne trdnosti lepilnega spoja in dobre lastnosti izdelane slojnate bambusove plošče pa so ovrgele prej omenjeni predpostavki. Zaključimo lahko, da je iz bambusa *Phyllostachys vivax* s pomočjo FF lepila možno izdelati kvaliteten lepljen kompozit za raznovrstno uporabo.

7 VIRI

Ahmad M., Kamke F. A. 2000. Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials

http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08212000-10440027/unrestricted/Abst_Acknow_TofCont_ListFigandTab.pdf (15. mar. 2008)

Ahmad M., Kamke F. A. 2003. Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials: surface characteristics. *Wood Science and Technology*, 37: 233-240

Ahmad M., Kamke F. A. 2005. Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials: physical and mechanical properties. *Wood science and Technology*, 39: 448-459

Bamboo Flooring-an alternative for green homes (29. mar. 2009)

<http://green-home-products.info/category/green-home-flooring/> (16. apr. 2009)

Bamboocomposites. 2009. Weaving patterns, Center for bamboo development (30. feb. 2009)

<http://www.bamboocomposites.com/mat%20weaving%20&%20storage.htm> (3. mar. 2009)

Bransal K. A., Prasad T. R. N. 2004. Manufacturing laminates from sympodial bamboos - an Indian experience. *J. Bamboo and Rattan*, 3, 1: 13-22

<http://www.vsppub.com/> (19. okt. 2008)

Bryne L. E. 2008. Aspect on wettability and surface composition of modified wood. Stockholm, Royal Institute of Technology School of Architecture and Built Environment Dept. of Civil and Architectural Engineering Div. of Building Materials: 41 str.

www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_kth_diva-4735-2__fulltext.pdf (24. nov. 2008)

- Cherdchim B., Matan N., Kyokong B. 2004. Effect of temperature on thermal softening of black sweet- bamboo culms (*Dendrocalamus asper* Backer) in linseed oil. Songklanakarin J. Sci. Technol., 26, 6: 855-866
<http://www2.psu.ac.th/PresidentOffice/EduService/journal/26-6pdf/10black-sweet-bamboo.pdf> (10. avg. 2007)
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Oddelek za lesarstvo, Biotehniška fakulteta: 185 str
- Dunkelberg K. 2000. Bambus-Bamboo. Stuttgart, Institute for Lightweight Structures: 432 str.
- Everlasting International 2009. Bamboo floor
<http://www.everlastingtrade.com/bamboo%20flooring%20and%20accessories.htm>
(23. apr. 2009)
- Gielis J. 2001. Future possibilities for bamboo in European agriculture
www.geniaal.be/downloads/EBS4johangielis.doc (14. nov. 2008)
- Hrazsky J., Kral P. 2007. A contribution to the properties of combined plywood materials. Journal of Forest Science, 53, 10: 483-490
<http://journals.uzpi.cz:8050/uniqueFiles/00422.pdf> (4. nov. 2008)
- Jošt M. 2008. "Lastnost fenol-formaldehidnega lepila TIP A, proizvajalca Fenolit". Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. matej.jost@bf.uni-lj.si (osebni vir, okt. 2008)
- Jošt M., Šernek M. 2008. Shear strength development of the phenol-formaldehyde adhesive bond during cure. Wood Science and Technology 43, 1-2: 153-166
<http://www.springerlink.com/content/102511> (2. dec. 2008)
- Klančič-Golob J. 1973. Eksotični park na Rafutu pri Novi Gorici. Varstvo narave, 7: 37-50

- Koprivec L., Zbašnik-Senegačnik M. 2006. Bambus nov izziv v arhitekturi? Les, 58, 1-2: 14-20
- Li X. B., Shupe T. F., Hse C. Y. 2004. Wettability of three Honduran bamboo species. J. Bamboo and Rattan, 3, 2: 159-167
www.vspub.com (27. nov. 2008)
- Liese. W. 1998. The anatomy of bamboo culms. Beijing, International Network for Bamboo and Rattan: 204 str.
- Marra A. M. 1992. Technology of wood bonding: principles and practice. New York, Van Nostrand Reinhold: 454 str.
- McClure. 1995. Phyllostachys vivax. Plant for a future
http://www.ibiblio.org/pfaf/cgi-bin/arr_html?Phyllostachys+vivax (25. jul. 2008)
- OSB - superfinish. 2006. Kronospan (2006)
<http://en.kronospan.cz/osb/en/dvojka.html> (4.12.2008)
- Qisheng Z. 2007. Production and application of bamboo based panel in China.
<http://wbp.woodlab.org/thread.cfm?Category=1101&Thread=5113&Message=5302>
(8. maj 2009)
- Qisheng Z., Shenxue J., Yongyu T. 2001. Industrial utilization on bamboo. Technical Report no 26. International Network of Bamboo and Rattan: 212 str.
<http://www.inbar.int/publication/pubdetail.asp?publicid=121> (11. dec. 2007)
- Sernek M. 2002. Comparative Analysis of inactivated wood surfaces. Doctor dissertation. Blacksburg, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University: 179 str.
<http://www.reference-global.com/doi/abs/10.1515/HF.2004.004> (15. mar. 2008)

SIST EN 302-1:2004. Lepila za nosilne lesne konstrukcije-Preizkusne metode-1. del: določanje trdnosti lepilnega stika pri vzdolžno natezno strižni obremenitvi: 12 str.

SIST EN 204. Razvrstitev plastomernih lepil za nekonstrukcijsko rabo. 2002: 8 str.

SIST.. EN 310:1993. Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength: 8 str.

Stamm J. 2002. Glued bamboo, Conbam (23. jul. 2005)
<http://www-users.rwth-aachen.de/Christoph.Toenges/pagesEN/leimbambus.html>
(23. mar. 2009)

Stapleton C. 1999. Key to cultivated genera
http://bamboo-identification.co.uk/html/cultivated_genera.html (25. avg. 2008)

Surova iver. plošča. 2008. Lesni center Novak
<http://www.lc-novak.si/?page=podstran&sub=9&id=22> (4. dec. 2008)

Šernek M. 1999. Vpliv bistvenih dejavnikov na penetracijo in trdnost UF lepilnega spoja pri lepljenju bukovine. Magistrsko delo, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 111

Šernek M. 2004. Spremljanje utrjevanja lepila z dielektrično analizo. Les, 56, 12: 404-408

Walinder M. 2000. Wetting phenomena on wood. Stockholm, Royal Institute of Technology Dept. of Manufacturing Systems Wood Technology and Processing: 62 str.
www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_kth_diva-2908-2__fulltext.pdf
(24. nov. 2008)

Xiaobo L. 2004. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Louisiana State University: 68 str.

<http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-04022004-144548/> (20. sep. 2008)

Zheng K., Chen X. 2008. Potential of bamboo-based panels serving as prefabricated construction materials: 9 str.

http://www.inbar.int/Econo_devep/proceeding/Pa-Zheng-Potential%20of%20Bamboo-based%20Panels.pdf (7. jul. 2008)

Zheng W. W. G. 2002. Current status and prospects of new architectural materials from bamboo. Research Institute of Wood Industry, CAF, Beijing

http://www.inbar.int/publication/txt/INBAR_Working_Paper_No47.htm (26. avg. 2008)

Zhengping W., Stapleton C. 1995. Phyllostachys. V: Poaceae. Flora of China. Zhengy W et al. (edt): 163-180 str.

http://flora.huh.harvard.edu/china/mss/volume22/FOC22_01_Bambuseae.pdf (2. maj. 2008)

ZAHVALA

*Verjetno bi se
lahko prebila
tudi brez tebe.
Toda hvala
Bogu, da se mi
ni bilo treba.
Pam Brown*

Brez nekaterih od vas mi prav gotovo ne bi uspelo. Hvala vsem, ki ste mi pomagali in me spodbujali pri izdelavi diplomske naloge.

Še posebej se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Milanu Šerneku. Hvala vam, da ste znali prisluhniti mojim željam in moje, včasih abstraktne, ideje usmeriti v smotno raziskovalno delo. Recenzentka prof. dr. Katarini Čufar, zahvaljujem se vam za vaše popravke in da ste si vzeli čas in pohiteli, ko se mi je najbolj mudilo.

Hvala tudi prim. dr. Jožici Šelb Šemerl, dr.med., da ste vse kar sem napisal prebrali, mi svetovali ter me izzvali do te mere, da sem začel pisati veliko boljše.

Tehniški sodelavec katedre za Žagarstvo in lesna tvoriva Jani Renko in gospod Silvan Rudež sta največ tvegala pri moji diplomski nalogi. Včasih ju je bilo prav težko gledati, ko sta s prsti nekaj mm od rezil žagala ali skobljala deščice za preizkušance. Zahvaljujem se vama, da sta bila pripravljena prevzeti tveganje in narediti, kar je bilo potrebno.

Mirko Kariž, zahvaljujem se vam za pomoč pri preizkusih v laboratoriju.

Klemen Merhar in Filip Janžekovič, hvala za pomoč pri skicah in oblikovanju diplomske naloge.

Nazadnje bi se rad zahvalil staršem, sestri in sorodnikom. Hvala vam, da ste verjeli, da se bo iz tega bambusa nekaj izcimilo. Hvala, ker ste potrpeživi z mano, ko sem bil utrujen in na koncu z živci.

PRILOGE

Priloga A1: Dimenzije vzorcev (a, b, d), površinska napetost (γ) FF lepila ter kontaktni kot (θ) FF lepila na površini iz notranjih plasti bambusa

Zap. št. meritve	Št. vzorca	a [mm]	b [mm]	d [mm]	γ [mN/m]	θ [°]
1	1 _n	17,69	15,10	1,86	65,16	140,26
2	2 _n	17,91	15,53	1,72	68,06	126,89
3	3 _n	17,80	15,37	1,46	68,44	137,20
4	4 _n	18,10	15,01	1,68	68,38	131,01
5	5 _n	17,00	15,01	1,09	65,02	127,80
6	6 _n	16,08	15,42	1,49	69,41	123,79
7	7 _n	17,11	15,39	1,40	67,84	136,06
8	8 _n	14,31	14,82	1,34	68,54	132,12
9	9 _n	14,49	15,40	1,18	68,14	129,64
10	10 _n	14,93	17,94	1,78	65,72	124,14

Priloga A2: Dimenzije vzorcev (a,b,d), površinska napetost (γ) FF lepila ter kontaktni kot (θ) FF lepila na površini iz zunanjih plasti bambusa

Zap. št. meritve	Št. vzorca	a [mm]	b [mm]	d [mm]	γ [mN/m]	θ [°]
11	1 _z	15,44	14,99	1,86	67,23	125,22
12	2 _z	15,90	14,78	1,52	68,21	128,89
13	3 _z	15,93	14,97	1,39	66,82	129,68
14	4 _z	17,06	15,44	1,51	69,49	130,38
15	5 _z	16,48	15,33	1,60	68,05	132,35
16	6 _z	15,28	17,95	1,56	66,73	128,45
17	7 _z	16,12	15,80	1,70	66,20	117,63
18	8 _z	16,35	15,32	2,04	67,13	128,02
19	9 _z	16,41	14,82	1,35	68,06	133,08
20	10 _z	15,72	15,14	1,76	67,32	130,17

Priloga A3: Dimenzije vzorcev (a, b, d), površinska napetost (γ) vode ter kontaktni kot (θ) vode na površini iz notranjih plasti bambusa

Zap. št. meritve	Št. vzorca	a [mm]	b [mm]	d [mm]	γ [mN/m]	θ [°]
21	1 _{n.v.}	14,55	15,13	1,19	68,23	43,11
22	2 _{n.v.}	13,93	15,34	1,11	72,27	34,33
23	3 _{n.v.}	14,49	15,54	1,29	72,83	32,90

Priloga A4: Dimenzije vzorcev (a, b, d), površinska napetost (γ) vode in kontaktni kot (θ) vode na površini iz zunanjih plasti bambusa

Zap. št. meritve	Št. vzorca	a [mm]	b [mm]	d [mm]	γ [mN/m]	θ [°]
24	1 _{z.v.}	15,03	15,51	1,72	72,87	25,16
25	2 _{z.v.}	17,43	14,64	1,48	72,94	39,70
26	3 _{z.v.}	14,93	14,58	1,85	72,92	34,28

Priloga B1: Dimenzije strižne ravnine (b in l_2), maksimalna sila ($F_{\max}$), strižna trdnost (f_v) in delež loma po bambusu (D.l.b); preizkušanci pripravljeni po navodilih za preizkusni razred A1 standarda SIST EN 302-1 (2004)

Zap. št.	Oznaka	b [mm]	l_2 [mm]	$F_{\max}$ [N]	f_v [N/mm ²]	Pr.l.b. [%]
1	1 _{zn A1}	12,08	10,2	1230	10	70
2	2 _{zn A1}	12,11	10,3	1180	9,44	100
3	3 _{zn A1}	12,09	10,2	1400	11,3	100
4	4 _{zn A1}	12,09	10,4	1490	11,8	100
5	5 _{zn A1}	12,1	10,2	1270	10,4	70
6	6 _{zn A1}	12,05	10,2	1240	10	100
7	7 _{zn A1}	12,09	10,1	1260	10,3	90
8	8 _{zn A1}	12,08	10,2	1540	12,5	70
9	9 _{zn A1}	12,11	10,3	1480	11,9	100
10	10 _{zn A1}	12,09	10,2	1580	12,8	100
11	1 _{z A1}	12,16	10,1	1790	14,5	60
12	2 _{z A1}	12,08	9,8	1580	13,3	100
13	3 _{z A1}	12,1	10,0	1640	13,5	100
14	4 _{z A1}	12,15	10,1	1400	11,4	100
15	5 _{z A1}	12,12	10,1	1310	10,7	100
16	6 _{z A1}	12,17	9,8	1300	10,8	100
17	7 _{z A1}	12,1	10,1	1550	12,7	90
18	8 _{z A1}	12,14	10,0	1810	15	100
19	9 _{z A1}	12,12	9,7	1510	12,9	100
20	10 _{z A1}	12,11	9,7	1630	13,9	90
21	1 _{n A1}	12,1	10,2	1650	13,3	100
22	2 _{n A1}	12,1	10,1	1310	10,8	100
23	3 _{n A1}	12,1	10,4	1620	12,9	100
24	4 _{n A1}	12,1	10,2	1570	12,7	100
25	5 _{n A1}	20	10,0	1640	8,19	90
26	6 _{n A1}	12,2	10,6	1510	11,6	100
27	7 _{n A1}	12,1	10,7	1600	12,3	100
28	8 _{n A1}	12,1	10,2	1120	9,11	100
29	9 _{n A1}	12,2	10,3	1480	11,8	100
30	10 _{n A1}	12,1	10,3	1470	11,8	100

Priloga B2: Dimenzije strižne ravnine (b in l_2), maksimalna sila ($F_{\max}$), strižna trdnost (f_v) in delež loma po bambusu (D.l.b); preizkušanci pripravljeni po navodilih za preizkusni razred A5 standarda SIST EN 302-1 (2004)

Zap. št.	Oznaka	b [mm]	l_2 [mm]	$F_{\max}$ [N]	f_v [N/mm ²]	Pr.l.b. [%]
31	1 _{zn A5}	12,2	10,1	1360	11,0	100
32	2 _{zn A5}	12,2	10,2	1550	12,4	100
33	3 _{zn A5}	12,2	10,2	562	4,5	80
34	4 _{zn A5}	12,2	10,2	1240	9,7	100
35	5 _{zn A5}	12,3	10,2	1290	9,6	70
36	6 _{zn A5}	12,1	10,2	1280	10,4	80
37	7 _{zn A5}	12,2	10,3	1380	11,0	90
38	8 _{zn A5}	12,2	10,1	1440	11,7	100
39	9 _{zn A5}	12,1	9,6	1270	10,9	100
40	10 _{zn A5}	12,1	10,3	1230	9,9	100
41	1 _{z A5}	12	9,7	1250	10,7	100
42	2 _{z A5}	12,1	10,1	1160	9,5	90
43	3 _{z A5}	12,2	10,0	1590	13,0	90
44	4 _{z A5}	12,2	10,0	1330	10,9	100
45	5 _{z A5}	12,1	9,7	1030	8,7	100
46	6 _{z A5}	12,1	9,6	1090	9,4	100
47	7 _{z A5}	12,2	10,0	1170	9,6	100
48	8 _{z A5}	12,2	9,7	1200	10,2	100
49	9 _{z A5}	12,2	9,5	1270	10,9	70
50	10 _{z A5}	12,1	10,2	1160	9,4	100
51	1 _{n A5}	12,1	10,2	1430	11,6	100
52	2 _{n A5}	12,1	10,3	1460	11,7	100
53	3 _{n A5}	12,1	10,3	1400	11,2	100
54	4 _{n A5}	12,1	10,3	1430	11,5	100
55	5 _{n A5}	12,1	10,2	1450	11,8	100
56	6 _{n A5}	12,3	10,3	1500	11,8	100
57	7 _{n A5}	12,7	10,1	994	7,8	100
58	8 _{n A5}	12,1	10,5	1100	8,7	100
59	9 _{n A5}	12,1	10,2	1200	9,7	80
60	10 _{n A5}	12,1	10,2	1330	10,7	100

Priloga C1: Globina penetracije za različne skupine vzorcev (oznake zn, z, n se nanašajo na plasti stebela v lepilnem spoju: zn zunanje-notranje, z zunanje-zunanje, n notranje-notranje)

Zap. št.	Oznaka	Globina penetracije [μm]
1	1 _{zn}	1,991
2	2 _{zn}	/
3	3 _{zn}	1,985
4	4 _{zn}	2,190
5	5 _{zn}	1,801
6	6 _{zn}	1,606
7	7 _{zn}	1,685
8	8 _{zn}	2,720
9	9 _{zn}	2,412
10	10 _{zn}	2,330
11	1 _n	2,047
12	2 _n	3,421
13	3 _n	1,287
14	4 _n	1,985
15	5 _n	2,86
16	6 _n	2,693
17	7 _n	3,304
18	8 _n	2,675
19	9 _n	2,014
20	10 _n	1,764
21	1 _z	1,7
22	2 _z	0,686
23	3 _z	2,531
24	4 _z	1,486
25	5 _z	2,001
26	6 _z	1,231
27	7 _z	1,405
28	8 _z	1,784
29	9 _z	1,314
30	10 _z	1,274

Priloga D1: Parametri za izračun modula elastičnosti in upogibne trdnosti ter čas pri katerem je prišlo do loma preizkušanca

Št. preizkušanca	t [mm]	b [mm]	l_1 [mm]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	l [mm]	m [g]	F_1 [N]	F_2 [N]	F_{max} [N]	Čas [s]
1	16,73	51,18	320	1,13	4,40	401	248	457	1829	4570	123
2	16,76	51,33	320	1,01	3,72	403	236	309	1236	3090	96
3	16,71	51,18	320	1,21	4,51	400	264	507	2026	5070	85
4	16,9	50,98	320	1,31	4,87	402	255	518	2074	5180	79
5	16,85	51,33	320	1,34	5,15	400	247	608	2431	6080	90
6	16,87	51,45	320	1,22	4,69	401	257	513	2053	5130	111

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Luka BOLTAR

**MOŽNOST IZDELAVE LEPLJENEGA KOMPOZITA
IZ BAMBUSA**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2009