

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Uroš FIRŠT

**VPLIV PROCESNIH PARAMETROV SUŠENJA NA RAZVOJ
DEFORMACIJ IN NAPETOSTI V BUKOVINI**

MAGISTRSKO DELO

**INFLUENCE OF DRYING PROCESS PARAMETERS ON THE
DEVELOPMENT OF DEFORMATIONS AND STRESSES AT BEECH**

MASTER OF SCIENCE THESIS

Ljubljana, 2013

Magistrsko delo je zaključek Podiplomskega študija bioloških in biotehniških znanosti s področja lesarstva. Eksperimentalno delo je bilo opravljeno na Biotehniški fakulteti, v Laboratoriju za tehnologije sušenja lesa.

Na podlagi Statuta Univerze v Ljubljani ter po sklepu Senata Biotehniške fakultete z dne 19.12.2011 ter odločbo dekana z dne 6.1.2012 je bilo potrjeno, da kandidat izpolnjuje pogoje za izdelavo in zagovor magistrskega dela s področja lesarstva. Za mentorja je bil imenovan izr. prof. dr. Željko Gorišek.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Katarina Čufar
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član: izr. prof. dr. Željko GORIŠEK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član: dr. Aleš STRAŽE
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član: izr. prof. dr. Stjepan PERVAN
Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet

Datum zagovora:

Delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Uroš FIRŠT

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Md
DK	UDK 630*847.275
KG	les/ sušenje/ kakovost/ kinetika sušenja/ vlažnostni gradient/ zaskorjenje/ trdnost/ bukovina
AV	FIRŠT, Uroš, univ. dipl. inž. les.
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, C. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Podiplomski študij bioloških in biotehniških znanosti, področje lesarstva
LI	2013
IN	VPLIV PROCESNIH PARAMETROV NA RAZVOJ DEFORMACIJ IN NAPETOSTI MED SUŠENJEM BUKOVINE
TD	Magistrsko delo
OP	XII, 82 str., 14 pregl., 41 sl., 40 vir.
IJ	sl
JI	sl / en
AI	Kinetika sušenja in razvoj napetostnega polja pri sušenju bukovine (<i>Fagus sylvatica</i> L.) sta bila raziskana pri uporabi treh režimov sušenja. Proučevali smo radialno in tangencialno orientirane preizkušance dimenzij 600×130×38 mm (dolžina x širina x debelina). Sušenje smo izvedli v laboratorijskem sušilnem kanalu pri različnih ostrinah in temperaturah sušenja. Med sušenjem smo v časovnih intervalih odvzemali vzorce in določili povprečno vlažnost (u), vlažnostni gradient ($\Delta u/\Delta t$), višino loka lamele (l_0) ter upogibno (f_m) in natezno trdnost (σ). Največjo sušilno hitrost smo dosegli pri sušenju z ostrim režimom, najmanjšo pa pri sušenju z blagim režimom. Vlažnostni gradient med posameznimi režimi sušenja ni bil značilno statistično različen, med primerjavo orientiranosti vzorcev, pa razlike obstajajo. Višina loka lamele je največji pri tangencialnih vzorcih sušenih po ostrem režimu, medtem ko so pri blagem in oscilirajočem vrednosti manjše. Največje trdnosti smo dosegli pri sušenju z blagim režimom, pri sušenju z oscilacijami izboljšanja trdnosti nismo potrdili. Ugotovili smo, da obstaja linearna povezanost med višino loka lamele in upogibno trdnostjo, kar pripisujemo mikro porušitvam v celični steni. Potrdili smo tudi vpliv ostrine sušenja na razvoj napetostnega polja in čas trajanja postopka sušenja. Primerjava orientiranosti nam potrdi kakovostnejše sušenje radialno usmerjenih vzorcev. Sušenje z oscilacijo klime skrajša čas sušenja, vpliv na mehanske lastnosti ni statistično značilen.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Md

DC UDC 630*847.275

CX wood/ drying/ drying kinetics /moisture content /casehardening /strength /beech wood

AU FIRŠT, Uroš

AA GORIŠEK, Željko (supervisor)

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

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Postgraduate study of Biological and Biotechnical Sciences, field: Wood Science

PY 2013

TI INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE DEVELOPMENT DEFORMATION AND STRESSES DURING DRYING BEECH

DT M. Sc. Thesis

NO XII, 82 p., 14 tab., 41 fig., 40 ref.

LA sl

AL sl / en

AB Drying kinetics and the development of stress in drying beech (*Fagus sylvatica* L.) were studied using of three drying regimes. We studied both radially and tangentially oriented wood pieces dimensions 600 × 130 × 38 mm (length x width x thickness). Drying was carried out in a laboratory tunnel drier at different drying sharpness and temperature of drying. During the drying process in the intervals were subtracted patterns and determine the average moisture (u), humidity gradient ($\Delta u / DT$), height of the arc lamella (l_0) and bending (f_m) and tensile strength (σ). The highest drying sharpness was achieved with sharp drying regime, while the lowest sharpness was achieved in the mild drying regime. Humidity gradient between the different drying regimes was not statistically significantly different, the comparison between the orientation of the samples was statistically significantly different. Height of the arc lamella is the largest in the tangential samples dried with sharp drying regime, while in mild and oscillating regime values are lower. The maximum strength was achieved with a mild drying regime, improve strength was not confirmed with oscillating drying regime. We found that there is a linear relationship between the height of the arc lamella and bending strength, which was attributed to micro-bursting in the cell wall. We confirmed that sharpness had impact on the development of the stress field and the duration of the drying process. Comparison orientation of samples has confirmed higher drying quality in radially oriented samples. Drying with oscillation shortens drying time, the effect on mechanical properties is not statistically significant.

KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	II
KEY WORDS DOCUMENTATION	III
KAZALO VSEBINE.....	IV
KAZALO PREGLEDNIC.....	VI
KAZALO SLIK.....	VIII
1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA	1
1.1 CILJI IN RAZISKOVALNE HIPOTEZE	2
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1 KINETIKA SUŠENJA.....	3
2.1.1 Voda v lesu	3
2.1.2 Permeabilnost	4
2.1.3 Difuzivnost	5
2.1.4 Izhlapovanje vode iz površine.....	6
2.2 RAZVOJ NAPETOSTNEGA POLJA	8
2.2.1 Vpliv parametrov sušenja na razvoj napetostnega polja.....	8
2.2.2 Generiranje napetosti.....	9
2.2.3 Določanje sušilnih napetosti v sušilnem postopku.....	13
2.3 DEFORMACIJE PRI SUŠENJU	14
2.4 OSCILIRAJOČE SUŠENJE	16
3 MATERIAL IN METODE	18
3.1 MATERIAL	18
3.1.1 Izbira bukovine.....	19
3.2 METODE.....	19
3.2.1 Načrtovanje in izvajanje sušilnega procesa.....	19
3.2.2 Vzorčenje in metode preizkušanja.....	23
3.2.3 Določanje povprečne vlažnosti in vlažnostnega gradienta.....	24
3.2.4 Določanje zaskorjenja	25

3.2.5	Metode spremljanja mehanskih lastnosti lesa	26
3.2.5.1	Upogibna trdnost.....	27
3.2.5.2	Natezna trdnost	28
3.2.5.3	Hitrost sušenja.....	29
4	REZULTATI.....	30
4.1	DOSEGANJE NAČRTOVANIH PROCESNIH PARAMETROV	30
4.2	KINETIKA SUŠENJA.....	32
4.3	VLAŽNOSTNI GRADIENT	41
4.4	OCENA ZASKORJENOSTI	47
4.5	SPREMEMBE MEHANSKIH LASTNOSTI MED POTEKOM SUŠENJA.....	51
4.5.1	Upogibna trdnost.....	51
4.5.2	Natezna trdnost.....	57
5	RAZPRAVA	62
5.1	KINETIKA SUŠENJA.....	62
5.2	RAZVOJ NAPETOSTNEGA POLJA	64
5.3	TRDNOSTNE LASTNOSTI	66
5.3.1	Upogibna trdnost.....	67
5.3.2	Natezna trdnost.....	69
5.4	PRIMERJAVA PARAMETROV	70
6	SKLEPI.....	71
7	POVZETEK (SUMMARY)	73
7.1	POVZETEK.....	73
7.2	SUMMARY	76
8	VIRI	79
ZAHVALA		

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Lastnosti bukovine (Čufar, 2001),.....	18
Preglednica 2: Parametri ostrega režima sušenja (OST); u_r = ravnovesna vlažnost; ΔT = psihometerska razlika.	21
Preglednica 3: Parametri blagega režima sušenja (BL); u_r = ravnovesna vlažnost; ΔT = psihometerska razlika.	21
Preglednica 4: Parametri oscilirajočega režima sušenja (OSC); u_r = ravnovesna vlažnost; ΔT = psihometerska razlika.	22
Preglednica 5: Povprečna vlažnost in povprečna hitrost sušenja na posameznih intervalih procesa pri sušenju z ostrim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja; V_z = hitrost sušenja zunanega sloja; V_p = povprečna hitrost sušenja.; u_s = vlažnost srednjega sloja; u_z = vlažnost zunanega sloja; u_p = povprečna vlažnost vzorcev.	34
Preglednica 6: Povprečna vlažnost in povprečna hitrost sušenja na posameznih intervalih pri sušenju z blagim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja; V_z = hitrost sušenja zunanega sloja; V_p = povprečna hitrost sušenja.; u_s = vlažnost srednjega sloja; u_z = vlažnost zunanega sloja; u_p = povprečna vlažnost vzorcev.	37
Preglednica 7: Povprečna vlažnost in povprečna hitrost sušenja na posameznih intervalih pri sušenju z oscilirajočim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja; V_z = hitrost sušenja zunanega sloja; V_p = povprečna hitrost sušenja.; u_s = vlažnost srednjega sloja; u_z = vlažnost zunanega sloja; u_p = povprečna vlažnost vzorcev.	39
Preglednica 8: Povprečne vrednosti vlažnostnega gradienta med prvo in drugo, drugo in tretjo lamelo tangencialno in radialno usmerjenih desk pri vseh treh režimih.....	42
Preglednica 9: Uklon lamel (REŽA v mm) pri tangencialno in radialno usmerjenih deskah ostrega režima. LAMELA 1 = zgornji sloj; LAMELA 3= srednji sloj; LAMELA 5 = spodnji sloj; LOM = vzorec je razpadel.....	48
Preglednica 10: Uklon lamel (REŽA mm) pri tangencialno in radialno usmerjenih deskah blagega režima. LAMELA 1 = zgornji sloj; LAMELA 3 = srednji sloj; LAMELA 5 =spodnji sloj.	48

Preglednica 11: Uklon lamel (REŽA mm) pri tangencialno usmerjenih deskah oscilirajočega režima. LAMELA 1 = zgornji sloj; LAMELA 2 = srednji sloj; LAMELA 3 = spodnji sloj.	49
Preglednica 12: Primerjava hitrosti sušenja po posameznih režimih (BL = blag, OST = oster, OSC = oscilirajoč) z Gompertzovo krivuljo (a = asimptota začetne maksimalne hitrosti sušenja, x_c = vlažnost, kjer dosežemo maksimalno konstantno spremembo hitrosti sušenja, k = maksimalna hitrost sušenja, R^2 = koeficient variacije.)	63
Preglednica 13: Primerjava odklona loka zunanje lamele pri tangencialno usmerjenih deskah.....	65
Preglednica 14: Primerjava odklona loka zunanje lamele pri radialno usmerjenih deskah	66

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Shema razžagovanja hlodovine.....	19
Slika 2: Konvekcijski sušilni kanal TLS-01 (zgoraj) s PLC krmilnikom (sp. levo) in z eksperimentalno komoro (sp. desno).	23
Slika 3: Prikaz odvzemanja vzorcev pri posameznem odvzemu	24
Slika 4: Prikaz razreza vzorcev za določanje vlažnostnega gradienta	25
Slika 5: a) Merjenje velikosti loka lamele z merilno urico; b) Shema lamel za določanje zaskorjenja.....	26
Slika 6: Trgalni stroj ZWICK ROELL Z005	26
Slika 7: Prikaz upogibnega testa na trgalnem stroju ZWICK ROELL Z005	27
Slika 8: a) Prikaz nateznega testa na trgalnem stroju ZWICK ROELL Z005; b) Prikaz izdelave vzorca za natezni test.	28
Slika 9: Načrtovani in doseženi procesni parametri pri ostrejših sušilnih pogojih. T_s - temperatura suhega termometra; T_{zast} - načrtovana temperatura suhega termometra; u_r - potek ravnovesne vlažnosti (u_r); u - sušilna krivulja.....	30
Slika 10: Načrtovani in doseženi procesni parametri pri blagih sušilnih pogojih. T_s - temperatura suhega termometra; T_{zast} - načrtovana temperatura suhega termometra; u_r - potek ravnovesne vlažnosti (u_r); u - sušilna krivulja.....	31
Slika 11: Načrtovani in doseženi procesni parametri pri oscilirajočih sušilnih pogojih. T_s - temperatura suhega termometra; T_{zast} - načrtovana temperatura suhega termometra; u_r - potek ravnovesne vlažnosti (u_r); u - sušilna krivulja.....	32
Slika 12: Sušilna krivulja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) pri sušenju z ostrim režimom. u_s = vlažnost srednjega sloja, u_z = vlažnost zunanega sloja, u_p = povprečna vlažnost.....	33
Slika 13: Hitrost sušenja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) v odvisnosti od vlažnosti lesa pri sušenju z ostrim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja, V_z = hitrost sušenja zunanega sloja, V_p = povprečna hitrost sušenja.	34

Slika 14: Sušilna krivulja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) pri sušenju z blagim režimom. u_s = vlažnost srednjega sloja, u_z = vlažnost zunanjskega sloja, u_p = povprečna vlažnost.....	35
Slika 15: Hitrost sušenja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) v odvisnosti od vlažnosti lesa pri sušenju z blagim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja, V_z = hitrost sušenja zunanjskega sloja, V_p = povprečna hitrost sušenja.	36
Slika 16: Sušilna krivulja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) pri sušenju z oscilirajočim režimom. u_s = vlažnost srednjega sloja, u_z = vlažnost zunanjskega sloja, u_p = povprečna vlažnost.	37
Slika 17: Hitrost sušenja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) v odvisnosti od vlažnosti lesa pri sušenju z oscilirajočim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja, V_z = hitrost sušenja zunanjskega sloja, V_p = povprečna hitrost sušenja.....	38
Slika 18: Odvisnost hitrosti sušenja pri radialno (a) in tangencialno (b) usmerjenih vzorcih čez celoten postopek sušenja vseh treh šarž.....	40
Slika 19: Odvisnost hitrosti sušenja pri radialno (a) in tangencialno (b) usmerjenih vzorcih v odvisnosti od vlažnosti pri sušenju z vsemi tremi šaržami.	40
Slika 20: Vlažnostni gradient tangencialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri ostrem režimu.	43
Slika 21: Vlažnostni gradient radialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri ostrem režimu.	44
Slika 22: Vlažnostni gradient tangencialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri blagem režimu.....	45
Slika 23: Vlažnostni gradient radialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri blagem režimu.....	45
Slika 24: Vlažnostni gradient tangencialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri oscilirajočem režimu.....	46
Slika 25: Vlažnostni gradient radialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri oscilirajočem režimu.....	46
Slika 26: Odvisnost odklona loka lamele glede na vlažnost lesa pri zunanji lameli (a) in srednji lameli (b) tangencialno usmerjenega vzorca lesa.....	50

Slika 27: Odvisnost odklona loka lamele glede na vlažnost lesa pri zunanji lameli (a) in srednji lameli (b) radialno usmerjenega vzorca lesa.	51
Slika 28: Upogibna trdnost v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z ostrim režimom; a) zunanji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; b) srednji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; c) zunanji sloj radialno orientiranih vzorcev; d) srednji sloj radialno orientiranih vzorcev.	52
Slika 29: Upogibna trdnost v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z blagim režimom; a) zunanji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; b) srednji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; c) zunanji sloj radialno orientiranih vzorcev; d) srednji sloj radialno orientiranih vzorcev.	53
Slika 30: Upogibna trdnost v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z oscilirajočim režimom; a) zunanji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; b) srednji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; c) zunanji sloj radialno orientiranih vzorcev; d) srednji sloj radialno orientiranih vzorcev.	54
Slika 31: Odvisnost upogibnega modula elastičnosti (E_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri tangencialno usmerjenih deskah.	55
Slika 32: Odvisnost upogibnega modula elastičnosti (E_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri radialno usmerjenih deskah.	56
Slika 33: Odvisnost upogibne trdnosti (f_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri tangencialno usmerjenih deskah.	57
Slika 34: Odvisnost upogibne trdnosti (f_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri radialno usmerjenih deskah.	57
Slika 35: Natezna trdnost tangencialno (a) in radialno (b) orientiranih vzorcev v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z ostrim režimom.	58
Slika 36: Natezna trdnost tangencialno (a) in radialno (b) orientiranih vzorcev v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z blagim režimom.	58
Slika 37: Natezna trdnost tangencialno (a) in radialno (b) orientiranih vzorcev v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z oscilirajočim režimom.	59
Slika 38: Odvisnost natezne trdnosti (σ) pri tangencialno usmerjenih deskah, glede na vlažnost lesa (u).	60

Slika 39: Odvisnost natezne trdnosti (σ) pri radialno usmerjenih deskah, glede na vlažnost lesa (u).....	61
Slika 40: Odvisnost upogibne trdnosti od odklona loka lamele pri tangencialno usmerjenih deskah vseh treh režimov sušenja.....	68
Slika 41: Odvisnost upogibne trdnosti od odklona loka lamele pri radialno usmerjenih deskah vseh treh režimov sušenja.	69

1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA

Les je naraven, anizotropen, porozen material in vsebuje ob poseku dreves takšno količino vode, ki ne zagotavlja uporabne biološke odpornosti, dimenzijske stabilnosti in fizikalno-mehanskih lastnosti, potrebnih za sodobne, končne lesne izdelke. Z vidika mnogih izdelkov iz lesa se navedene neustrezne lastnosti izboljšujejo s sušenjem lesa, največkrat prisotnim kot prva faza lesno-obdelovalnega tehnološkega procesa.

Pri sušenju lesa se mnogokrat večji poudarek namenja izločanju vode iz lesa pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS) in sicer transportu vezane vode. Osnovni razlog je v bistveno počasnejšem transportu vezane vode, kot pa je samo izločanje proste vode, s čimer so lahko ob optimizaciji tega dela sušenja neposredni časovni in ekonomski prihranki višji. Hkrati se z nižanjem lesne vlažnosti pod točko nasičenja lesnih vlaken pričnejo drastično spreminjati fizikalne, mehanske in kemične lastnosti lesa, na katere lahko delno vplivamo tudi s samim sušilnim postopkom ter s tem spremljamo in nadzorujemo tudi kakovost lesa (Straže, 2010).

Sušenje lesa je ena izmed izredno pomembnih faz v procesu obdelave lesa. Les, kot naravni material, ima po poseku velike količine vode, zato je dimenzijsko nestabilen in biološko neodporen. Hkrati je les heterogen material in je po strukturi, anatomski zgradbi in kemični zgradbi raznolik glede na drevesno vrsto, zato je proces sušenja izredno zahtevna tehnološka operacija. Dobro poznavanje lesa in njegovih posebnosti glede na drevesno vrsto in odstopanja znotraj drevesne vrste je osnova za pravilno določitev sušilnih pogojev pri tehničnem sušenju. Les sušimo zaradi izboljšanja lastnosti in primernejše uporabe. Lesu povečamo dimenzijsko stabilnost, biološko odpornost, mehanske lastnosti, zmanjšamo težo in zagotovimo lažjo obdelavo. Spremenijo se tudi toplotne, energijske, električne in akustične lastnosti. Sušenje je tudi z vidika stroškov zelo pomemben del v procesu predelave in obdelave lesa, saj je časovno dolg in energijsko zahteven postopek. Čas sušenja je odvisen od načina sušenja (režim sušenja), drevesne vrste, debeline sortimentov in začetne vlažnosti lesa. Navkljub sodobnim možnostim vodenja procesov, kinetiko sušenja kot termo difuzijskega procesa določa vlažnostni gradient, ki je tudi osnovni vzrok razvoja napetostnega polja po prerezu sušečih se elementov (Hanhijärvi in sod., 2003). Procesi sušenja lahko povzročijo trajne mehanske deformacije, v obliki površinskih in notranjih razpok ter nezaželenih geometrijskih sprememb sortimentov (Kowalski in Rybicki, 2007). Velike težave pogosto predstavlja sušenje manj prevodnih lesnih vrst in sortimentov večjih debelin. Pri teh je

problematična tako dolgotrajnost postopkov sušenja, kot tudi kakovost posušenega lesa, zlasti zaradi vgrajenih sušilnih napetosti in distribucije lesne vlažnosti (Hunter, 2002).

1.1 CILJI IN RAZISKOVALNE HIPOTEZE

Sušenje je zelo specifičen postopek, ki je časovno dolgotrajen in energijsko potraten, hkrati pa tudi zahteven za zagotovitev visoke kakovosti osušenega lesa. Cilj naloge je ugotoviti kakšne sušilne napetosti so sprejemljive, da le te ne povzročijo trajnih deformacij oziroma razpok in veženj. Z različnimi režimi sušenja lesa želimo preveriti vpliv sušilnih parametrov na sušilne napetosti in deformacije ter poiskati povezave med ostrino sušenja in sušilnimi napetosti. Cilj pri sušenju z blagimi režimi je doseči takšne sušilne napetosti, da le te ne povzročijo deformacij v lesu. Nastanek napetosti in deformacij bomo primerjali z vlažnostnim gradientom, odklonom loka lamele in sušilnimi parametri. Prav tako bi radi dokazali pozitiven vpliv na nastanek sušilnih napetosti z oscilacijami klime pri sušenju.

V nalogi bi radi ugotovili, kako procesni parametri in reološke lastnosti lesa vplivajo na nastanek notranjih napetosti. Zastavili smo si naslednje hipoteze:

- Razvoj sušilnih napetosti je značilno odvisen od intenzivnosti sušenja. Na intenzivnost sušenja vplivajo procesni parametri in sušilne karakteristike lesa.
- Razvoj napetostnega polja je odvisen od diferencialnega krčenja, ki ga narekuje vlažnostni gradient.
- Sušilne napetosti so odvisne od orientiranosti elementov, zato pričakujemo večje v tangencialnih deskah kot pa v radialnih. Ostrina sušenja hkrati bolj zmanjša trdnostne lastnosti lesa v tangencialni smeri.
- Viskoelastične lastnosti in trdnost se z vlažnostjo spreminjajo, zato intenzivnost sušenja in vlažnostnega gradienta v različnih vlažnostnih območjih različno vplivata na nastanek razpok in veženj.
- Pri sušenju v izmenjavajočih pogojih pričakujemo skrajšanje trajanja sušilnega postopka, zaradi mehanosorptivnega efekta pa nižje napetosti ter manj razpok in veženj.

2 SPLOŠNI DEL

2.1 KINETIKA SUŠENJA

Konvekcijsko sušenje pogosto obravnavamo parcialno in se deli na dve glavni fazi izločanja vode in sicer izločanje proste vode in izločanje vezane vode. Izločanje proste vode iz celičnih lumnov teoretično imenujemo prva faza sušilnega postopka. Medtem, ko pa se v nadaljevanju sušenje nadaljuje z difuzijskim odstranjevanjem vezane vode. Vezana voda se nahaja v celičnih stenah. Mejno točko oziroma prehod med obema fazama sušenja pa imenujemo točko nasičenja celičnih sten (TNCS).

2.1.1 Voda v lesu

Les takoj po poseku vsebuje veliko količino vode, ki se nahaja v lesu kot prosta voda in kot vezana voda. Prosta voda se nahaja v celičnih lumnih, medtem ko pa vezana v celični steni. Vsebnost proste vode v posamezni drevesni vrsti je odvisna od gostote lesa, ki preko deleža praznih prostorov in celičnih sten določa največjo možno lesno vlažnost lesa. Največjo lesno vlažnost lesa najdemo na lokaciji prevodne beljave. Na vsebnost proste vode bistveno vpliva tudi fiziološko stanje tkiva in učinek delovanja sekundarnih procesov. Pri postopku sušenja iz lesa najprej izhaja prosta voda, ko pa dosežemo točko nasičenja celičnih sten (TNCS), pa tudi vezano vodo. Prosta voda se tekom sušenja prevaja preko celičnih lumnov in medsebojnih pikenjskih povezav. Vezana voda je vezana na proste hidroksilne skupine hemiceluloze in celuloze in se izloča iz lesa z difuzijskim tokom.

Za natančno načrtovanje procesa sušilnega postopka je potrebno poznati tudi distribucijo vode ali radialni vlažnostni profil, ki nam prikaže kje se nahaja voda v drevesu takoj po poseku. Najvišja vlažnost lesa v drevesu je v beljavi ob kambijevi coni, kjer se prevaja iz korenin v krošnjo. Pri venčasto poroznih listavcih poteka prevajanje vode le po eni ali dveh prirastnih plasteh tik ob kambiju. Pri iglavcih in difuzno poroznih listavcih ima prevodno funkcijo več prirastnih plasti. V sredini debla se dosega najnižje vlažnosti, vendar ni nikoli nižja od TNCS. Večja odstopanja se pojavijo v diskoloriranem lesu (npr. rdeče srce pri bukvi, rjavo pri jesenu in topolu, ...) ali mokrinah (npr. jelka), odzivom lesnega tkiva na mehanske poškodbe, procesi ojedritve, idr.

2.1.2 Permeabilnost

Mero za prehod tekočin skozi porozno snov pod vplivom tlačnega gradienta imenujemo permeabilnost oziroma prevodnost. S prevodnostjo označujemo zmožnost materiala za prevajanje tekočin (kapljev in plinov). Prevodnost kapljev skozi kapilarne sisteme pojasnjuje Darcy-jev zakon, ki nam govori, da morata biti za učinkovito prevajanje izpolnjena dva pogoja in sicer material mora biti porozen (»prazne prostore« v lesu predstavljajo lumni pretežno vzdolžno orientiranih traheid, vlaken, trahej in parenhima in relativno manjšega števila radialno orientiranih parenhimskih celic in trakovnih traheid) in obstajati morajo medsebojne povezave (piknje).

Permeabilnost lesa za masni tok fluida je povezana s poroznostjo in povezavami med celičnimi lumni, zato je pomembno število in velikost odprtin v pikenjski membrani. Masni tok se pojavi pod učinkom statičnega ali kapilarnega tlačnega gradienta in se odvija skozi povezano porozno strukturo lesa, medtem ko je volumski tok proporcionalen tlačnemu gradientu (Siau, 1995).

$$\text{Darcy-jev zakon za tekočine:} \quad k_p = \frac{Q_v \times \Delta L}{A \times \Delta P}; \quad \dots(1)$$

$$\frac{Q_v}{A} = k_p \times \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad \dots(2)$$

Q_v ... volumski tok (m^3/s)

A ... površina, pravokotna na tok (m^2)

k_p ... koeficient permeabilnosti ($\text{m}^3/\text{m Pa s}$)

ΔP ... tlačna razlika (Pa)

ΔL ... dolžina (m)

Na permeabilnost vpliva tudi lokacija žaganic v drevesu, saj so v praksi najdaljši časi sušenja potrebni pri žaganicah iz beljave, ki vsebujejo največje količine vode proste vode. Če takšne žaganice sušimo skupaj s tistimi iz jedrovine, se mora proces sušenja zaradi ohranitve ustrezne kakovosti prilagoditi najnižji dopustni sušilni hitrosti. Ta je pri žaganicah iz jedrovine, zaradi običajno nižje začetne vlažnosti, že v izhodišču manjša (Pang, 2005).

Raziskave permeabilnosti lesa so potrdile velike razlike te fizikalne lastnosti med lesnimi vrstami v različnih anatomske smerih. Velike razlike v prevodnosti se kažejo tudi glede na fiziološko stanje lesnega tkiva. Permeabilnost v vzdolžni smeri variira med lesnimi vrstami z razmerjem $1 : 5 \times 10^6$ pri listavcih in $1 : 0,5 \times 10^6$ pri iglavcih (Hansmann in sod.,

2002). Del razlik pripišemo razlikam v prevodnosti beljave in jedrovine. Pri listavcih se v jedrovini prevodnost zmanjša zaradi pojava otiljenja in akumuliranja ekstraktivov. Najbolj prevodne lesne vrste so venčasto porozni listavci s premeri trahej do 500 μm , zelo blizu so tudi difuzno porozni listavci z večjim številom trahej premera 50 μm . Najmanj pa so pearmeabilni iglavci, saj nimajo specifičnih prevodnih elementov, majhne pikenjske povezave med traheidami pa povzročajo velik upor proti pretoku tekočin. Velike razlike v prevodnosti so tudi v prečni smeri, kar se kaže v izločanju vode pri sušenju lesa. Variabilnost permeabilnosti v radialni smeri pojasnjujejo z različno prevodnostjo radialnih trakov. Tangencialna prevodnost pa se pojasnjuje in je odvisna od stanja pikenjskih povezav v radialnih stenah celic, kjer je gostota največja. Perre in Karimi (2002), sta ugotovila veliko razmerje permeabilnosti v vzdolžni in tangencialni smeri. Pri iglavcih znaša med 1 :500 do 1 : 80×10^3 , vzdolžna prevodnost pa je z radialno v razmerju od 1 :15 do 1 : 50×10^3 .

2.1.3 Difuzivnost

Vezana voda lahko v lesu prehaja na različne načine. Prehaja lahko skozi celično steno, skozi lumen celice z difuzijo pare in z difuzijo pare skozi lumne in preko pikenjskih povezav iz lumna v lumen sosednje celice. Najpogostejša oblika prenosa vezane vode v lesu je difuzija skozi celične stene in lumne. Nekatere molekule vode pa ne prehajajo po celični steni, ampak pridejo do celičnega lumna, se odcepijo od celične stene in se kot para prenesejo preko lumna na drugo stran celične stene. Sledi zopet prenos kot difuzija vode po celični steni itd. Lahko pa vezana voda v celoti prehaja kot difuzija pare skozi celične lumne in piknje v celični steni. Delež parnega difuzijskega toka skozi piknje povečamo z razliko tlaka (vakuumsko sušenje) in z razliko temperatur, sicer je ta prehod skozi piknje v obliki pare zanemarljiv (Siau, 1995). Difuzivnost lahko definiramo kot molekulski snovni tok, ki se pojavi zaradi koncentracijskega gradienta difuzijske substance.

Gibanje vode v lesu pri nestacionarnih pogojih lahko opišemo s Fickovimi zakoni. Fickovi zakoni razlagajo in definirajo difuzijo vodnih molekul na osnovi koncentracijskega gradienta in so v osnovi uporabni zgolj za proučevanje gibanja vezane vode ter vodne pare pri vlažnostih lesa pod TNCS. Zaradi enostavnosti opisa procesa in matematične rešitve so pri tovrstnem modeliranju največkrat vključevali le konstantno difuzivnost, neodvisno od lesne vlažnosti, temperature sušenja in anizotropnih strukturnih lastnosti lesnega tkiva, ter pri tem upoštevali osnovna izhodišča Fickovih zakonov (Luikov, 1996; Incropera in DeWitt, 1985;

Rohsenow in sod., 1998; iz Straže, 2010). V primeru nestacionarnih pogojev se enodimenzionalni snovni tok zapiše kot :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right); \quad u = u_0 \text{ za } x \in (0, L); t = 0 \quad \dots(3)$$

$0, L$... sredina in razdalja do površine preizkušanca, pri enoosnem izhlapevanju vode iz lesa,

D ... difuzijski koeficient (m^2/s),

u ... vlažnost lesa (%),

t ... čas (s).

Na difuzijo vode vpliva kot zunanji dejavnik samo temperatura, saj višja temperatura močno pospeši gibanje vezane vode. Pri sušenju bora pri temperaturi 80°C je gibanje vezane vode trikrat hitrejša, kot pa pri temperaturi 50°C .

2.1.4 Izhlapevanje vode iz površine

Pri raziskovanju izhlapevanja vode iz površin s konvekcijskim sušenjem večina avtorjev izhlapevanje vode deli na dva dela. Prvi del je izhlapevanje vode s površine, drugi pa tok vode s sredice na površino. Del raziskav temelji na teoriji analogije prenosa toplote in snovi, ki je uporabna pri nasičenih lesnih površinah za izhlapevanje proste vode. Ostale raziskave pa celoten proces sušenja predstavi z difuzijskim modelom, ki v osnovi ob površini izhlapevanja predvideva koncentracijski gradient, ki je potencial snovnega toka vode. Pri obeh raziskavah so avtorji ugotovili nastanek stacionarnega mejnega filma zraka tik nad površino in njegov vpliv na izhlapevanje vode iz površine. Notranji snovni tok pa poteka kot tok proste vode in kot difuzijski tok vezane vode.

Za pojasnitev zmanjšane izhlapevanja proste vode v začetni fazi sušenja, je potrebno dobro poznavanje lastnosti realnih površin sušечеlega lesa in strukture lesa pod površino. Vsaka površina ima glede na obdelavo določeno stopnjo hrapavosti, ki pri sušenju vpliva na gibanje zraka ob površini. Prav tako pa se je za pojasnitev zmanjšanja izhlapevanja proste vode razvil koncept suhega površinskega sloja. Nekateri avtorji so pri raziskavah ugotovili in potrdili prisotnost suhega površinskega sloja. Debelina filma variira, kar je posledica uporabljenih raziskovalnih pogojev, lesne vrste in tehnike določanja. Primerjava debeline suhega

površinskega sloja glede na povprečno vlažnost lesa pa kaže na postopno povečevanje debeline tega sloja, ko se povprečna količina proste vode v materialu znižuje (Salin, 2002).

Spremenjena kinetika sušenja lesa v začetni fazi zahteva prilagoditev pogojev sušenja. S tem se lahko podaljša izkoriščanje kapilarnega toka pri sušenju in prepreči pojav površinskih difuzijskih barier ter posledičnih velikih vlažnostnih in napetostnih gradientov.

Na kinetiko sušenja lesa se je pozitivno obneslo podrobnejše razvrščanje po lesnih vrstah in debelini lesa. Zhang in sod. (1996) so uporabljali kriterij razvrščanja glede na gostoto in začetno vlažnost lesa. Ločevali so tudi glede na lokacijo žaganic (beljava, jedrovina), ki se razlikujejo tako po fizikalnih kot tudi kemijskih lastnostih (Pang, 2005). Wiberg (2001) je ugotovil pozitiven vpliv na kinetiko sušenja z reverziranjem ventilatorjev, saj se s spreminjanjem smeri ventilatorjev spreminja tudi masni tok predvsem v začetni fazi sušenja.

Raziskave v splošnem potrjujejo povečanje izhlapevanja vode s površin z dvigovanjem hitrosti gibanja zraka čez površino lesa. Ugotovili so tudi tanjšanje debeline t. i. stacionarnega mejnega filma zraka nad površino lesa (Welty in sod., 1984).

Študija sušenja hrastovine (*Quercus rubra* L.) je v higroskopskem območju, pri sušenju s konstantno temperaturo in variiranjem hitrosti zraka in relativne zračne vlažnosti, potrdila učinek razmerja snovnih uporov na čas sušenja. Čas sušenja eksponentno povečeval pri nižanju razmerja snovne emisivnosti in difuzivnosti lesa (Simpson, 1993).

V raziskavah izboljšanja kinetike sušenja lesa so proučevali vpliv dodatne obdelave žaganih površin in sicer z dodatnim skobljanjem žaganic hrastovine in češnjevega lesa do globine 1,5 mm, da so odstranili neravnosti na površinah (McMillen in Baltes, 1972). Pri uporabi enakega standardnega režima sušenja se je sušenje tako obdelanega lesa skrajšalo za 29 % pri hrastovini ter za 12 % pri češnjevem lesu. Del skrajšanja procesa so pripisali manjši debelini novih sortimentov, preostanek pa je posledica bolj gladkih površin ter boljšega izhlapevanja vode v okolico. V študiji so splošno potrdili za 10% višjo hitrost zraka skozi zložaje pri isti vrtilni hitrosti ventilatorjev.

2.2 RAZVOJ NAPETOSTNEGA POLJA

Sušenje lesa je glavni vzrok za nastajanje sušilnih napetosti in sušilnih napak. Razumevanje sušilnih napetosti zagotavlja, da se minimizira škoda, ki se pri postopku sušenja lahko pojavi.

Sušilne napetosti se lahko negativno odrazijo šele v fazi predelave. Notranje napetosti je mogoče zaznati z destruktivnimi metodami, lahko pa jih je s poznavanjem ustreznih napetostnih funkcij in parametrov materiala tudi predvideti. Lahko jih izračunamo iz vlažnostnega gradienta, porazdelitve vlažnosti, reološkimi lastnostmi ali teoretično predpostavljenimi modeli krčenja (Kollmann in Cote, 1968 in Perré in Passard, 2007).

Med postopkom sušenja vplivajo na velikost trajnih plastičnih deformacij vlažnost, temperatura, vrsta lesa, orientiranost, nivo in trajanje napetosti. Zlasti pri lesovih z velikimi skrčki, kamor sodi bukovina, se večjemu ali manjšemu zaskorjenju ne moremo izogniti, zato je nadzorovanje sušilnega postopka še toliko pomembnejše (Perré in Passard, 2007).

2.2.1 Vpliv parametrov sušenja na razvoj napetostnega polja

Razvoj napetosti in pojav deformacij med procesom sušenja sta bistveno odvisna od lesne vlažnosti, nastajajočega vlažnostnega gradienta in temperature (Ranta-Maunus, 1975; Salin, 1992). Kowalski (1996) je prav tako ugotovil da je sprememba vlage in temperatura neposredni vzrok za nastanek deformacij. Drugi razlog za deformacije so obremenitve, ki nastanejo med sušenjem, ko vlaga in temperaturne porazdelitve nehomogeno posušenega telesa vplivajo na deformacije.

Na sušilne napetosti, ki nastanejo med sušenjem, močno vplivajo različni parametri sušenja kot so temperatura, relativna zračna vlažnost in hitrost zraka v sušilni komori (Simpson, 1991; Keey s sod., 2000).

Višja temperatura pri konstantni relativni zračni vlažnosti pomeni večjo hitrost sušenja, ki jo lahko predstavimo z dveh vidikov. Višja temperatura zraka poveča zmožnost adsorpcije vlage (Kolin, 2000), istočasno pa višja temperatura lesa poveča difuzijo vode. Višja temperatura (nad 56°C) uničuje gobe in insekte, vendar negativno vpliva na mehanske lastnosti lesa, saj s povišano temperaturo povečujemo možnost nastanka deformacij, razpok in obarvanj.

Nižja relativna zračna vlažnost pri konstantni temperaturi prav tako pomeni večjo hitrost sušenja. Razlog se nahaja v hitrejšem izparevanju vlage s površin, zaradi česa nastane večji vlažnostni gradient. Denig s sod. (2000) je ugotovil, da se z večjo hitrostjo sušenja in nižjo relativno zračno vlažnostjo zmanjša nastanek obarvanj, vendar če je sušenje prehitro lahko nastanejo površinske razpoke ali pa tudi zaskorjenje.

S povišanjem hitrosti pretoka zraka se poveča hitrost sušenja, saj se s površin hitreje odvaja vlaga, ki s površin izpareva. Ključni faktor je difuzija vode, ne pa hitrost izparevanja, tako da je hitrost kroženja zraka bolj pomembna v začetni fazi sušenja kot pa v nadaljevanju.

2.2.2 Generiranje napetosti

Veženja in porušitve (razpoke) lesnih sortimentov pripisujemo trem osnovnim vzrokom generiranja napetosti v lesnem tkivu, deformacije pa lahko povzročijo tudi zunanje obremenitve:

- a) Rastne napetosti se inkorporirajo že v rastočem drevesu;
- b) Med sušenje se pojavijo napetosti zaradi prečne krčitvene anizotropije;
- c) Bistven pomen generiranju napetosti pripisujemo vlažnostnemu gradientu.

Rastne napetosti se vgradijo v lesu že med nastankom v kambijeви coni oz. zadnji fazi diferenciacije. Periferija debla je v vzdolžni smeri obremenjena na nateg, sredina pa na tlak. V tangencialni smeri je obod debla obremenjen na tlak, v sredini pa se v tej smeri pojavijo natezne napetosti. Zaradi sproščanja velikih rastnih napetosti se pri poseku in med razžagovanjem takoj pojavijo značilna veženja, srčne razpoke, kolesivost in tlačne porušitve (Kubler, 1975). Napetosti je mogoče nekoliko sprostiti s parjenjem lesa (Gorišek, 1992).

Izrazito neenako krčenje v radialni in tangencialni smeri se v praksi odraža tekom sušenja na oblikovnih spremembah prečnega prereza, kar je posledica prečne krčitvene anizotropije. Deformacije so odvisne od intenzivnosti krčenja, na katerega vpliva gostota in razmerje krčenja v tangencialni in radialni smeri. Razlike v krčenju so tudi posledica nekoliko nižje gostote trakovnega tkiva. Vzrok prečni anizotropiji krčenja je lahko tudi učinek poissonovega razmerja, ki zaradi zaviranja radialnega krčenja osnovnega tkiva poveča njegovo krčenja v tangencialni smeri. Z večjim deležem ranega lesa in večjim razmerjem gostot kasnega ter ranega lesa se prečna krčitvena anizotropija povečuje. Z naraščanjem gostote lesa se povečuje tangencialni in radialni skrček. Anizotropija na celotnem

higroskopskem območju ni konstantna, največja je na intervalu tik pod točko nasičenja celičnih sten.

Pri manjšem vlažnostnem gradientu, ki je odvisen tudi od ostrine sušenja, je nivo napetosti relativno nizek in v elastičnem območju. Pri večjem vlažnostnem gradientu je krčenje večje, napetosti pa prekoračijo mejo elastičnosti s pojavom trajnih plastičnih deformacij. Te so vzrok, da je krčenje površine manjše kot normalno, v zadnji fazi sušenja pa so odgovorne za tako imenovano obrnitev napetosti in nastanek zaskoritve. Zelo intenzivno sušenje inducira velik gradient vlažnosti in natezne napetosti, ki lahko prekoračijo natezno trdnost površinskih strojev in tkivo se poruši (pokline). Glavni razlog za razpoke je pojav neenotnega krčenja lesa, kar se pri sušenju kaže v sušilnih napetostih.

Kot smo že zgoraj omenili ima bistven vpliv na generiranje napetosti vlažnostni gradient. Pri manjšem vlažnostnem gradientu nastanejo manjše obremenitve, ki jih v procesu sušenja povzročajo manjše razlike v krčenjih sosednjih slojev lesa in jih zaznavamo kot elastične deformacije. Tudi v večini primerov uporabe, kljub dolgotrajnejšim obremenitvam, predstavlja elastična komponenta prevladujočo deformacijo. V tem območju velja linearna zveza med napetostjo in specifično deformacijo, ki jo lahko ponazorimo s Hookovim modelom idealne linearne elastičnosti. Pri večjih obremenitvah, povezano tudi z večjim gradientom vlažnosti, zveza med napetostjo in deformacijo ni več linearna, saj se deformacije povečujejo hitreje od naraščajoče napetosti. Pojavijo se trajne nepovratne plastične deformacije. V uporabi se jim največkrat skušamo izogniti, namenoma pa jih povzročimo kadar želimo trajno spremeniti obliko. Še večje deformacije vodijo do porušitve, na materialu se v drugi fazi sušenja pojavijo površinske razpoke, notranje pa na koncu sušilnega postopka. Kritično obdobje sušilnega postopka povezujemo z začetkom druge faze, ko se površina lesa začne sušiti pod TNCS. Z vidika kinetike sušenja se pojavi difuzijska bariera, ki močno upočasni hitrost prehoda vode skozi osušeni površinski sloj, hkrati pa se začne površina krčiti, kar povzroči natezne napetosti. Notranjost je obremenjena tlačno.

Vzrok za nastanek sušilnih napetosti je posledica diferencialnega krčenja zunanjega dela deske (površina) in notranjega dela deske (sredica), kar lahko pri velikih sušilnih napetostih povzroči sušilne napake. V začetku postopka sušenja se začnejo krčiti vlakna na površini. Krčenje lesa je glavni razlog za pojav sušilnih napetosti. Pri vlažnosti nad TNCS se dimenzije ne spreminjajo, saj izpareva samo prosta voda. Ko se lesna vlažnost spusti pod točko nasičenja celičnih sten, začne iz vzorcev izločati vezana voda.

Sušilne napetosti v lesu nastanejo zaradi vlažnostnega gradienta in neenakomernega krčenja po prerezu deske med sušenjem (Simpson, 1991). Perre (2007) ugotavlja, da se na začetku sušilnega postopka v lesu ne pojavi krčenje, saj na začetku iz lesa izhaja samo prosta voda. Na začetku druge faze sušenja se pojavi krčenje najprej na izpostavljenih površinah. Kowalski (2001) navaja, da sušilne napetosti pri sušilnem postopku nastanejo zaradi neenotnega krčenja lesa in so glavni razlog za razpoke. Ti pojavi postanejo še posebej nevarni pri zelo velikem vlažnostnem gradientu. Gorišek (2008) kot glavni razlog za pojav sušilnih napetosti navaja krčenje lesa. Pri normalnih pogojih se dimenzije ne spreminjajo, dokler se lesna vlažnost ne spusti pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS). Razmerje med krčenjem ali nabrekanjem v tangencialni in radialni smeri imenujemo prečna krčitvena anizotropija. V praksi se neenako krčenje v radialni in tangencialni smeri odraža tekom sušenja na oblikovnih spremembah prečnega prereza. Posledice prečne krčitvene anizotropije se kažejo v koritavosti in žlebatosti pri tangencialno orientiranih deskah, kvadratni prerez se pri orientiranih vzorcih deformira v pravokotnega, pri neorientiranih pa rombastega. Pri okroglem prerezu se le ta spremeni v eliptičnega.

Perre (2007) navaja, da se natezne napetosti pojavijo v slojih tik pod površino, medtem ko se v srednjih slojih pojavijo tlačne napetosti. Med to fazo sušenja se lahko pojavijo površinske razpoke. V nadaljevanju sušilnega postopka se s povečanjem temperature aktivira viskoelastično in mehanosorptivno lezenje. Na koncu sušilnega postopka se v površinskih slojih pojavijo tlačne napetosti, v srednjih slojih pa natezne napetosti.

Sušilne napetosti v lesu so povzročene v povezavi z neenakomernim krčenjem in gradientom vlage v notranjosti plošče med sušenjem. Glede na to, da je toplotna obremenitev navadno zelo majhna, so skupne deformacije lesa pod obremenitvijo sestavljene iz prostega krčenja, trenutne, viskoelastične in mehanosorptivne deformacije.

Simpson (1991) navaja, da glede na to, da je vpliv temperature in s tem povezana termična dilatacija po navadi zanemarljiva, je skupna deformacija lesa pod obremenitvijo sestavljene iz prostega krčenja, elastične, viskoelastične in mehanosorptivne deformacije.

Dengyun (2007) je model sušilnih napetosti zastavil tako, da skupno krčenje lesa ($\square$) vsota prostega krčenja ($\square_s$), trenutnih deformacij ($\square_e$), viskoelastičnih deformacij ($\square_{ve}$) in mehanosorptivnih deformacij ($\square_{ms}$). Iz modela je možno izračunati napetosti, ko poznamo dejansko krčenje lesa in gradient vlage. Glede na to teorijo so se odločili za on-line merjenje sušilnih napetosti z določanjem in merjenjem gradienta vlažnosti lesa med površino in

notranjostjo deske ter tudi določili dejansko krčenje deske. Za izračunavanje napetosti je uporabil naslednje enačbe:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{ms} \quad \dots(4)$$

Kjer je:

- ε ... skupno krčenje lesa
- ε_s ... vsota prostega krčenja
- ε_e ... trenutne deformacije
- ε_{ve} ... viskoelastične deformacije
- ε_{ms} ... mehanosorptivne deformacije.

Prosto krčenje izračunamo po naslednji enačbi:

$$\varepsilon_e = \alpha \cdot \Delta M \ (M \leq M_{TNCs}); \quad \dots(5)$$

- ΔM ... sprememba vlažnosti
- α ... koeficient krčenja

Trenutne deformacije izračunamo po spodnji enačbi:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma}{E}; \quad \dots(6)$$

- σ ... sušilna napetost
- E ... modul elastičnosti

Nato izračunamo še viskoelastične in mehanosorptivne deformacije po spodnjih enačbah:

$$\varepsilon_{ve} = a \cdot \sigma \cdot t^n; \quad \dots(7)$$

- σ ... sušilna napetost
- t ... čas obremenitve
- a, n ... koeficienti za viskoelastičnost

$$\varepsilon_{ms} = m \cdot \sigma \cdot \Delta M \quad \dots(8)$$

m ... mehanosorptivni koeficient

ΔM ... sprememba vlažnosti

σ ... sušilna napetost

Napetosti in deformacije se pojavijo zaradi zmanjševanja vlage lesa med sušenjem in visoke temperature postopka sušenja, kar vodi v krčenje lesa. Mehanske lastnosti lesa so kompleksne, kombinirane z različnim obnašanjem lesa, ki vključuje elastičnost, plastičnost, viskoelastičnost in mehanosorptivnost. V primeru lesa je to obnašanje močno odvisno od lesne vlage in temperature. (Ranta-Maunus, 1975; Salin, 1992; Passard and Perré, 2001; Svensson and Toratti, 2002).

2.2.3 Določanje sušilnih napetosti v sušilnem postopku

Napetost je mogoče opazovati na več načinov, vendar najenostavnejše tehnike v industriji temeljijo tako, da material razrežemo na manjše dele in v le teh določamo napetosti, ki so nastale med postopkom sušenja (Perre, 2007). Med najbolj uveljavljenimi sta vilični test in prežagovalna metoda (Perré in Passard, 2007). V laboratoriju ob primerno računalniško podprti opremi poznamo tudi optične in akustične metode.

Trenutne tehnike ne omogočajo kontinuiranega spremljanja napetosti, vse zamišljene tehnike v industriji temeljijo na destruktivnih metodah, tako da material razrežemo na manjše dele in v le teh določamo napetosti, ki so nastale med postopkom sušenja. Kot mogoča metoda za zaznavanje sušilnih napetosti pri sušenju lesa se uporablja akustična emisija. (Kowalski, 2001).

Pri oceni notranjih napetosti v lesu med sušenjem običajno uporabljamo mnoge standardne tehnike kot je vilični test (Simpson, 1991) in McMillen test (McMillen, 1963).

Modeli so uporabljeni kot podlaga za določitev sušilnih napetosti iz razporeditve vlažnosti in dejanskega krčenja deske. Ugotovljeno je, da lahko sušilne napetosti med postopkom sušenja določamo z merjenjem vlažnosti na površini in v sredini deske, ter s tem na podlagi gradienta vlažnosti določimo dejansko krčenje deske (Dengyun s sod., 2007).

Procesni parametri oziroma ostrina sušenja imajo velik vpliv na nastanek napetosti med sušilnim postopkom. Eden izmed postopkov, kjer med sušenjem dosežemo manjše napetosti, je oscilirajoče spreminjanje procesnih parametrov.

Inducirane sušilne napetosti nastanejo zaradi nehomogenega krčenja suhih snovi. Z mehanskim modelom sušenja lahko določimo polja v notranjosti materiala, kjer so sušilne napetosti maksimalne. Pričakuje se, da se bodo razpoke pojavile na teh mestih, kjer so maksimalne sušilne napetosti večje od trdnosti materiala (Kowalski, 2001).

Brandao in Perre (1996) sta razvila nesimetrični test sušenja z uporabo izolacije petih ploskev. Vzorec se posuši tako, da lahko vlaga potuje le skozi prosto ploskev. Asimetrični profili vlage proizvajajo napetostno polje, zaradi česar se vzorec ukrivi.

2.3 DEFORMACIJE PRI SUŠENJU

Sušilne napake, kot so razpoke, nastanejo v glavnem zaradi sušilnih napetosti, ki presegajo trdnost materiala. Zlasti pri neobremenjenih sortimentih prihaja do nezaželenih veženj, zavitosti, lokavosti ali nastanka sloča. S počasnim sušenjem so tudi manjše sušilne napetosti, vendar se zaradi počasnega postopka energijska učinkovitost zmanjša in cena sušenja poveča. Sušilne napetosti je treba obravnavati kot kontrolni parameter v sušilnem postopku. Več raziskovalcev (c. f. Dengyun s sod., 2007) navaja, da se hitrost sušenja lahko uravnava s kontrolo in spremljanjem sušilnih napetosti, da le te med sušenjem ne bi povzročile trajnih deformacij.

Procesni parametri tako bistveno vplivajo na kakovost osušenega lesa, saj so deformacije in razpoke v lesu osnovni problem za žagarsko industrijo. Tako deformacije kot razpoke vodijo k zmanjšanju kakovosti lesa, kar posledično pomeni tudi zmanjšanje cene (Simpson, 1991).

Vizualna ocena kakovosti sušenja najpogosteje temelji na številu in velikosti razpok ter veženja, ki nastanejo zaradi notranjih napetosti kot posledica že vgrajenih rastnih napetosti v živem drevesu, krčivne anizotropije, usmerjenosti vlaken in vlažnostnega gradienta. Deformacijam se v lesu zelo težko izognemo. Ko napetosti presežejo trdnosti materiala, se na materialu predvsem v drugi fazi sušilnega postopka pojavijo zunanje razpoke, notranje razpoke pa v končni fazi sušilnega postopka. Ta vrsta napak je v močni povezavi s programom sušenja ali problemi regulacije sušilne komore. Glavni cilj sušenja je, da se

izognemo tem napakam, kar dosežemo z inovacijo in izboljšanjem režimov sušilnega postopka.

Deformacije, ki nastanejo pri nepravilnem postopku sušenja so:

- zaskorjenje
- razpoke (čelne razpoke, radialne razpoke, pokline, satavost oz. notranje razpoke)
- veženja.

Čelne razpoke, ki ne segajo čez ves presek, so vidne na prečnem prerezu kot napoke. Tiste, ki segajo čez celotni presek, imenujemo reže. Čelne razpoke so posledica hitrega prenašanja proste in vezane vode v vzdolžni smeri, torej hitrejšega sušenja s prečnih površin. Nastanek razpok lahko zmanjšamo z zaščito čel s premazi, ki preprečujejo njihovo hitro izsuševanje. Radialne razpoke z izvorom v strženu, razpoke, ki nastanejo zaradi prepletene rasti, krožne razpoke (kolesivost) in zvezdaste razpoke, pa tudi nekatera veženja so posledica močnih rastnih napetosti, neravnega poteka vlaken in prečne krčitvene anizotropije. V sušilnem postopku se jim ne moremo povsem izogniti. Predhodno parjenje, mehansko zavarovanje čel s sponami in premazovanje ter sušenje pod obtežitvijo so postopki, s katerimi učinke le ublažimo, ne moremo pa jih preprečiti. Pokline so navadno ozke in dolge površinske razpoke, ki nastanejo v začetnih stopnjah sušenja, če poteka prehitro. Krčenje hitro sušeče površine medtem zavira vlažna sredica, zato se v površinskih slojih pojavijo natezne napetosti. Pokline nastanejo, ko napetosti prekoračijo trdnosti lesa in so najpogostejše na tangencialnih deskah. V nadaljevanju sušenja, ko se napetost obrne, se največkrat zaprejo. Po sušenju je zato pokline težko identificirati, kot neprijetna napaka pa se največkrat spet »pojavi« pri površinski obdelavi.

Zaskorjenje kot samo še ni deformacija, vendar močno zaskorjenje povzroči notranje deformacije, ki jih imenujemo notranje razpoke. Zaskorjenju se pri postopku sušenja ne moremo povsem izogniti, saj je pri sušenju pod točko nasičenja celičnih sten zaskorjenje vedno prisotno. Z nadzorovanim in previdnim postopkom lahko učinek izničimo. Zaskorjenje lahko spremljamo takoj, ko se površina lesa začne sušiti pod točko nasičenja celičnih sten. Zaradi krčenja se na površini pojavijo natezne napetosti, medtem ko je sredica obremenjena na tlak. V ostrih razmerah sušenja lahko napetosti na površini povzročijo trajne plastične deformacije, zato se površina skrči manj kot bi se sicer. Nasprotno je v sredici, kjer tlačne napetosti povzročijo celo večje krčenje od krčenja neobremenjenega lesa. Posledica razlik v krčenju površine in sredice je »obrnjeno« napetostno polje na koncu sušenja. Sredica je

obremenjena na nateg, površina pa na tlak ob sicer enakomerni vlažnosti. Zaskorjenje spremljamo med celotnim postopkom sušenja, najpogosteje z viličnim testom ali drugimi metodami ugotavljanja notranjih napetosti, hkrati pa moramo spremljati tudi vlažnostni gradient. Če med postopkom sušenja zaradi nepravilne klime ustvarimo v lesu močno zaskorjenje, le te vodijo do pojava notranjih razpok. Notranje razpoke nastanejo proti koncu sušenja zaradi močnega zaskorjenja, ko natezne napetosti v sredici prekoračijo prečne natezne trdnosti lesnega tkiva. Notranje razpoke je mogoče dokazati le z destruktivno metodo, to je odžaganjem prečnega vzorca na oddaljenosti vsaj 30 cm od čela deske. Ker notranje razpoke povsem razvrednotijo lesne elemente, jih ne ocenjujemo z njihovo globino in dolžino, ampak s pogostostjo pojavljanja.

Veženje je deformacija ravne ploskve obdelovanca. V to skupino napak sodi lok, sabljavost, zavitost in koritavost. Veženje se pojavi predvsem pri reakcijskem lesu zaradi značilnega velikega osnega krčenja. Izrazito neenako krčenje v radialni in tangencialni smeri se v praksi odraža tekom sušenja na oblikovnih spremembah prečnega prereza. Deformacije so odvisne od intenzivnosti krčenja, na katerega vpliva tudi gostota in od razmerja krčenja v tangencialni in radialni smeri. Količnik med tangencialnim in radialnim skrčkom imenujemo prečna krčitvena anizotropija.

2.4 OSCILIRAJOČE SUŠENJE

Oscilacijsko sušenje prvi uporabi Haygreen (1965), ki navaja, da izključitev ogrevanja in odpiranje sušilne komore lahko pospeši sušenje desk oreha, medtem ko se zmanjša strošek energije.

Oscilacije klime se med postopkom sušenja lahko izvajajo na več različnih načinov in sicer:

- oscilacijo temperature,
- oscilacijo relativne zračne vlažnosti,
- oscilacijo ravnovesne vlažnosti,
- kombinirane oscilacije (temperatura in ravnovesno vlažnost).

Odločili smo se za oscilacijsko sušenje z oscilacijo relativne zračne vlažnosti. Oscilacijo relativne zračne vlažnosti smo vršili v enakih intervalih čez celoten režim sušenja. Oscilacijo vršimo od začetka do konca sušilnega procesa.

Vpliv oscilacije relativne zračne vlažnosti ima pozitivne učinke na proces sušenja. Nižja kot je relativna zračna vlažnost, večja je kapaciteta za adsorpcijo vlage. Istočasno zaradi povečane razlike v parcialnih tlakih vodne pare prihaja do hitrejšega izparevanja vlage s površine lesa. To privede do povečanega vlažnostnega gradienta, kar poveča hitrost difuzije.

Terziev in sod. (2002) so primerjali konvencionalno in oscilirajoče sušenje bora prereza $50 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$. Sušili so tri šarže in sicer eno po navadnem režimu, drugi dve pa po režimu z oscilacijo. Na koncu sušenja so ugotavljali kakovost sušenja, ki je vključevala končno vlažnost, vlažnostni gradient, površinske razpoke in merjenje zaskorjenosti z velikostjo loka lamele. Ugotovili so, da oscilirajoče sušenje ni boljše z vidika kvalitete sušenja v primerjavi s konvencionalnim sušenjem pri sušenju 50 mm bora. Prav tako oscilacije niso izboljšale časa sušenja. Zaradi določenih tehničnih težav in malega števila vzorcev avtorji dopuščajo nepravilnosti pri doseženih rezultatih.

Oscilacije relativne zračne vlažnosti med postopkom sušenja vplivajo na lastnosti lesa med sušenjem. Velik vpliv ima na čas trajanja postopka. Avtorji navajajo, da se trajanje sušilnega procesa zmanjša za do 10 %. (Welling s sod., 2003)

Welling s sod. (2003) pojasnjuje, da nizka relativna zračna vlažnost vodi k intenzivnemu izparevanju vlage s površine, nastaja večji gradient in s tem se poveča hitrost gibanja vlage. Ko nastopi faza visoke relativne zračne vlažnosti, se površinski sloji navlažujejo. Poseben mehanizem, ki se odvija med oscilacijo, je relaksacija napetosti v preizkušancih.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

Specifična značilnost lesne vrste, problematika sušenja, razširjenost in njena uporabnost, so vodili k odločitvi za proučevanje sušenja bukovine (*Fagus sylvatica* L.). Les bukovine je rdečkasto bele barve, beljava in jedrovina se barvno ne ločita, v kolikor ni prisoten diskoloriran les. Diskoloriran les je rdečerjav, v prečnem prerezu hloda oblakast. Les ima gostoto $\rho_0 = 680 \text{ kg/m}^3$, je zelo trden in se zelo krči in nabreka. Dimenzijska stabilnost je neugodna, trdnostne lastnosti so dobre. Les je žilav, elastičen in trd. Delež juvenilnega lesa je običajno zanemarljiv, možen je obilnejši pojav tenzijskega lesa. Ostale lastnosti bukovine in vrednosti so vidne v spodnji tabeli (Preglednica 1) (Čufar, 2006). Bukovina nima specifičnega vonja ali okusa. Uporaba lesa je zelo raznovrstna, npr. za stavbno mizarstvo, stopnice, opaže, parket, pohištvo; pri čemer se uporablja masiven, krivljen ali vezan les. Krivljen in vezan les se uporablja predvsem za izdelke, pri katerih so potrebne dobre trdnostne lastnosti.

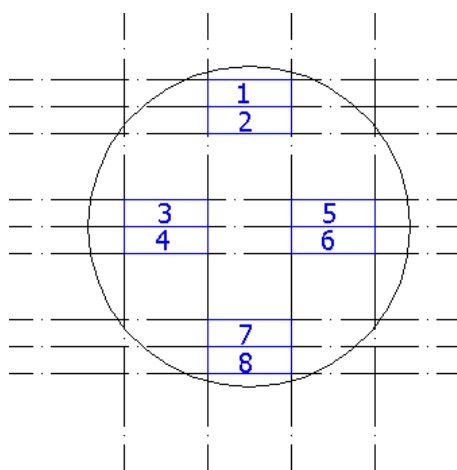
Preglednica 1: Lastnosti bukovine (Čufar, 2001).

Table 1: Beech properties (Čufar, 2001).

Gostota	ρ_0	490 ... 680 ... 880 kg/m^3
	ρ_{15}	540 ... 720 ... 910 kg/m^3
E-modul	vzporedno s potekom aksialnih elementov	16 000 N/mm^2 ... 14 000 N/mm^2
Tlačna trdnost		53 N/mm^2 ... 60 N/mm^2
Natezna trdnost		135 N/mm^2 ... 135 N/mm^2
Upogibna trdnost		105 N/mm^2 ... 120 N/mm^2
Strižna trdnost		8 N/mm^2 ... 10 N/mm^2
Krčenje	vzdolžno	0,30%
	tangencialno	11,80%
	radialno	5,80%
	volumsko	14,0 ... 17,9 ... 21,0%
Diferencialni nabrek	q_{rad}	0,20%/%
	q_{tan}	0,41%/%
	$q_{\text{tan}}/q_{\text{rad}}$	2,1 %/%%

3.1.1 Izbira bukovine

Bukova hlodovina izvira s področja Slovenije in sicer s Snežnika. Po razžagovanju na tračnem žagalnem stroju na debelino 42 mm smo slučajnostno izbrali 4 tangencialne in 2 radialni deski. Deske smo nato na večlistnem krožnem žagalnem stroju razrezali na širino 130 mm. Medsebojno čim večjo primerljivost preizkušancev smo dosegli z razporeditvijo desk zaporedno vzdolž stržena oziroma vzporedno drugo ob drugi (Slika 1). Tako smo za izvedbo eksperimenta pridobili 8 vzporednih in 3 zaporedne deske dimenzije 130 mm x 42 mm x 500 mm. Tak način izbora desk je omogočil proučevanje na tangencialno in radialno orientiranih deskah.



Slika 1: Shema razžagovanja hlodovine.

Figure 1: Logs sawing scheme.

3.2 METODE

3.2.1 Načrtovanje in izvajanje sušilnega procesa

Vpliv procesnih parametrov na sušilne napetosti in deformacije smo proučevali v treh postopkih sušenja različnih intenzivnosti. Na ostrino in kinetiko sušenja smo vplivali z izvajanjem sušenja pri različnih temperaturnih režimih in s spreminjanjem relativne zračne vlažnosti. Hitrosti zraka je bila v vseh treh procesih enaka in je znašala 1,5 m/s.

Postopke smo poimenovali po intenzivnosti sušenja. Režime smo označili z naslednjimi okrajšavami:

- Oster režim sušenja (OST)

- Blag režim sušenja (BL)
- Oscilirajoč režim sušenja (OSC)

Interval odvzema vzorcev smo določili na podlagi teoretičnega izračuna časa sušenja (Kollman, 1975) za posamezen sušilni režim. Čas smo izračunali po naslednji enačbi za vsak posamezen interval :

$$t = \frac{1}{\alpha} \times \ln \frac{u_z}{u_k} \times \frac{65}{T} \times \left(\frac{d}{25}\right)^{1.5} \quad \dots(9)$$

Kjer je:

T	 čas sušenja (h)
α	 koeficient lesne vrste
u_z	 začetna vlažnost lesa (%)
u_k	 končna vlažnost lesa (%)
T	 temperatura (°C)
d	 debelina materiala (mm)
h	 hitrost kroženja zraka (m/s)

V prvi šarži smo se želeli s pogoji sušenja približati ostrejšim načinom sušenja v industrijski praksi. Po osmih urah sušenja smo les segreli na 40 °C, po segrevanju pa smo temperaturo dvignili na 48 °C, ravnovesna vlažnost je na začetku bila 12,5 %. Sušilni postopek smo nato vodili po načrtovanem programu prikazanem v Preglednici 2 in proti koncu sušenja dosegli temperaturo 60 °C. Postopek izenačevanja je trajal 12 ur, pri temperaturi 45 °C in ravnovesni vlažnosti 8 %.

Preglednica 2: Parametri ostrega režima sušenja (OST); u_r = ravnovesna vlažnost; ΔT = psihometerska razlika.

Table 2: Parameters of sharp drying regime (OST); u_r = equilibrium moisture ΔT = psychometric difference.

OSTER (OST)					
Vlažnost (%)	Temperatura (°C)	Ur (%)	ΔT (°C)	Čas po Kollmann (h)	Predvideni čas sušenja (h)
SEG.	40	14	3	8	8
60	48	12,5	5		
40	48	11,7	6	49,0	136
30	48	11	6,5	34,8	68
25	50	9,4	9	21,2	54
20	55	6,9	13,5	23,5	52
15	58	4,7	19	28,8	56
10	60	3,4	22	39,2	58
8	50	3,2	24	25,9	32
IZEN.	45	8	9	12	12
v urah dnevih				242	476
				10	20

S previdnim sušenjem v drugi šarži smo želeli doseči visoko kakovost osušenega lesa brez nevarnosti morebitnega zaskorjenja ali celo satastih razpok. Po osmih urah sušenja smo les segreli na 25 °C, po segrevanju je temperatura ostala 25 °C, ravnovesna vlažnost pa 14,0 %. Sušilni postopek smo vodili po Preglednici 3 in proti koncu sušenja dosegli temperaturo 56 °C. Postopek izenačevanja je trajal 12 ur, pri 45 °C in ravnovesni vlažnosti 8%.

Preglednica 3: Parametri blagega režima sušenja (BL); u_r = ravnovesna vlažnost; ΔT = psihometerska razlika.

Table 3: Parameters of mild drying regime (OST); u_r = equilibrium moisture ΔT = psychometric difference.

BLAG (BL)					
Vlažnost (%)	Temperatura (°C)	UGL (%)	ΔT (°C)	Čas po Kollmann (h)	Predvideni čas sušenja (h)
SEG.	25	14,5	3	8	8
60	25	14	3,5		
40	25	13	4	94,1	168
30	25	11,5	5	66,7	102
25	28	9,5	7,5	37,8	64
20	36	7,5	11	36,0	56
15	46	4,7	18	36,3	60
10	52	3,3	22	45,2	66
8	56	2,5	24	23,1	36
IZEN.	45	8	9	12,0	12
v urah dnevih				359	572
				15	24

Nihanje klimatskih pogojev med procesom sušenja je pokazalo nekatere prednosti pri doseganju krajših časov sušenja in tudi pri večji kakovosti. Oscilirajoč režim sušenja ima enake parametre kot oster režim sušenja (Preglednica 4). Edina razlika je v oscilaciji ravnovesne vlažnosti in sicer smo na intervalu treh ur, ravnovesno vlažnost najprej povečali za 15 %, po preteku treh ur pa zmanjšali za 15 %, glede na zastavljeno klimo. To smo ponavljali od začetka do konca sušilnega postopka.

Preglednica 4: Parametri oscilirajočega režima sušenja (OSC); u_r = ravnovesna vlažnost; ΔT = psihometerska razlika.

Table 4: Parameters of oscillating drying regime (OST); u_r = equilibrium moisture ΔT = psychometric difference.

OSCILARUJOČ (OSC)							
Vlažnost (%)	Temperatura (°C)	u_r (%)	$u_r + 15\%$	$u_r - 15\%$	ΔT (°C)	Čas po Kollmann (h)	Predvideni čas sušenja (h)
SEG.	40	14	16,1	11,9	3	8	8
60	48	12,5	14,4	10,6	5		
40	48	11,7	13,4	10	6	49,0	136
30	48	11	12,6	9,4	6,5	34,8	68
25	50	9,4	10,8	8	9	21,2	54
20	55	6,9	7,9	5,9	13,5	23,5	52
15	58	4,7	5,4	4	19	28,8	56
10	60	3,4	3,9	2,9	22	39,2	58
8	50	3,2	3,7	2,7	24	25,9	32
IZEN.	45	8	9,2	6,8	9	12	12
v urah						242	476
dnevih						10	20

Eksperimente smo izvajali v laboratorijskem sušilnem kanalu TLS-01, ki je rezultat sodelovanja Oddelka za lesarstvo, in podjetja Kambič (Slika 2). Sušilni kanal ima zaprt tokokrog zraka, ki ga omogoča zmogljiv radialni ventilator. Klimatski pogoji se uravnavajo preko toplotne črpalke, grelca in parnega vlažilnika, ki so programirani z logičnim krmilnikom. V kanalu, s prečnim prerezo $0,2 \text{ m}^2$ (višina $\times$ globina: $0,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$), je omogočen homogen pretok zraka s hitrostmi med 0 m/s in 10 m/s ($\Delta v = \pm 0,1 \text{ m/s}$). Sistem lahko vzdrži ali niha temperature v območju od 10 °C do 90 °C ($\Delta T = \pm 0,1 \text{ °C}$) in relativno zračno vlažnost med 10 % in 90 % ($\Delta \phi = \pm 1 \text{ %}$). Eksperimentalni del sušilnega kanala predstavlja komora dolžine $0,6 \text{ m}$, kjer so možne številne konfiguracije preizkušancev in merilne opreme.



Slika 2: Konvekcijski sušilni kanal TLS-01 (zgoraj) s PLC krmilnikom (sp. levo) in z eksperimentalno komoro (sp. desno).

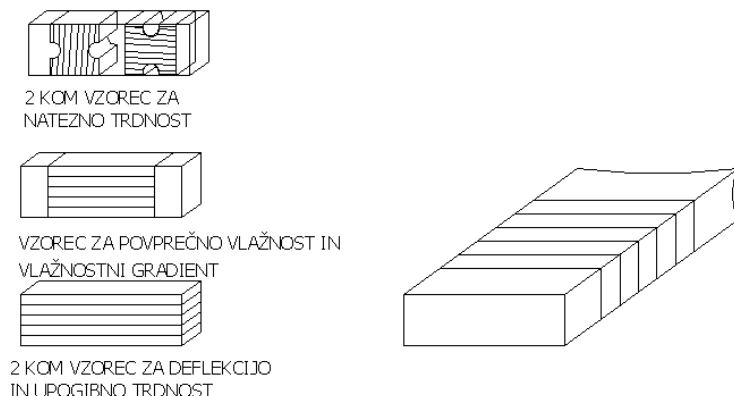
Figure 2: Convection drying tunnel TLS-01 (above) with the PLC controller (down left) and the experimental chamber (down right).

3.2.2 Vzorčenje in metode preizkušanja

Sušili smo deske dolžine 500 mm, širine 130 mm in debeline 42 mm. Deske smo čelno zaščitili z neprepustnim premazom za čela. Radialno in tangencialno orientirane deske smo s slučajnostnim razporedom zložili v zložaj s po pet deskami v širino in petimi vrstami v višino. Vmesni pretok zraka smo omogočili z distančnimi letvicami dimenzije $25 \times 25 \times 600$ mm.

Odvzemanje preizkušancev smo izvedli na začetku sušilnega procesa, v intervalih med sušilnim procesom in na koncu sušilnega procesa. Po načrtu smo morali pri vsakem odvzemu odrezati pet vzorcev dimenzij $130 \times 42 \times 20$ mm, ki smo jih potrebovali za testiranje. En vzorec smo uporabili za določitev povprečne vlažnosti in vlažnostnega gradienta, dva smo potrebovali za določitev nateznih lastnosti lesa, dva pa za določitev upogibnih lastnosti lesa in merjenje loka lamele. Razpored je viden na Sliki 3. Seveda je potrebno odžagati tudi čelo deske, kar naj bi v našem primeru bilo okoli 25 mm. Vzorce smo dobili z zaporednimi rezi deske. Po razrezu smo desko ponovno namazali s premazom in jo takoj postavili nazaj v

sušilni kanal. Vzorce, ki smo jih razrezali, smo shranili v vrečko in jih nato čim hitreje obdelali na standardne dimenzije za izdelavo testov.



Slika 3: Prikaz odvzemanja vzorcev pri posameznem odvzemu.

Figure 3: Display of sampling at each withdrawal.

3.2.3 Določanje povprečne vlažnosti in vlažnostnega gradienta

Povprečno vlažnost vzorca smo določili s standardizirano metodo (SIST EN 13183-1) iz vzorcev za vlažnostni gradient. Zraven smo posušili še oba odrezka in izračunali povprečno vlažnost. Vsak vzorec smo takoj po odvzemu stehali na 0,001 g natančno ter jih postavili v laboratorijski sušilnik, kjer smo jih posušili do absolutno suhega stanja pri temperaturi 103 ± 2 °C. Pri doseženi konstantni masi smo vzorec ponovno stehali. Vlažnost smo nato izračunali po definicijski formuli:

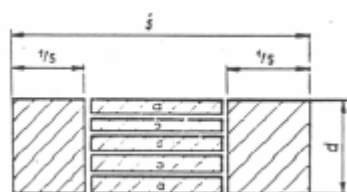
$$u(\%) = \frac{m_z - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad \dots(10)$$

u vlažnost lesa (%)

m_z masa vlažnega vzorca (g)

m_0 masa absolutno suhega vzorca (g)

Preizkušanece za vlažnostni gradient smo dobili tako, da smo vzorec na vsaki strani odrezali za eno petino širine vzorca in s tem izničili robni učinek. Ostanek smo razrezali na pet enakih delov kot kaže Slika 4.



Slika 4: Prikaz razreza vzorcev za določanje vlažnostnega gradienta.

Figure 4: Display cutting samples to determine the humidity gradient.

S standardizirano metodo smo določili povprečno vlažnost vzorca (SIST EN 13183-1), da smo ugotovili, kako je vlaga med postopkom sušenja razporejena v deski oziroma kakšen je vlažnostni gradient. Vzorec smo odrezali na primerni oddaljenosti od čela elementov. Vzorec smo nato stehali na 0,001 g natančno v svežem stanju, oz. pri vlažnosti, ki jo določamo. Nato smo vzorce osušili do absolutno suhega stanja pri temperaturi 103 ± 2 °C. Pri doseženi konstantni masi smo vzorec ponovno stehali. Vlažnostni gradient smo ugotavljali na vzorcih širine 38 mm, ki smo jih po debelini razrezali na 5 slojev in jim odstranili bočne dele. Vlažnost posameznega sloja smo določali gravimetrično in izračunali vlažnostni gradient po spodnji enačbi:

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} \left(\frac{\%}{cm} \right) = \frac{u_{srednji} - u_{zunanji}}{\Delta x} \quad \dots(11)$$

$\Delta u / \Delta x$ vlažnostni gradient (%/cm)

$u_{srednji}$ vlažnost srednjega sloja (%)

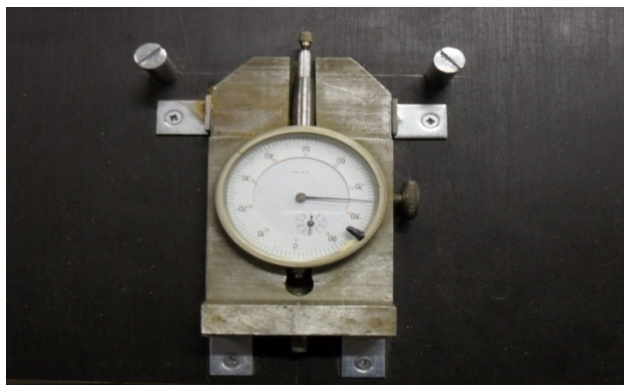
$u_{zunanji}$ vlažnost zunanjega sloja (%)

Δx razdalja med sredino zunanjega sloja in sredino srednjega sloja (cm)

3.2.4 Določanje zaskorjenja

Preizkušanec smo razrezali v tri lamele debeline 6 mm. Najprej smo izrezali površini in tako dobili dve lameli in sicer zgornja površina (LAMELA 1) in spodnja (LAMELA 5). Tretjo smo izrezali iz sredine vzorca (LAMELA 3) (Slika 5b). Zaskorjenost je bila določena posredno z merjenjem uklona lamel. Lok smo merili z merilno uro na 0,01 mm natančno in sicer na dolžini med podporama 100 mm (Slika 5a). Z rezultati dobljenih meritev smo ocenili stopnjo zaskorjenja pri posameznih deskah v posamezni stopnji sušenja (SIST ENV 14464).

Vrednosti smo izmerili takoj, ko smo izrezali lamele iz vzorcev.



a)

LAMELA 1
LAMELA 3
LAMELA 5

b)

Slika 5: a) Merjenje velikosti loka lamele z merilno urico; b) Shema lamel za določanje zaskorjenja.

Figure 5: a) Measurement of the size of the arc lamella with a dial gauge, b) lamination scheme for determining casehardening.

3.2.5 Metode spremljanja mehanskih lastnosti lesa

Merjenje upogibne trdnosti smo izvajali na univerzalnem trgalnem stroju ZWICK ROELL Z005, opremljenim z opremo za testiranje upogibnih in nateznih lastnosti lesa. (Slika 6). Delovanje stroja je računalniško podprto z programom testXpert II. Vsakemu preizkušancu smo pred testiranjem z digitalnim kljunastim merilom izmerili debelino in širino vzorca na 0,01mm natančno, da smo natančno določili presek vzorca. Na osnovi preseka, ki smo ga vnesli v program, nam je le ta na koncu testa izračunal maksimalno silo, elastični modul in trdnost tako pri upogibnem testu kot tudi pri nateznem testu.

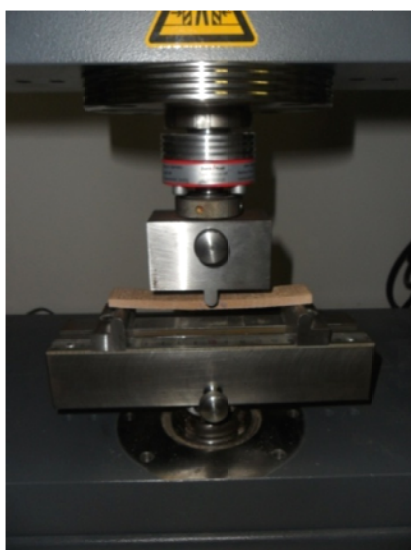


Slika 6: Trgalni stroj ZWICK ROELL Z005.

Figure 6: Pulper machine ZWICK ROELL Z005.

3.2.5.1 Upogibna trdnost

Upogibno trdnost (f_m) in upogibni elastični modul (E_m) smo določili po nekoliko spremenjeni standardni metodi tritočkovnega upogiba SIST EN 408 (Slika 7). Za test smo uporabili lamele, ki smo jih predhodno potrebovali za določitev velikosti loka lamele. Prve tri lamele smo testirali tako, da je bila stran lamele, ki je bližje površini deske obremenjena na nateg. Druge tri lamele smo testirali tako, da je bila stran lamele, ki je bližje površine deske obremenjena na tlak. Višino in širino vzorca smo izmerili s kljunatim merilom, dolžina oziroma razmak med podporama pa je znašal 110 mm.



Slika 7: Prikaz upogibnega testa na trgalnem stroju ZWICK ROELL Z005.

Figure 7: View of bending test on pulper machine ZWICK ROELL Z005.

Upogibno trdnost (f_m) smo izračunali po formuli:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{maks} \cdot L_1}{2 \cdot b_2 \cdot t^2} \quad \dots(12)$$

kjer je :

F_{maks} ... sila loma (N),

L_1 ... razdalja med podporama (mm),

b_2 ... širina preizkušanca (mm),

t ... debelina preizkušanca (mm).

Elastični modul (E_m) smo izračunali po formuli:

$$E_m = \frac{L_1^3 \cdot (F_{50} - F_{10})}{4 \cdot b_2 \cdot t^3 \cdot (a_{50} - a_{10})} \quad \dots(13)$$

kjer je :

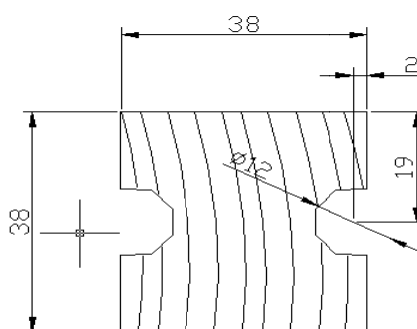
- F_{10} 10% maksimalne sile (N),
- F_{50} 50% maksimalne sile (N),
- b_2 širina preizkušanca (mm),
- t debelina preizkušanca (mm),
- a_{10} uklon pri 10% maksimalne sile (mm),
- a_{50} uklon pri 50% maksimalne sile (mm),
- L_1 razdalja med podpornikoma (mm).

3.2.5.2 Natezna trdnost

Natezno trdnost (σ) in natezni elastični modul (E_{modul}) smo določili po nekoliko spremenjeni metodi določanja nateznih lastnosti lesa (Slika 8a). Pri določanju natezne trdnosti smo uporabili dva vzorca. Vzorce smo najprej poravnali na poravnalnem skobeljnem stroju in nato razrezali na krožnem žagalnem stroju na dimenzijo 38 mm. Nato smo pravokotni vzorec dimenzij 38×38 mm vpeli v posebno prijemalo in z vrtilni strojem izvrtali dve izvrtini 12 mm (Slika 8b). Vzorce smo natezno obremenili, dokler se le ti niso porušili.



a)



b)

Slika 8: a) Prikaz nateznega testa na trgalnem stroju ZWICK ROELL Z005; b) Prikaz izdelave vzorca za natezni test.

Figure 8: a) Display of the tensile test on pulper machine ZWICK ROELL Z005 b) display of manufacturing sample for tensile test.

3.2.5.3 Hitrost sušenja

Hitrost sušenja v odvisnosti od vlažnosti smo prikazali z asimetrično sigmoidno Gompertz-evo funkcijo, kjer izračunane točke v enačbi pomenijo naslednje vrednosti:

$$y = a \times e^{-e^{-k(x-x_c)}} \quad \dots(14)$$

a = asimptota maksimalne hitrosti sušenja

k = maksimalna konstantna sprememba hitrosti sušenja

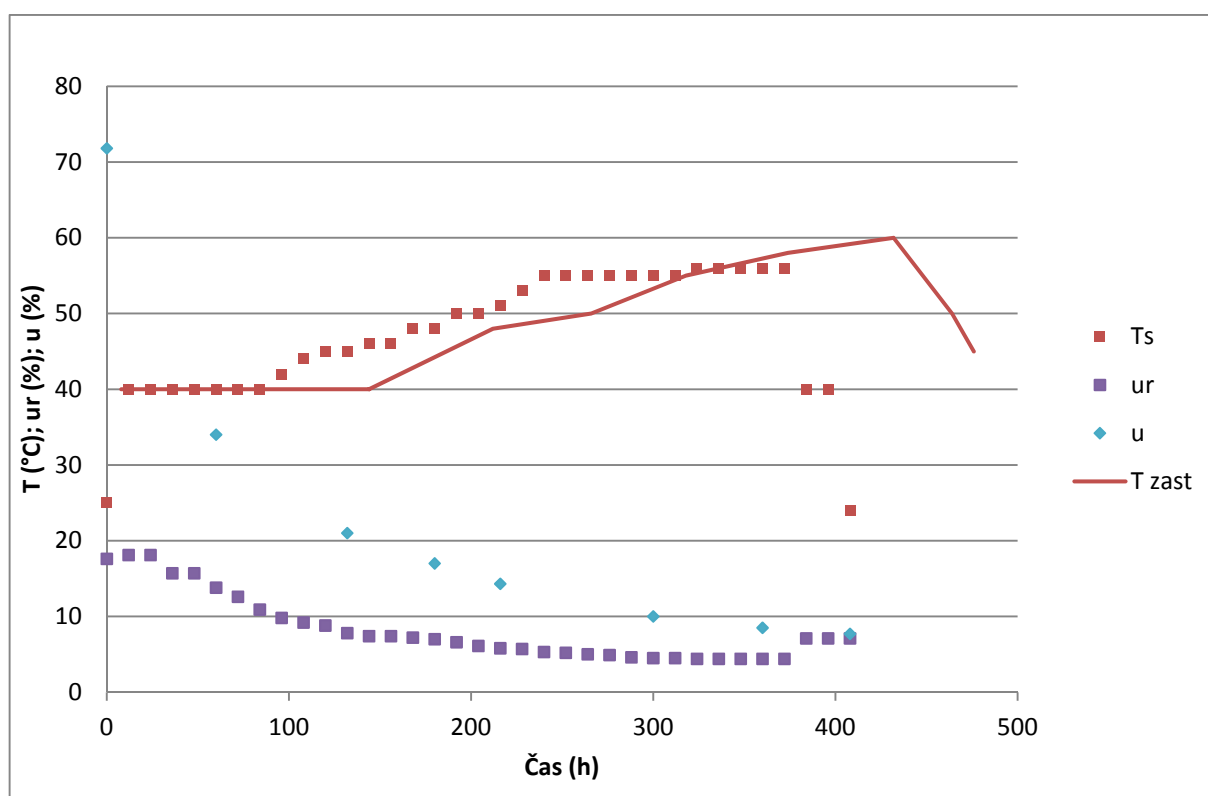
x_c = vlažnost pri kateri je dosežena maksimalna konstantna sprememba hitrosti sušenja

R^2 = koeficient variacije

4 REZULTATI

4.1 DOSEGANJE NAČRTOVANIH PROCESNIH PARAMETROV

Sušili smo s tremi različnimi režimi sušenja bukovine. Sušenje z ostrim režimom je potekalo nekoliko hitreje kot smo predvidevali, saj je temperatura suhega termometra (T_s) naraščala hitreje od zastavljene, ravnovesna vlažnost (u_r) pa je potekala po zastavljenem programu. Tako smo pri ostrem režimu dosegli krajši čas sušenja od zastavljenega (Slika 9). Po segrevanju pri 25 °C smo temperaturo takoj dvignili na 40 °C. Nato smo temperaturo povečevali do 56 °C. Hitrost pretoka zraka skozi zložaj je bil 1,5 m/s. Sušenje je trajalo 396 ur oziroma 16,5 dni in smo ga skrajšali za 3,5 dni glede na zastavljenega.

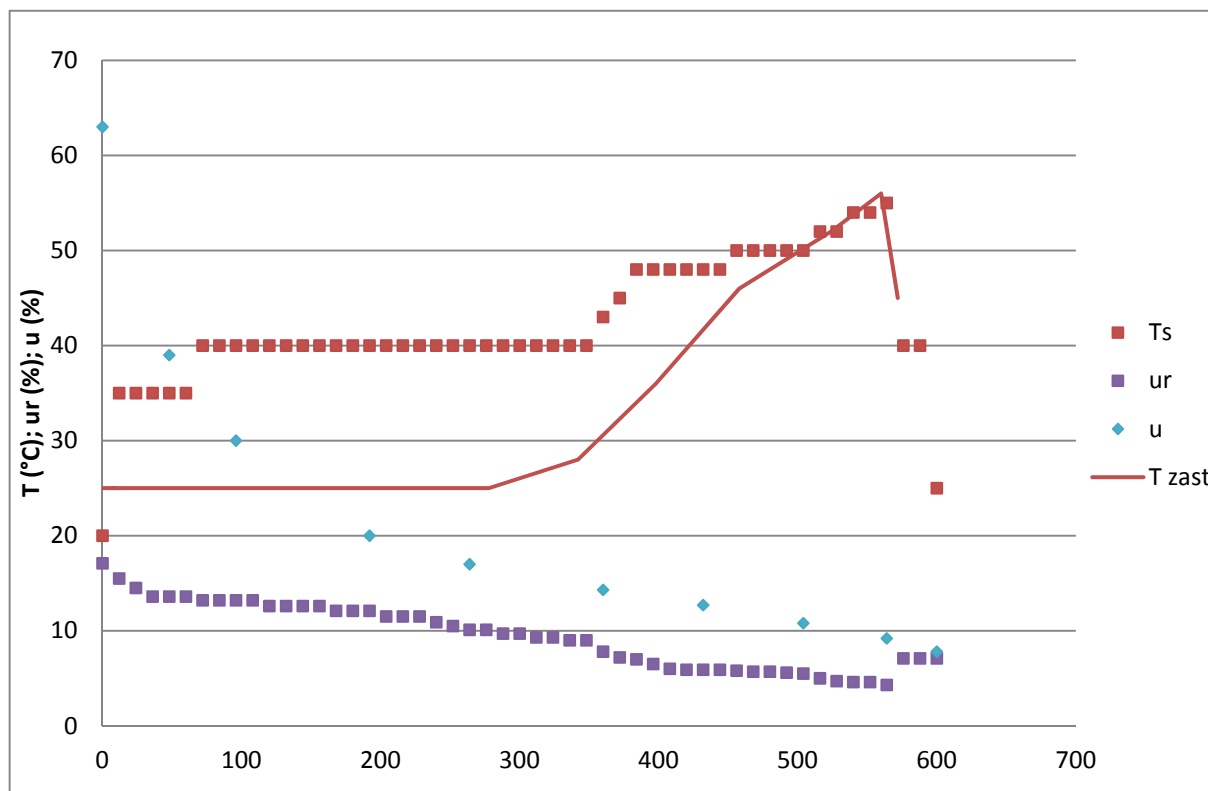


Slika 9: Načrtovani in doseženi procesni parametri pri ostrejših sušilnih pogojih. T_s - temperatura suhega termometra; T_{zast} - načrtovana temperatura suhega termometra; u_r - potek ravnovesne vlažnosti; u - sušilna krivulja.

Figure 9: Planned and achieved process parameters in sharp drying conditions. T_s - dry-bulb temperature; T_{zast} - designed dry-bulb temperature, u_r - achieved equilibrium humidity; u - a drying curve.

Ravnovesna vlažnost (u_r) pri poteku blagega režima sušenja je potekala po programu, ki je bil zastavljen, medtem ko je bila temperatura suhega termometra (T_s) skozi celoten sušilni postopek večja od zastavljene (Slika 10). Z načrtovano se je izenačila v drugi fazi sušilnega postopka. Razlog za nedoseganje temperature je v majhnosti sušilne komore in

gretju motorja ventilatorja, saj je pri delovanju proizvedel toliko toplote, da v komori ni bilo mogoče zagotoviti zastavljene temperature. Tako smo namesto zastavljene temperature 25 °C imeli v sušilni komori 35 °C in kasneje 40 °C. V nadaljevanju sušilnega postopka smo dosegli parametre, ki smo si jih zastavili. Hitrost pretoka zraka čez zložaj je bil 1,5 m/s. Sušenje je trajalo 600 ur oziroma 25 dni. Čas sušenja je bil natanko takšen kot smo ga pričakovali.

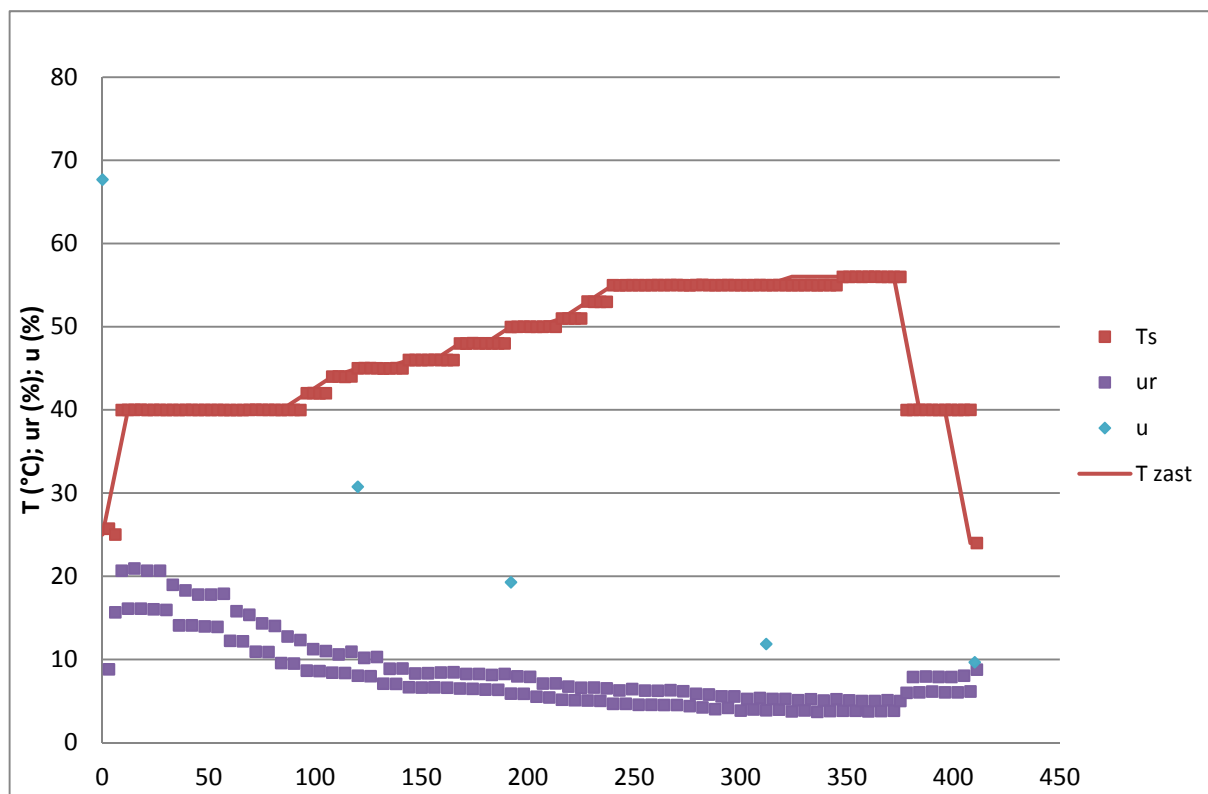


Slika 10: Načrtovani in doseženi procesni parametri pri blagih sušilnih pogojih. T_s - temperatura suhega termometra; T_{zast} - načrtovana temperatura suhega termometra; u_r - potek ravnovesne vlažnosti (u_r); u - sušilna krivulja.

Figure 10: Planned and achieved process parameters in mild drying conditions. T_s - dry-bulb temperature; T_{zast} - designed dry-bulb temperature, u_r - achieved equilibrium humidity; u - a drying curve.

Tako temperatura suhega termometra (T_s), kot tudi ravnovesna vlažnost (u_r) sta pri oscilirajočem režimu sušenja potekala po programu, ki je bil zastavljen (Slika 11). Oscilacije smo izvajali s spremembo ravnovesne vlažnosti na vsake tri ure. Najprej smo ravnovesno vlažnost povečali za 15 % ter jo po pretečenih treh urah zmanjšali za 15 % glede na ravnovesno vlažnost ostrega režim sušenja. Osciliranje se je nadaljevalo čez celoten sušilni postopek. Hitrost pretoka zraka čez zložaj je bil 1,5 m/s. Sušenje je trajalo 410 ur oziroma 17 dni, vendar sklepamo, da je bil postopek zaključen prej, saj so imeli vsi vzorci med zadnjim odvzemom višjo vlažnost. Iz tega sklepamo, da bi bilo potrebno končati postopek 36 ur prej,

kar znaša 372 ur oziroma 15,5 dni. Tako lahko potrdimo, da oscilacije pozitivno vplivajo na postopek sušenja in ta je tudi dejansko krajši v primerjavi z ostrim režimom, kar smo tudi pričakovali. Čas sušenja se nam je zmanjšal za okoli 6,5 %.

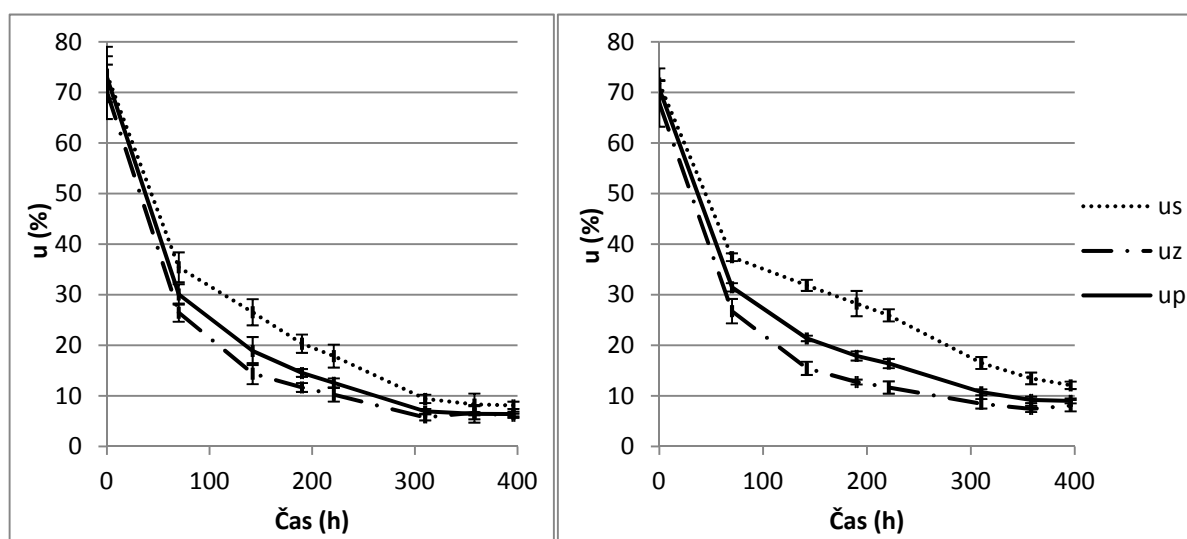


Slika 11: Načrtovani in doseženi procesni parametri pri oscilirajočih sušilnih pogojih. T_s - temperatura suhega termometra; T_{zast} - načrtovana temperatura suhega termometra; u_r - potek ravnovesne vlažnosti (u_r); u - sušilna krivulja.

Figure 11: Planned and achieved process parameters in oscillating drying conditions. T_s - dry-bulb temperature; T_{zast} - designed dry-bulb temperature, u_r - achieved equilibrium humidity; u - a drying curve.

4.2 KINETIKA SUŠENJA

Pri proučevanju kinetike sušenja smo najprej izračunali in izrisali sušilne krivulje. Sušilne krivulje smo izračunali za srednji sloj (u_s) in zunanji sloj (u_z) ter za povprečno vrednost vseh slojev (u_p). V nadaljevanju smo za oba sloja ter povprečno vrednost vseh slojev izračunali hitrost sušenja v primerjavi s časom sušenja in lesno vlažnostjo posameznega sloja.



a) TANGENCIALNA

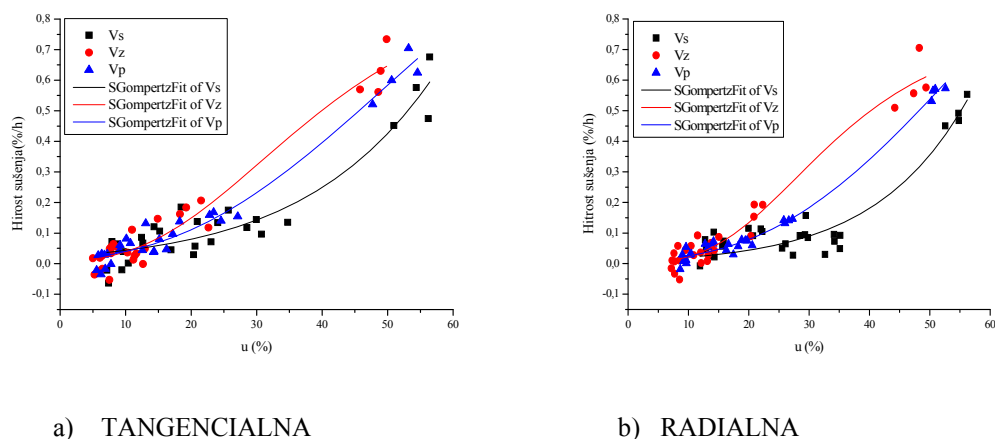
b) RADIALNA

Slika 12: Sušilna krivulja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) pri sušenju z ostrim režimom. u_s = vlažnost srednjega sloja, u_z = vlažnost zunanjskega sloja, u_p = povprečna vlažnost.

Figure 12: Drying curve of tangentially oriented boards (a) and radially oriented boards (b) drying with sharp drying regime. u_s = humidity of middle layer, u_z = humidity of the outer layer, u_p = average humidity.

Potek sušilnih krivulj smo prikazali na treh slojih in sicer zunanjem sloju (u_z), srednjem sloju (u_s) in povprečno vrednost vseh slojev (u_p). Pri tangencialnih deskah, ki smo jih sušili z ostrim režimom (Slika 12a), so vrednosti vlažnosti pri odvzemih manjše kot pri radialno usmerjenih deskah (Slika 12b). Razlike so opazne tudi pri poteku vlažnosti lesa skozi celoten postopek sušenja. Pri radialno usmerjenih deskah smo dosegli večje vrednosti vlažnosti lesa skozi celoten postopek sušenja. Končna vlažnost srednjega sloja pri tangencialno usmerjenih deskah je 8,1 %. Končna vlažnost srednjega sloja pri radialno usmerjenih deskah je 12,1 %. Sušilni postopek z ostrim režimom je trajal 396 ur.

Diagram sušenja oziroma hitrost sušenja v odvisnosti od vlažnosti smo prav tako izrisali pri tangencialno usmerjenih deskah (Slika 13a) kot tudi radialno usmerjenih deskah (Slika 13b). Primerjava hitrosti sušenja pri ostrem režimu sušenja nam ni pokazala statističnih razlik ($p \geq 0,05$) pri vseh treh primerjanih vrednostih (V_s , V_z in V_p). Iz tega lahko potrdimo, da je hitrost sušenja podobna tako pri radialno kot tangencialno usmerjenih deskah. Pričakovano smo največjo hitrost sušenja dosegli v zunanjem sloju vzorcev. Izmerjenim točkam smo izrisali Gompertz-ovo krivuljo, ki nam najbolj ponazarja potek diagrama sušenja.



Slika 13: Hitrost sušenja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) v odvisnosti od vlažnosti lesa pri sušenju z ostrim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja, V_z = hitrost sušenja zunanjšega sloja, V_p = povprečna hitrost sušenja.

Figure 13: Speed drying of tangentially oriented boards (a) and radial oriented boards (b) as a function of wood humidity on drying with a sharp drying regime. V_s = speed the drying middle layer, V_z = speed drying outer layer, V_p = average speed drying.

Najvišjo začetno vlažnost vzorcev tangencialno usmerjenih desk smo imeli pri ostrem režimu (Preglednica 5), kjer je povprečna vlažnost 73,0 %, najmanjšo pa pri blagem režimu in znaša 60,2 % (Preglednica 6). Pri radialno usmerjenih deskah je najvišja povprečna vlažnost prav tako pri ostrem režimu (70,7 %), najnižja pa pri blagem režimu (60,4 %). Ugotovili smo, da so vlažnosti višje pri radialno usmerjenih deskah kot pri tangencialno usmerjenih deskah.

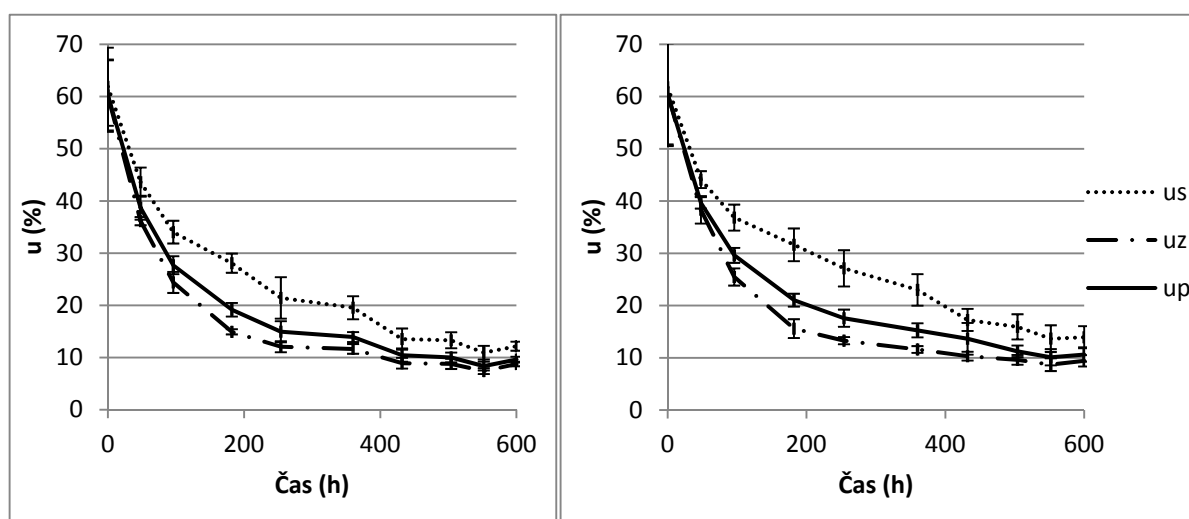
Preglednica 5: Povprečna vlažnost in povprečna hitrost sušenja na posameznih intervalih procesa pri sušenju z ostrim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja; V_z = hitrost sušenja zunanjšega sloja; V_p = povprečna hitrost sušenja.; u_s = vlažnost srednjega sloja; u_z = vlažnost zunanjšega sloja; u_p = povprečna vlažnost vzorcev.

Table 5: The average humidity and average speed drying on the individual intervals of drying process with a sharp drying regime. V_s = speed the drying middle layer, V_z = speed drying outer layer, V_p = average speed drying, u_s = humidity of middle layer, u_z = humidity of the outer layer, u_p = average humidity.

OSTER (OST)									
Čas		0	70	142	190	221	310	358	396
TAN	u_s (%)	73,6	35,4	26,5	20,3	17,9	9,4	8,3	8,1
	V_s (%/h)		0,545	0,123	0,129	0,079	0,095	0,023	0,005
	u_z (%)	70,1	26,5	14,4	11,7	10,2	5,8	6,7	6,1
	V_z (%/h)		0,624	0,167	0,057	0,046	0,050		0,016
	u_p (%)	73,0	30,1	18,9	14,5	12,6	6,9	6,4	6,4
	V_p (%/h)		0,613	0,156	0,090	0,063	0,063	0,010	0,001
RAD	u_s (%)	71,8	37,4	31,9	28,3	25,9	16,5	13,5	12,1
	V_s (%/h)		0,491	0,077	0,075	0,075	0,106	0,064	0,036
	u_z (%)	67,8	26,8	15,4	12,7	11,7	8,4	7,4	8,1
	V_z (%/h)		0,587	0,157	0,056	0,035	0,036	0,021	-0,017
	u_p (%)	70,7	31,5	21,4	17,9	16,4	10,7	9,2	9,0
	V_p (%/h)		0,560	0,140	0,072	0,049	0,064	0,032	0,005

Hitrost sušenja je pomemben podatek, ki nam pove, kakšna je povprečna sprememba vlažnosti lesa v določenem časovnem intervalu (h). Največjo hitrost sušenja smo dosegli v začetni fazi sušilnega postopka, kar smo glede na navedbe avtorjev tudi pričakovali. Prav tako smo večje hitrosti sušenja pričakovali v zunanjem sloju vzorcev. Pri sušenju z ostrim režimom (Preglednica 5) smo v začetni fazi sušenja dosegli najvišje vrednosti glede na ostale režime. Najvišjo povprečno hitrost smo dosegli v zunanjem sloju tangencialno usmerjenih vzorcev in sicer 0,624 %/h, medtem ko je bila povprečna hitrost v srednjem sloju 0,545 %/h. Pod TNCS smo najvišje vrednosti hitrosti sušenja zasledili v srednjem sloju pri vseh treh sušilnih postopkih. Razlog tiči v nizkih vlažnostih zunanjih slojev, kar posledično zmanjša sušilno hitrost.

Pri poteku vlažnosti sušilnih krivulj vseh treh slojev (U_s , U_z , U_p) pri tangencialnih deskah, ki smo jih sušili z blagim režimom smo prav tako ugotovili, da je izmerjena vlažnost večja pri tangencialno usmerjenih deskah (slika 14a) kot pri radialno usmerjenih deskah (Slika 14b). Končna vlažnost srednjega sloja je bila 12,2 %. Končna vlažnost srednjega sloja je bila 13,9 %. Sušilni postopek z blagim režimom je trajal 600 ur.



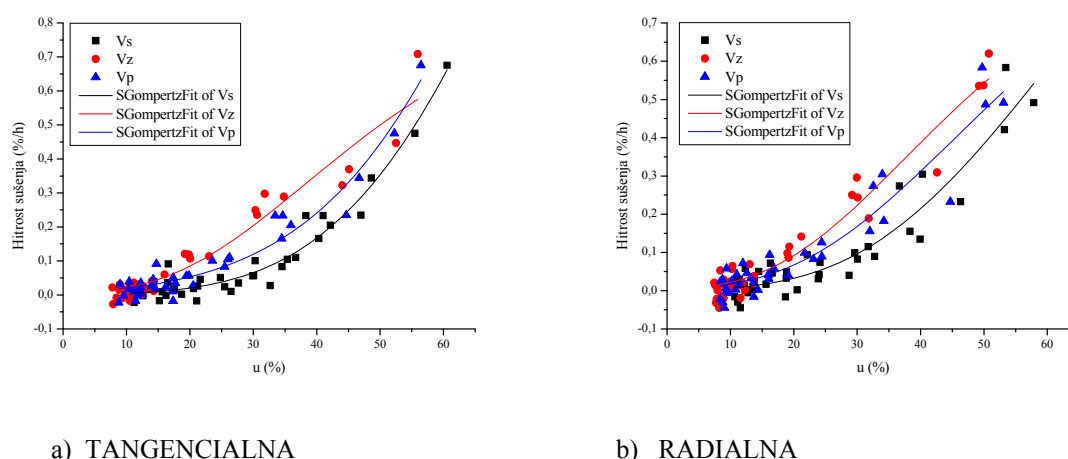
a) TANGENCIALNA

b) RADIALNA

Slika 14: Sušilna krivulja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) pri sušenju z blagim režimom. u_s = vlažnost srednjega sloja, u_z = vlažnost zunanjega sloja, u_p = povprečna vlažnost.

Figure 14: Drying curve of tangentially oriented boards (a) and radially oriented boards (b) drying with mild drying regime. u_s = humidity of middle layer, u_z = humidity of the outer layer, u_p = average humidity.

Diagram sušenja, oziroma hitrost sušenja v odvisnosti od vlažnosti, smo prav tako izrisali pri tangencialno usmerjenih deskah (Slika 15a) kot pri radialno usmerjenih deskah (Slika 15b). Iz grafov je razvidno, da smo v začetni fazi sušenja dosegli večjo povprečno hitrost sušenja pri radialno usmerjenih deskah, vendar nam standardni odklon pove, da razlik praktično ni. Tudi statistična metoda nam ni potrdila razlik ($p \geq 0,05$). Izmerjenim točkam smo izrisali Gompertz-ovo krivuljo, ki nam najbolj ponazarja potek diagrama sušenja.



Slika 15: Hitrost sušenja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) v odvisnosti od vlažnosti lesa pri sušenju z blagim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja, V_z = hitrost sušenja zunanjega sloja, V_p = povprečna hitrost sušenja.

Figure 15: Speed drying of tangentially oriented boards (a) and radial oriented boards (b) as a function of wood humidity on drying with a mild drying regime. V_s = speed the drying middle layer, V_z = speed drying outer layer, V_p = average speed drying.

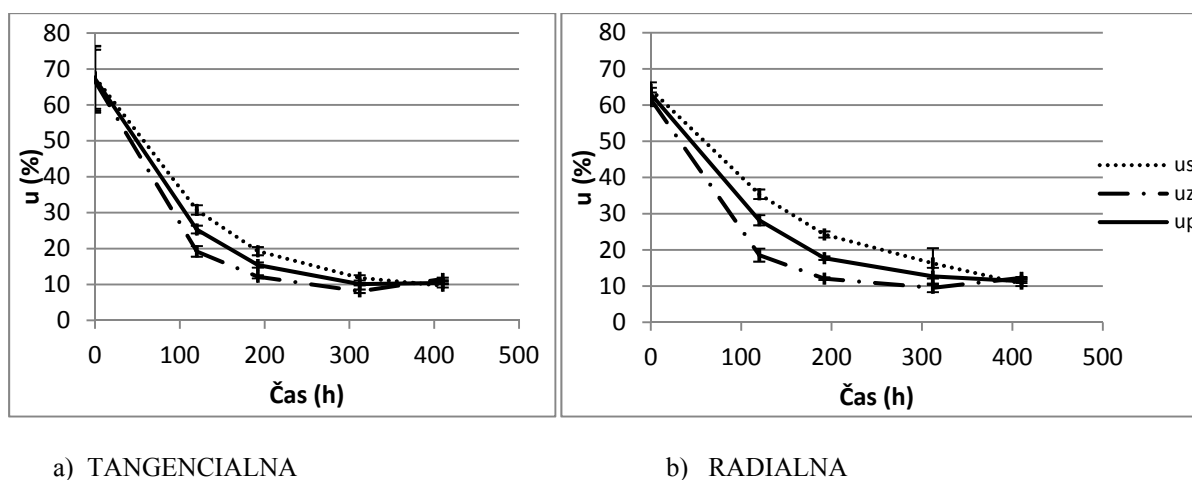
Pri sušenju z blagim režimom (Preglednica 6) smo najvišjo sušilno hitrost dosegli v zunanjem sloju tangencialno orientiranih vzorcev in je znašala 0,501 %/h, medtem ko je bila v srednjem sloju 0,381 %/h. Tudi pri sušenju z blagim režimom je sušilna hitrost pod TNCS večja v srednjem sloju vzorca.

Preglednica 6: Povprečna vlažnost in povprečna hitrost sušenja na posameznih intervalih pri sušenju z blagim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja; V_z = hitrost sušenja zunanjega sloja; V_p = povprečna hitrost sušenja; u_s = vlažnost srednjega sloja; u_z = vlažnost zunanjega sloja; u_p = povprečna vlažnost vzorcev.

Table 6: The average humidity and average speed drying on the individual intervals of drying process with a mild drying regime. V_s = speed the drying middle layer, V_z = speed drying outer layer, V_p = average speed drying, u_s = humidity of middle layer, u_z = humidity of the outer layer, u_p = average humidity.

BLAG (BL)											
Čas		0	48	96	182	254	360	432	504	552	600
TAN	u_s (%)	61,9	43,6	34,0	28,1	21,4	19,5	13,5	13,3	10,9	12,2
	V_s (%/h)		0,381	0,200	0,069	0,092	0,018	0,083	0,003	0,049	
	u_z (%)	60,2	36,1	24,4	14,9	12,1	11,7	8,9	8,8	7,4	8,8
	V_z (%/h)		0,501	0,244	0,110	0,040	0,004	0,038	0,002	0,029	
	u_p (%)	60,2	38,7	27,7	19,2	14,9	13,9	10,5	10,0	8,4	9,6
	V_p (%/h)		0,449	0,229	0,099	0,058	0,010	0,048	0,006	0,034	
RAD	u_s (%)	61,8	44,1	36,8	31,6	27,1	23,0	17,2	15,9	13,7	13,9
	V_s (%/h)		0,368	0,152	0,060	0,063	0,039	0,080	0,018	0,047	
	u_z (%)	60,5	38,3	25,5	15,6	13,3	11,6	10,3	9,6	8,7	9,4
	V_z (%/h)		0,462	0,268	0,115	0,032	0,016	0,018	0,010	0,019	
	u_p (%)	60,4	39,6	29,6	21,0	17,6	15,3	13,6	11,2	10,1	10,6
	V_p (%/h)		0,432	0,209	0,100	0,048	0,022	0,022	0,033	0,024	

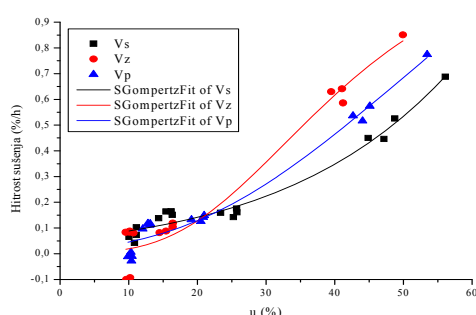
Pri poteku vlažnosti sušilnih krivulj vseh treh slojev (U_s , U_z , U_p) pri tangencialnih deskah, ki smo jih sušili z oscilirajočim režimom, smo ugotovili, da je izmerjena vlažnost večja pri radialno usmerjenih deskah (Slika 16b) kot pri tangencialno usmerjenih deskah (Slika 16a). Končna vlažnost srednjega sloja je bila 9,7 %. Sušilni postopek z blagim režimom je trajal 372 ur.



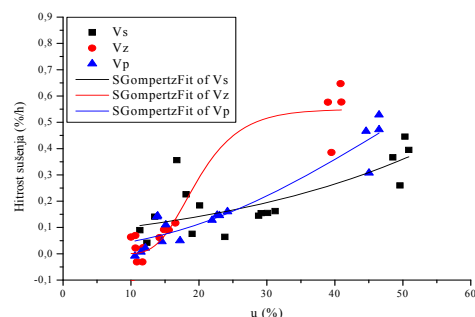
Slika 16: Sušilna krivulja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) pri sušenju z oscilirajočim režimom. u_s = vlažnost srednjega sloja, u_z = vlažnost zunanjega sloja, u_p = povprečna vlažnost.

Figure 16: Drying curve of tangentially oriented boards (a) and radially oriented boards (b) drying with oscillating drying regime. u_s = humidity of middle layer, u_z = humidity of the outer layer, u_p = average humidity.

Diagram sušenja oziroma hitrost sušenja v odvisnosti od vlažnosti smo prav tako izrisali pri tangencialno usmerjenih deskah (Slika 17a) kot radialno usmerjenih deskah (Slika 17b). Iz grafov je razvidno, da smo v začetni fazi sušenja dosegli večjo povprečno hitrost sušenja pri radialno usmerjenih deskah, vendar nam standardni odklon pove, da razlik pri oscilirajočem sušenju praktično ni. Tudi statistična metoda nam ni potrdila razlik ($p \geq 0,05$). Tudi tukaj smo izmerjenim točkam izrisali Gompertz-ovo krivuljo, ki nam najbolj ponazarja potek diagrama sušenja.



a) TANGENCIALNA



b) RADIALNA

Slika 17: Hitrost sušenja tangencialnih desk (a) in radialnih desk (b) v odvisnosti od vlažnosti lesa pri sušenju z oscilirajočim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja, V_z = hitrost sušenja zunanje sloja, V_p = povprečna hitrost sušenja.

Figure 17: Speed drying of tangentially oriented boards (a) and radial oriented boards (b) as a function of wood humidity on drying with a oscillating drying regime. V_s = speed the drying middle layer, V_z = speed drying outer layer, V_p = average speed drying.

Pri sušenju z oscilirajočim režimom (Preglednica 7) smo največjo sušilno hitrost dosegli v zunanjem sloju tangencialno usmerjenih vzorcev in sicer je hitrost znašala 0,395 %/h. Vrednosti sušilne hitrosti so po doseženi TNCS prav tako kot pri ostalih dveh režimih večje v srednjem sloju vzorca.

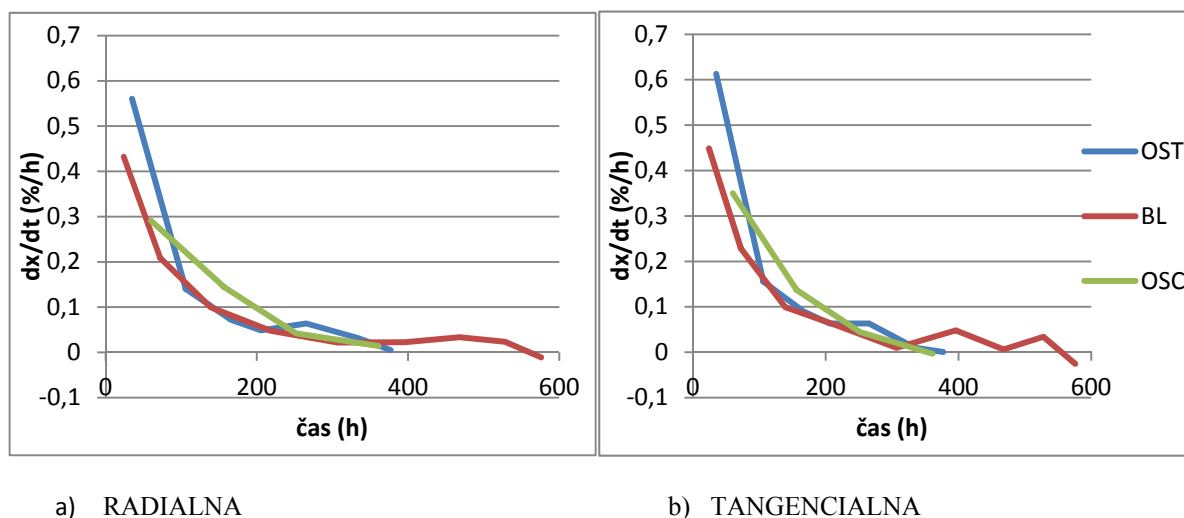
Preglednica 7: Povprečna vlažnost in povprečna hitrost sušenja na posameznih intervalih pri sušenju z oscilirajočim režimom. V_s = hitrost sušenja srednjega sloja; V_z = hitrost sušenja zunanjšega sloja; V_p = povprečna hitrost sušenja.; u_s = vlažnost srednjega sloja; u_z = vlažnost zunanjšega sloja; u_p = povprečna vlažnost vzorcev.

Table 7: The average humidity and average speed drying on the individual intervals of drying process with a sharp drying regime. V_s = speed the drying middle layer, V_z = speed drying outer layer, V_p = average speed drying, u_s = humidity of middle layer, u_z = humidity of the outer layer, u_p = average humidity.

OSCILIRAJOČ (OSC)						
Čas		0	120	192	312	372
TAN	u_s (%)	67,7	30,8	19,3	11,9	9,7
	V_s (%/h)		0,308	0,159	0,062	0,022
	u_z (%)	66,6	19,2	12,1	8,1	11,6
	V_z (%/h)		0,395	0,098	0,034	
	u_p (%)	67,3	25,3	15,4	10,1	10,4
	V_p (%/h)		0,350	0,137	0,044	
RAD	u_s (%)	64,3	35,4	24,2	16,3	10,7
	V_s (%/h)		0,241	0,154	0,066	0,057
	u_z (%)	61,6	18,5	12,0	9,5	12,3
	V_z (%/h)		0,359	0,090	0,021	
	u_p (%)	63,1	28,2	17,7	12,7	11,3
	V_p (%/h)		0,291	0,145	0,042	0,014

Iz podatkov sušilne hitrosti smo ugotovili, da so le te bile največje pri sušenju z ostrim režimom, kar smo pričakovali tako z vidika režimov sušenja kot tudi iz navedb avtorjev. Primerjava ostrega in blagega režima nam pokaže bistveno razliko v trajanju sušilnega postopka, saj je sušenje po ostrem režimu trajalo 200 ur manj. Prav tako oscilacije pozitivno vplivajo na trajanje sušilnega postopka, saj smo z oscilacijami dosegli 5 % krajši čas sušenja.

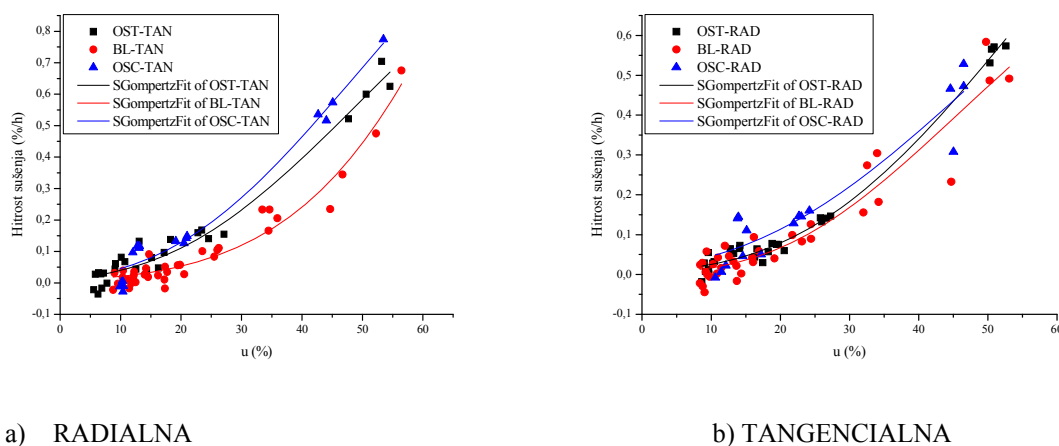
Primerjava vseh treh režimov sušenja nam je pokazala, da smo najvišjo hitrost sušenja tako pri radialno kot pri tangencialno usmerjenih deskah dosegli na začetku sušenja pri ostrem režimu, kar smo pričakovali, saj smo pri ostrem režimu prej odvzeli vzorec v primerjavi z oscilirajočim (Slika 18). Pri radialno usmerjenih vzorcih je hitrost sušenja znašala 0,560 %/h, pri tangencialno usmerjenih vzorcih pa 0,613 %/h po 70 urah sušenja. Pri blagem režimu je bila pri radialno usmerjenih vzorcih hitrost sušenja 0,432 %/h, pri tangencialno usmerjenih pa 0,449 po 48 urah sušenja. Pri oscilirajočem režimu je pri radialno usmerjenih vzorcih 0,291 %/h, pri tangencialno usmerjenih pa 0,350 %/h.



Slika 18: Odvisnost hitrosti sušenja pri radialno (a) in tangencialno (b) usmerjenih vzorcih čez celoten postopek sušenja vseh treh šarž.

Figure 18: The dependence of speed drying of the radially (a) and tangentially (b) oriented samples over the entire drying process of all three batches.

Po 60 urah sušenja, kjer smo odvzeli že vse vzorce lahko vidimo, da je hitrost sušenja največja pri ostrem režimu sušenja, medtem kot je hitrost pri blagem režimu enkrat manjša. Kot trdijo avtorji je največja hitrost sušenja po TNCS dosežena pri oscilirajočem režimu, saj osciliranje klime pozitivno vpliva na hitrost sušenja. Čas sušenja je najdaljši pri blagem režimu sušenja in traja 600 ur oz. 25 dni, kar smo pričakovali. Pri ostrem režimu sušenja je čas sušenja 396 ur oz. 16,5 dni, pri oscilirajočem pa 372 ur oz. 15,5 dni.



Slika 19: Odvisnost hitrosti sušenja pri radialno (a) in tangencialno (b) usmerjenih vzorcih v odvisnosti od vlažnosti pri sušenju z vsemi tremi šaržami.

Figure 19: The dependence of speed drying of the radially (a) and tangentially (b) oriented samples as a function of humidity over the entire drying process of all three batches.

Iz diagrama sušenja je razvidno, da smo največjo hitrost sušenja tako pri radialno kot tangencialno usmerjenih deskah dosegli pri sušenju z oscilirajočim režimom, najnižjo hitrost sušenja pa pri sušenju z blagim režimom. Iz diagrama je razvidno, da oscilacije povečujejo hitrost sušenja. Prav tako je iz primerjave razvidno, da ostrina sušenja prav tako vpliva na hitrost sušenja, saj je hitrost sušenja manjša pri sušenju z blagim režimom. Primerjava radialno (Slika 19a) in tangencialno (Slika 19b) orientiranih vzorcev nam ni pokazala statističnih razlik.

4.3 VLAŽNOSTNI GRADIENT

Vlažnostni gradienta smo izračunali na dva načina in sicer iz prve in druge lamele ter iz druge in tretje lamele. Izračunali smo povprečja za tangencialno in radialno usmerjene deske pri vseh treh režimih sušenja (Preglednica 8). Pri ostrem režimu smo največji vlažnostni gradient med prvo in drugo lamelo pri tangencialno usmerjenih deskah dosegli po 142 urah sušenja in je znašal 18,91 %/cm, med drugo in tretjo lamelo pa po 190 urah sušenja in je znašal 3,31 %/cm. Pri radialno usmerjenih deskah je vlažnostni gradient med prvo in drugo lamelo največji prav tako po 142 h in je znašal 20,21 %/cm, med drugo in tretjo lamelo pa po 190 urah sušenja in je znašal 5,42 %/cm. Statistično primerjavo smo izvedli s T testom, saj nas je zanimalo ali obstajajo razlike med tangencialno in radialno usmerjenimi deskami. Pri sušenju z ostrim režimom smo ugotovili, da razlike pri primerjavi vlažnostnega gradienta prvih dveh lamel nastanejo, medtem ko nam primerjava vlažnostnega gradienta med drugo in tretjo lamelo statističnih razlik ne pokaže ($p \geq 0,05$). Primerjava prve in druge lamele nam v intervalu od začetka sušenja, do TNCS statističnih razlik ne pokaže ($p \geq 0,05$), medtem ko pa na intervalu od TNCS do konca sušilnega postopka te razlike obstajajo ($p \leq 0,05$) in so večje pri radialno usmerjenih deskah.

Pri sušenju z blagim režimom smo največji vlažnostni gradient med prvo in drugo lamelo pri tangencialno usmerjenih deskah izmerili po 182 urah sušenja, znašal je 20,61 %/cm, med drugo in tretjo lamelo je prav tako po 182 urah sušenja znašal 3,44 %/cm. Pri radialno usmerjenih deskah je vlažnostni gradient med prvo in drugo lamelo največji po 182 urah in je znašal 20,61 %/cm, med drugo in tretjo lamelo pa 5,38 %/cm po 254 urah sušenja. Pri sušenju z blagim režimom smo ugotovili, da razlike pri primerjavi vlažnostnega gradienta prvih dveh lamel prav tako nastanejo. Na intervalu od začetka sušenja, do TNCS statističnih razlik ne zasledimo ($p \geq 0,05$), medtem ko pa na intervalu od TNCS do konca sušilnega

postopka te razlike obstajajo ($p \leq 0,05$) in so večje pri radialno usmerjenih deskah. Primerjava vlažnostnega gradienta med drugo in tretjo lamelo statističnih razlik ne pokaže ($p \geq 0,05$).

Preglednica 8: Povprečne vrednosti vlažnostnega gradienta med prvo in drugo, drugo in tretjo lamelo tangencialno in radialno usmerjenih desk pri vseh treh režimih.

Table 8: The average values of humidity gradient between the first and second, second and third lamella of tangentially and radially oriented boards in all three regimes.

OST	čas(h)	0	70	142	190	221	310	358	396
TAN	1_2(%/cm)	1,18	11,81	18,91	15,39	12,87	7,30	5,66	3,73
	2_3(%/cm)	0,24	1,20	2,83	3,31	3,02	1,23	0,87	1,73
RAD	1_2(%/cm)	2,38	12,46	20,21**	18,28*	16,47**	9,48***	6,97*	5,23*
	2_3(%/cm)	-0,05	2,02	3,69	5,42	4,13	2,60	1,47	0,98

BL	čas(h)	0	48	96	182	254	360	432	504	552	600
TAN	1_2(%/cm)	4,74	8,77	13,68	17,54	11,88	10,20	6,89	6,04	4,81	4,75
	2_3(%/cm)	1,59	1,61	1,77	3,44	3,42	3,00	1,29	1,24	0,99	1,11
RAD	1_2(%/cm)	1,07	8,97	15,24*	20,61**	17,56*	13,03*	8,68*	8,21*	6,29*	5,54
	2_3(%/cm)	-0,12	1,54	1,63	3,76	5,38	3,24	2,60	2,18	1,25	1,09

OSC	čas(h)	0	120	192	312	410
TAN	1_2(%/cm)	2,11	15,47	9,64	4,65	-2,12
	2_3(%/cm)	-1,76	1,83	3,30	0,73	-0,09
RAD	1_2(%/cm)	3,89	19,02**	14,75***	8,84*	-1,79
	2_3(%/cm)	-0,02	1,61	4,96**	2,82*	0,01

Opomba: T test: * - $p \leq 0,05$; ** - $p \leq 0,01$; *** - $p \leq 0,001$.

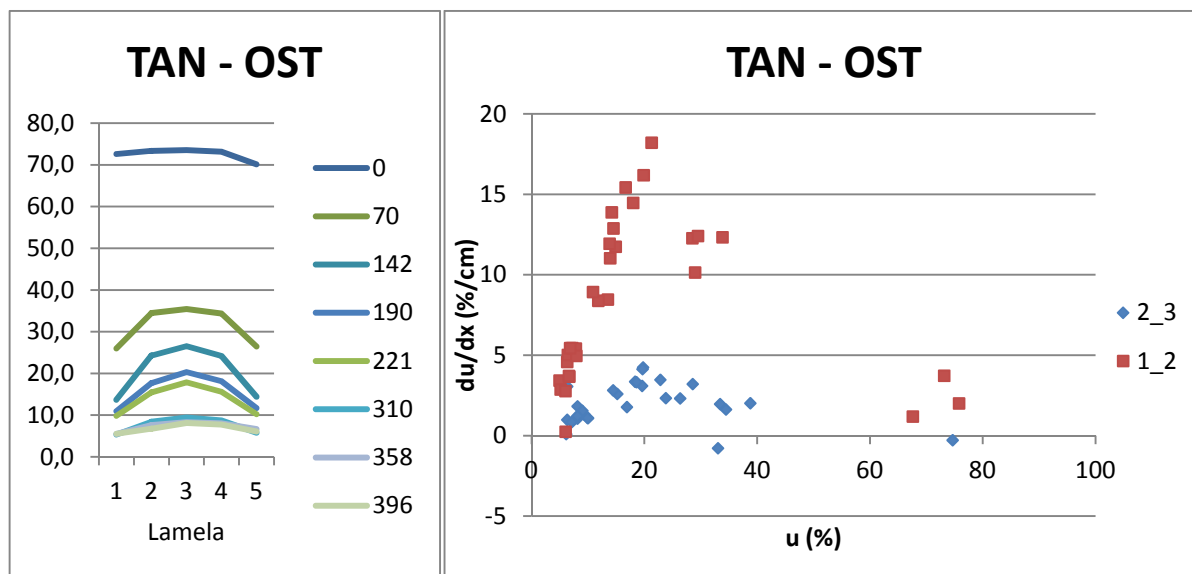
Pri sušenju z oscilirajočim režimom smo največjo vrednost vlažnostnega gradienta dosegli po 120 urah sušenja in je pri tangencialno usmerjenih deskah med prvo in drugo lamelo znašala 15,47 %/cm. Vrednost med drugo in tretjo lamelo je po 192 urah sušenja znašala 3,30. Pri radialno usmerjenih deskah je največja vrednost prav tako dosežena po 120 urah sušenja in med prvo in drugo lamelo je znašala 19,02 %/cm, med prvo in tretjo pa 4,96 %/cm po 192 urah sušenja. Statistična metoda nam je potrdila višje vrednosti vlažnega gradienta pri radialno usmerjenih vzorcih ($p \leq 0,05$) tako pri vrednostih prve in druge lamele kot tudi druge in tretje lamele. Vrednosti so statistično značilne v intervalu od TNCS do konca sušenja, a v začetni fazi sušenja statističnih razlik nismo opazili.

Statistična primerjava nam je pokazala, da pri ostrem in blagem režimu sušenja vlažnostni gradient med drugo in tretjo lamelo ni statistično značilen skozi celotni postopek sušenja v primerjavi z orientiranostjo vzorca, medtem pa je gradient med prvo in drugo

lamelo statistično različen ($p \leq 0,05$) na intervalu od TNCS do konca sušilnega postopka. Pred doseženo TNCS pa vrednosti niso statistično različne. Pri sušenju z oscilirajočim režimom vrednosti gradienta prav tako niso statistično značilne do dosežene TNCS, po doseženi TNCS so vrednosti večje pri radialno usmerjenih vzorcih pri obeh vrstah merjenja gradienta.

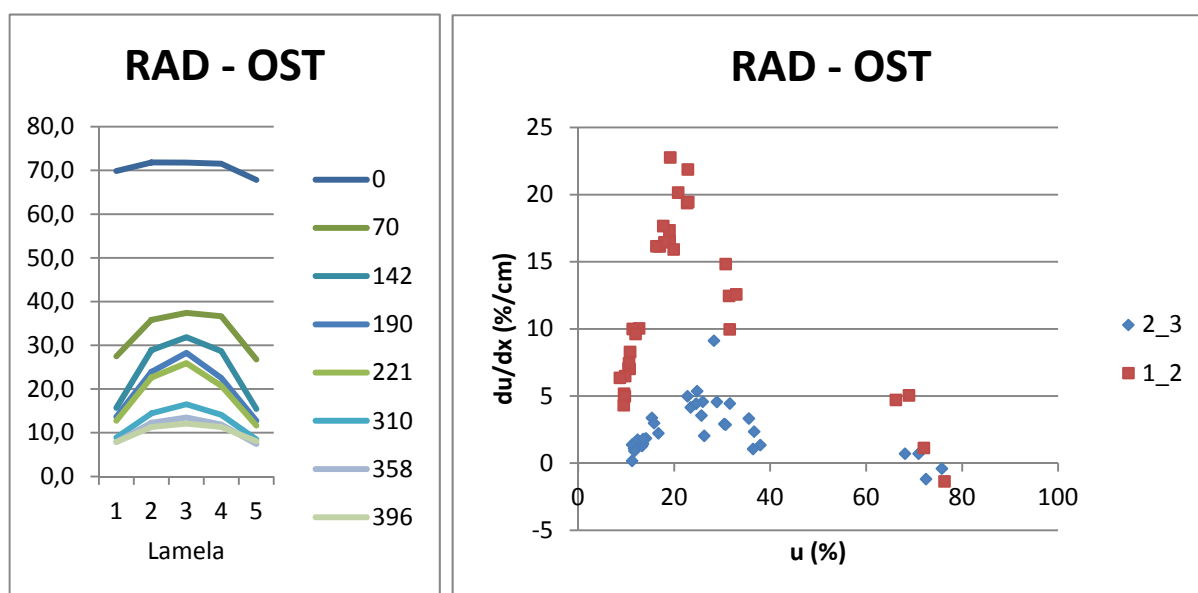
Iz dobljenih rezultatov vlažnostnega gradienta smo ugotovili, da je le ta večji pri radialno usmerjenih deskah pri vseh treh uporabljenih režimih sušenja. Pri vseh treh režimih smo prav tako ugotovili, da statistične razlike nastanejo, ko dosežemo točko nasičenja celičnih sten in nato do konca sušilnega postopka. Pred TNCS pa razlik praktično ni.

Razporeditev vlažnosti skozi prerez tangencialnih desk čez celoten postopek sušenja z ostrim režimom smo izrisali na sliki 20. Na sliki 21 vidimo razporeditev vlažnosti skozi prerez radialnih desk. Vidimo lahko, da po 70 urah ni velikih razlik med razporeditvijo vlažnosti pri različno orientiranih vzorcih. V nadaljevanju so vrednosti skozi prerez deske manjše pri tangencialno orientiranih deskah. Opazili smo, da je vlažnost vseh slojev po koncu sušenja manjša pri tangencialno orientiranih vzorcih. Primerjava vlažnostnega gradienta v odvisnosti od vlažnosti nam je pokazala večje vrednosti pri radialno usmerjenih deskah, kar smo tudi statistično potrdili.



Slika 20: Vlažnostni gradient tangencialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri ostrem režimu.

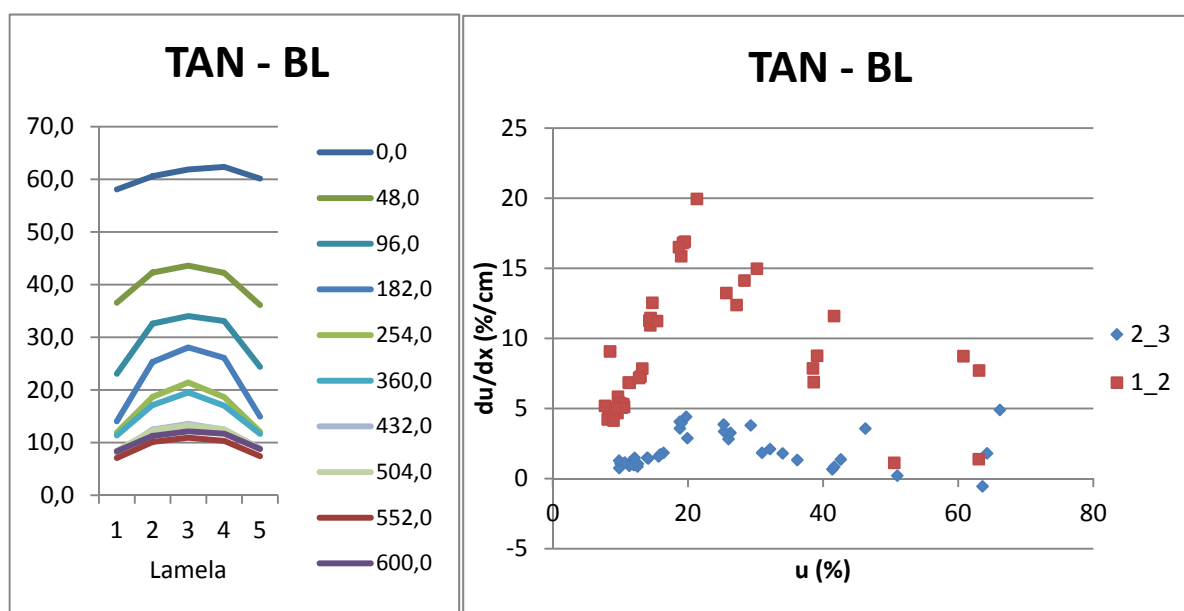
Figure 20: Humidity gradient of tangentially oriented boards in each stage of drying and humidity gradient depending on the humidity in sharp drying regime.



Slika 21: Vlažnostni gradient radialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri ostrem režimu.

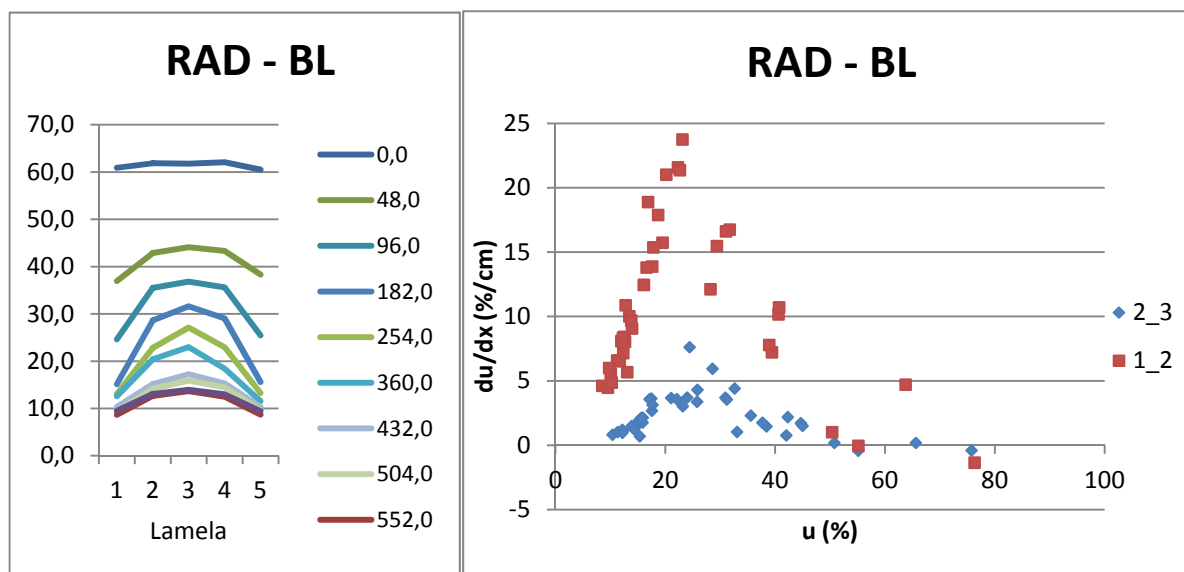
Figure 21: Humidity gradient of radially oriented boards in each stage of drying and humidity gradient depending on the humidity in sharp drying regime.

Razporeditev vlažnosti skozi prerez tangencialnih desk čez celoten postopek sušenja z blagim režimom smo izrisali na sliki 22. Na sliki 23 vidimo razporeditev vlažnosti skozi prerez radialnih desk. Graf prikazuje, da po 96 urah ni velikih razlik med razporeditvijo vlažnosti pri različno orientiranih vzorcih. V nadaljevanju so vrednosti skozi prerez deske manjše pri tangencialno orientiranih deskah. Ugotovili smo, da je vlažnost vseh slojev po končanem sušenju manjša pri tangencialno orientiranih vzorcih. Vlažnost pri blagem režimu pada počasneje kot pri ostrem režimu, vlažnostni gradient je prav tako manjši pri blagem režimu kot pri ostrem. Primerjava odvisnosti vlažnostnega gradienta od vlažnosti nam pri sušenju z blagim režimom prav tako pokaže višje vrednosti pri radialno usmerjenih deskah.



Slika 22: Vlažnostni gradient tangencialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri blagem režimu.

Figure 22: Humidity gradient of tangentially oriented boards in each stage of drying and humidity gradient depending on the humidity in mild drying regime.

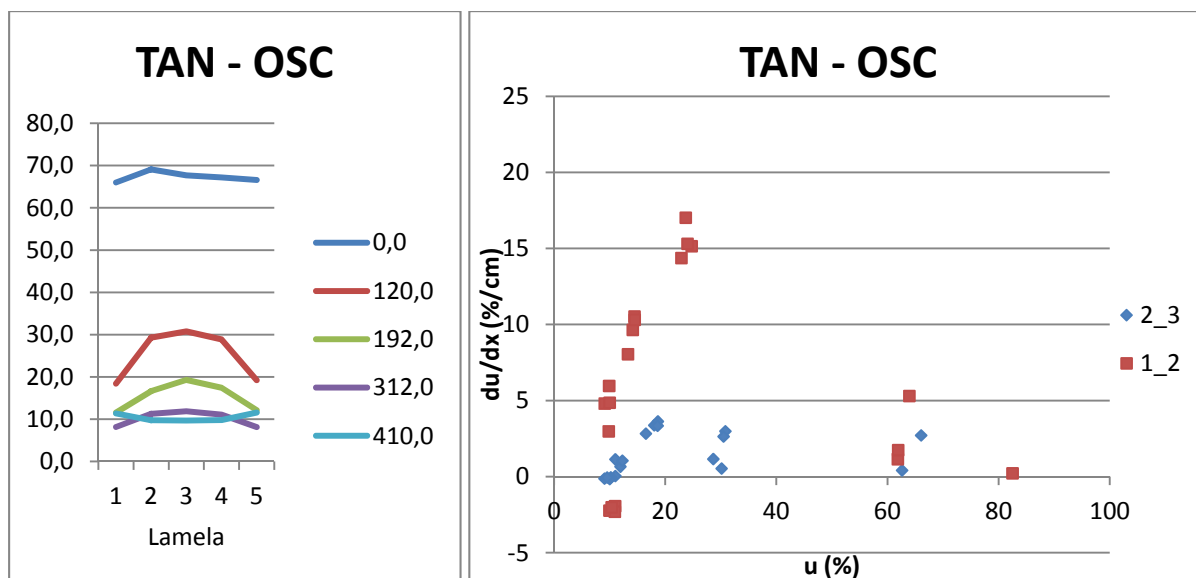


Slika 23: Vlažnostni gradient radialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri blagem režimu.

Figure 23: Humidity gradient of radially oriented boards in each stage of drying and humidity gradient depending on the humidity in mild drying regime.

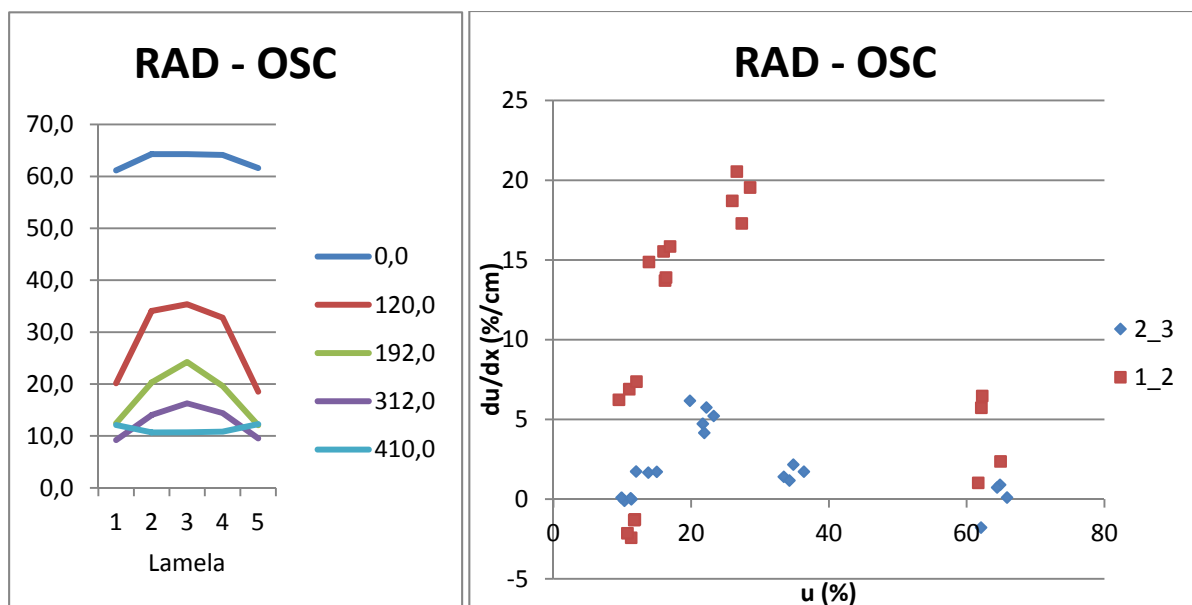
Razporeditev vlažnosti skozi prerez tangencialnih desk čez celoten postopek sušenja z oscilirajočim režimom smo izrisali na sliki 24. Na sliki 25 vidimo razporeditev vlažnosti skozi prerez radialnih desk. Po 120 urah ni velikih razlik med razporeditvijo vlažnosti pri različno orientiranih vzorcih. V nadaljevanju so vrednosti skozi prerez deske manjše pri radialno orientiranih deskah. Opazili smo, da je vlažnost vseh slojev po končanem sušenju

manjša pri tangencialno orientiranih vzorcih. Vlažnost pri blagem režimu pada počasneje kot pri ostrem režimu, vlažnostni gradient je prav tako manjši pri blagem režimu kot pa ostrem. Primerjava odvisnosti vlažnostnega gradienta od vlažnosti nam pri sušenju z oscilirajočim režimom prav tako pokaže višje vrednosti pri radialno usmerjenih deskah.



Slika 24: Vlažnostni gradient tangencialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri oscilirajočem režimu.

Figure 24: Humidity gradient of tangentially oriented boards in each stage of drying and humidity gradient depending on the humidity in oscillating drying regime.



Slika 25: Vlažnostni gradient radialnih desk pri posamezni fazi sušenja in vlažnostni gradient v odvisnosti od vlažnosti pri oscilirajočem režimu.

Figure 25: Humidity gradient of radially oriented boards in each stage of drying and humidity gradient depending on the humidity in oscillating drying regime.

Primerjava vlažnostnega gradienta v odvisnosti od vlažnosti nam je pokazala, da smo največji vlažnostni gradient dosegli pri radialno usmerjenih deskah pri vseh treh režimih sušenja. Največji vlažnostni gradient smo izmerili pri sušenju z blagim režimom in v primerjavi z ostrim režimom nismo ugotovili statističnih razlik. Medtem ko so pri sušenju z oscilirajočim režimom vrednosti vlažnega gradienta manjše in statistično značilne vrednosti, kar smo glede na oscilacije klime po navedbah avtorjev pričakovali. Iz primerjave gradienta med prvo in drugo lamelo (1_2) in drugo in tretjo lamelo (2_3), smo ugotovili, da vrednosti med drugo in tretjo lamelo niso statistično različne, zato sklepamo, da nam vlažnostni gradient med drugo in tretjo ne pokaže, kako režim sušenja vpliva na mehanske lastnosti lesa. Iz vidika površinskih razpok smo pričakovali večji vlažnostni gradient pri sušenju z ostrim režimom, vendar v našem primeru tega ne moremo statistično potrditi, saj nam metoda ni pokazala statističnih razlik.

4.4 OCENA ZASKORJENOSTI

Uklon je večji pri tangencialno usmerjenih deskah v primerjavi z radialnimi (Preglednica 9) pri uporabi ostrega režima sušenja. Trditev smo s statistično analizo (T test) dokazali in lahko s 95 % gotovostjo trdimo, da je uklon večji pri tangencialno usmerjenih deskah ($p \leq 0,05$). Pri tangencialno usmerjenih deskah je kar v treh meritvah prišlo do takšnih površinskih razpok, da ni bilo mogoče izdelati meritev, saj so se lamele zlomile (LOM). Glede na povprečne vrednosti smo predvidevali, da je večji uklon lamel dosežen na zgornji površini, glede na postavitev vzorca v sušilni komori. Statistična analiza nam pove, da vrednosti niso statistično značilne ($p \geq 0,05$), zato smo se odločili, da v nadaljevanju vrednosti LAMELA 1 in LAMELA 5 združimo. Statistična analiza pa nam potrdi razlike srednjega sloja (LAMELA 3) z zunanjsima slojema (LAMELA 1 in LAMELA 5), saj je $p \leq 0,05$.

Preglednica 9: Uklon lamel (REŽA v mm) pri tangencialno in radialno usmerjenih deskah ostrega režima. LAMELA 1 = zgornji sloj; LAMELA 3= srednji sloj; LAMELA 5 = spodnji sloj; LOM = vzorec je razpadel.

Table 9: Deviation arc of lamella (gap mm) in tangential and radial oriented boards drying with sharp drying regime. LAMELA 1 = upper layer; LAMELA 3 = middle layer; LAMELA 5 = bottom layer; LOM = sample is bursted.

	TANGENCIALNA				RADIALNA			
	LAMELA 1 in 5		LAMELA 3		LAMELA 1 in 5		LAMELA 3	
Čas	u	REŽA	u	REŽA	u	REŽA	u	REŽA
0	72,61	1,04	73,55	1	69,87	0,66	71,77	0,7
70	26	3,95	35,43	0,47	27,46	0,95	37,43	0,52
142	13,68	4,19	26,54	0,61	15,69	1,09	31,61	0,4
190	10,94	LOM	20,33	1,14	13,63	1,97	29,26	0,97
221	9,82	3,76	17,87	0,51	12,8	1,08	26,16	0,65
310	5,32	LOM	9,41	0,64	8,1	1,51	14,95	0,52
358	5,09	3,32	8,57	0,57	7,66	2	12,82	0,43
396	5,53	LOM	8,13	0,79	7,91	1,71	12,09	0,6

Primerjava radialno in tangencialno orientiranih desk pri sušenju z blagim režimom ni statistično značilna ($p \geq 0,05$).Tudi tukaj so vrednosti glede na povprečje večje v zunanjih slojih vzorcev, vendar nam je statistična analiza pokazala, da ni značilnih razlik, saj je $p \geq 0,05$. Statistična značilnost se kaže v primerjavi zunanjih slojev z notranjim slojem, saj so vrednosti pri notranjem sloju manjše ($p \leq 0,05$).

Preglednica 10: Uklon lamel (REŽA mm) pri tangencialno in radialno usmerjenih deskah blagega režima. LAMELA 1 = zgornji sloj; LAMELA 3 = srednji sloj; LAMELA 5 =spodnji sloj.

Table 10: Deviation arc of lamella (gap mm) in tangential and radial oriented boards drying with mild drying regime. LAMELA 1 = upper layer; LAMELA 3 = middle layer; LAMELA 5 = bottom layer.

	TANGENCIALNA				RADIALNA			
	LAMELA 1 in 5		LAMELA 3		LAMELA 1 in 5		LAMELA 3	
Čas	u	REŽA	u	REŽA	u	REŽA	u	REŽA
0	60,46	0,14	64,49	0,12	57,3	0,11	58,71	0,13
48	36,58	0,35	43,6	0,12	36,93	0,28	44,1	0,09
96	23,08	1,61	34,02	0,22	24,63	1,69	36,82	0,05
182	14,05	2,05	28,08	0,16	15,14	1,95	31,63	0,22
254	11,92	2,09	21,42	0,27	13,07	2,19	27,12	0,28
360	11,38	2,32	19,54	0,33	12,52	1,21	22,57	0,25
432	8,02	1,71	13,54	0,37	10,31	1,22	17,25	0,32
504	8,47	1,76	13,31	0,27	9,36	1,36	15,92	0,28
552	7,08	2,13	10,93	0,22	8,63	1,75	13,67	0,26
600	8,37	1,83	12,17	0,25	9,51	1,72	13,94	0,23

Pri oscilirajočem režimu so vrednosti prav tako večje pri tangencialno usmerjenih deskah (Preglednica 13) kot pa radialno usmerjenih deskah (Preglednica 14) ($p \leq 0,05$).

Ugotovili smo, da je večja zaskorjenost dosežena v zunanjih lamelah v primerjavi z notranjimi ($p \leq 0,05$).

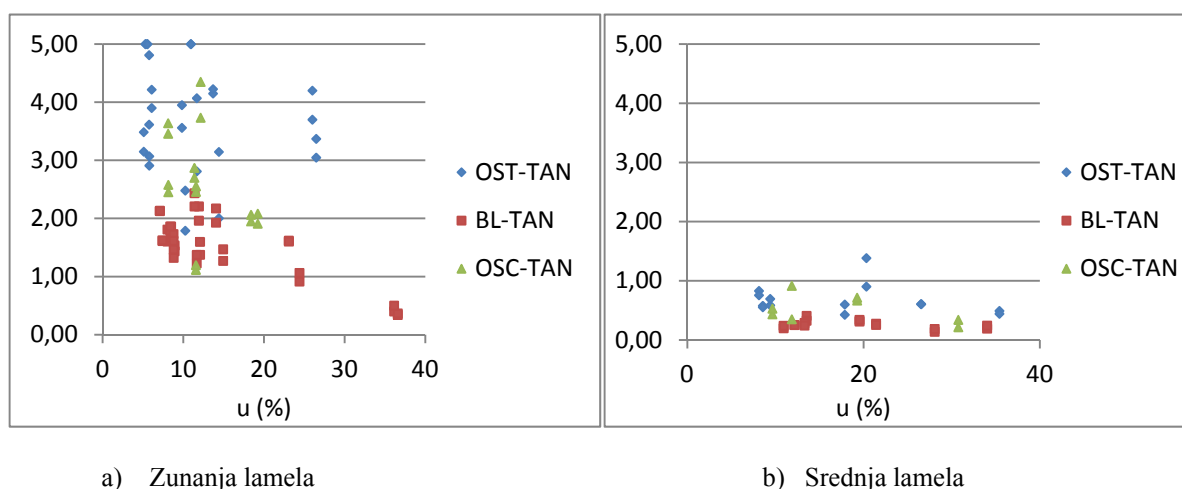
Preglednica 11: Uklon lamel (REŽA mm) pri tangencialno usmerjenih deskah oscilirajočega režima. LAMELA 1 = zgornji sloj; LAMELA 2 = srednji sloj; LAMELA 3 = spodnji sloj.

Table 11: Deviation arc of lamella (gap mm) in tangential and radial oriented boards drying with oscillating drying regime. LAMELA 1 = upper layer; LAMELA 3 = middle layer; LAMELA 5 = bottom layer.

	TANGENCIALNA				RADIALNA			
	LAMELA 1 in 5		LAMELA 3		LAMELA 1 in 5		LAMELA 3	
Čas	u	REŽA	u	REŽA	u	REŽA	u	REŽA
0	63,5	0,14	67,69	0,14	61,17	0,13	64,29	0,14
120	18,39	2,01	30,76	0,28	20,15	0,97	35,37	0,35
192	11,57	2,51	19,28	0,69	12,45	1,23	24,25	0,27
312	8,13	2,52	11,86	0,63	9,2	1,39	16,27	0,34
410	11,36	2,79	9,67	0,48	12,12	-1,36	10,69	0,27

Ugotovili smo, da je največji uklon lamel dosežen pri ostrem režimu sušenja, kar smo tudi pričakovali. Najmanjšo zaskorjenost oz. odklon lamel smo dosegli pri sušenju z blagim režimom. Oscilacija ravnovesne vlažnosti pozitivno vpliva na uklon lamel, saj je le ta manjši pri oscilirajočem režimu v primerjavi z ostrim režimom. Pri vseh treh režimih smo pričakovali večji uklon lamel pri tangencialno usmerjenih deskah. Pri sušenju z ostrim in oscilirajočim režimom smo to tudi statistično dokazali, medtem ko primerjava pri sušenju z blagim režimom ni statistično značilna.

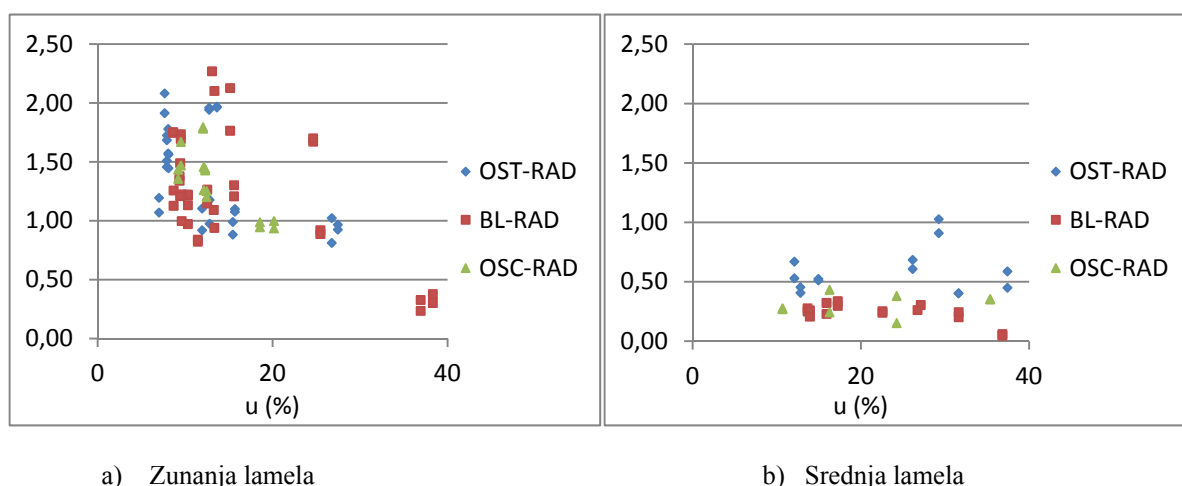
Primerjava vseh treh režimov sušenja nam je pokazala, da je odklon loka pri zunanjih lamelah tangencialno usmerjenih vzorcev do točke nasičenja celičnih sten približno enak, zato smo se odločili da upoštevamo vrednosti pod 40 % lesne vlažnosti. Po 40 % lesne vlažnosti se začne odklon loka povečevati, kar potrjuje navedbe avtorjev, da so nad točko nasičenja celičnih sten vrednosti enake in je naklon kota linearen. Zato smo se odločili, da podatke nad 40 % odstranimo iz grafa. Največji odklon loka smo izmerili pri ostrem režimu zunanjega sloja tangencialno usmerjenih desk, kjer je pri velikem številu vzorcev zunanjega sloja ugotovljen lom vzorca in ni bilo mogoče izmeriti odklona kota lamele. Lom je nastal zaradi velikega gradienta, ki je botroval površinskim razpokam. Te so segale v vzorec več kot 6 mm. Ker loma ne moremo pokazati na grafu, smo se odločili, da ima LOM vrednost nad 4,5 mm.



Slika 26: Odvisnost odklona loka lamele glede na vlažnost lesa pri zunanji lameli (a) in srednji lameli (b) tangencialno usmerjenega vzorca lesa.

Figure 26: Deviation arc of lamella depending on wood moisture content in the outer lamella (a) and middle lamella (b) tangentially oriented sample of wood.

Pri tangencialno usmerjenih zunanjih lamelah (Slika 26 a) so vrednosti odklona kota največje pri ostrem režimu, kjer je tudi največji vlažnostni gradient. Najnižji je pri blagem režimu, kjer je gradient najmanjši. Pri ostrem režimu so vrednosti odklona med 3 in 5 mm. Pri četrtini lamel so bile površinske razpoke tako globoke, da je 6 mm debel vzorec razpadel. Najmanjše vrednosti tangencialno usmerjenih zunanjih lamel smo izmerili pri blagem režimu, kjer so se vrednosti gibale med 1 in 2 mm. Prav tako so pri tangencialno usmerjenih srednjih lamelah (Slika 26b) vrednosti največje pri ostrem režimu, najmanjše pa pri blagem. Vrednosti se pri ostrem režimu gibljejo med 0,6 do 1,2 mm, pri blagem režimu pa med 0,20 in 0,40 mm. Pri radialno usmerjenih zunanjih lamelah (Slika 27a) ni opaziti večjih razlik med odklonom kota lamele in so vrednosti podobne pri vseh treh režimih. Pri radialno usmerjenih srednjih lamelah (Slika 27b) smo najvišje vrednosti prav tako izmerili pri ostrem režimu in so se gibale med 0,40 in 1,00 mm. Najmanjše pa pri blagem režimu med 0,10 in 0,30 mm.



Slika 27: Odvisnost odklona loka lamele glede na vlažnost lesa pri zunanji lameli (a) in srednji lameli (b) radialno usmerjenega vzorca lesa.

Figure 27: Deviation arc of lamella depending on wood moisture content in the outer lamella (a) and middle lamella (b) radially oriented sample of wood.

4.5 SPREMEMBE MEHANSKIH LASTNOSTI MED POTEKOM SUŠENJA

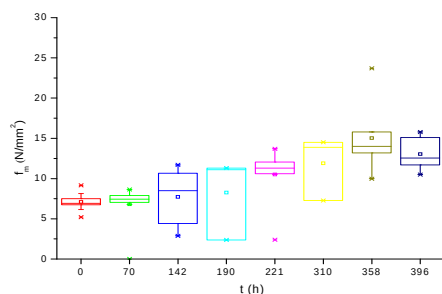
Za testiranje mehanskih lastnosti lesa smo se odločili zaradi več dejavnikov, saj se lahko med sušilnim postopkom mehanske lastnosti zaradi porušitev v vzorcih le te močno spremenijo. Osredotočili smo se na rezultate upogibnih lastnosti (upogibna trdnost) in nateznih lastnosti (natezna trdnost), ker smo hoteli ugotoviti, kako ostrina, hitrost sušenja in vlažnostni gradient vplivajo na mehanske lastnosti in kakšne deformacije se ustvarijo v lesu, če je sušenje prehitro.

Kot je splošno znano, se modul elastičnosti povečuje z zmanjševanjem vlažnosti. Ker med samimi postopki nismo izvedli ekstremnih sprememb temperature (povečanje za 100 do 200°C), ki bi lahko vplivala na dejanski modul elastičnosti, sklepamo, da nanj s postopkom sušenja nismo vplivali in je pri vseh treh postopkih odvisen od lesne vlažnosti.

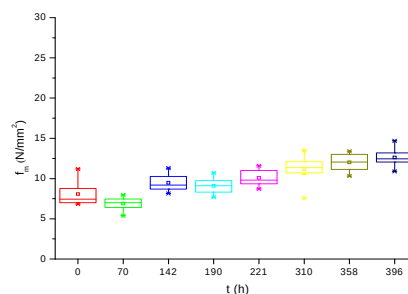
4.5.1 Upogibna trdnost

Za merjenje upogibne trdnosti smo se odločili zaradi nastanka površinskih razpok na vzorcu. Upogibna trdnost narašča med sušenjem pri sušenju z ostrim režimom, tako pri tangencialno in radialno usmerjenih deskah (Slika 28). Pri ostrem režimu je bilo na površini tangencialno usmerjenih desk veliko lomov lamel, kar je pomenilo, da so površinske razpoke segale tudi do 6 mm globoko, kar pomeni, da je razpoka segala čez celotno debelino zunanje lamele in zaradi tega na vzorcih ni bilo mogoče izmeriti upogibne trdnosti. Ugotovili smo

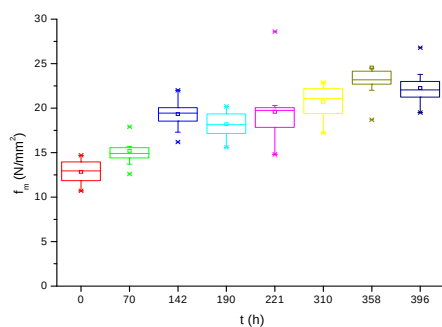
večje upogibne napetosti pri radialno usmerjenih deskah ($p \leq 0,05$), prav tako smo opazili večjo upogibno trdnost pri ostrem režimu sušenja v srednji lameli (LAMELA 3).



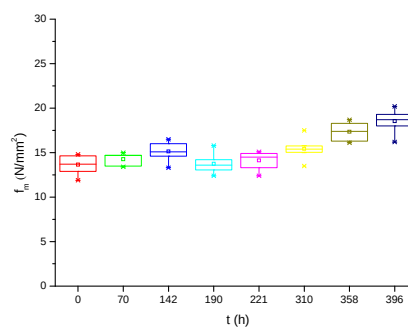
a) TAN_ZUNANJI SLOJ



b) TAN_SREDNJI SLOJ



c) RAD-ZUNANJI SLOJ

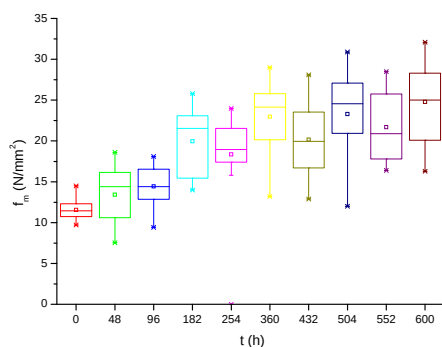


d) RAD-SREDNJI SLOJ

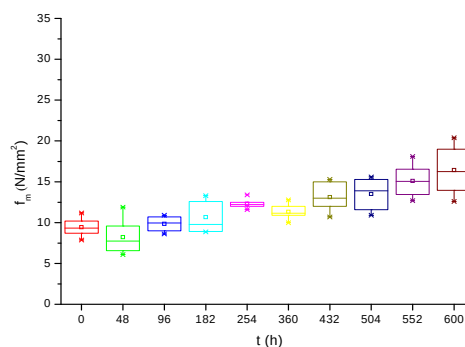
Slika 28: Upogibna trdnost v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z ostrim režimom; a) zunanji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; b) srednji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; c) zunanji sloj radialno orientiranih vzorcev; d) srednji sloj radialno orientiranih vzorcev.

Figure 28: Bending strength as a function of drying time for drying with a sharp drying regime: a) an outer layer of tangentially oriented samples, b) middle layer of tangentially oriented samples, c) the outer layer of radially oriented samples, d) middle layer of radially oriented samples.

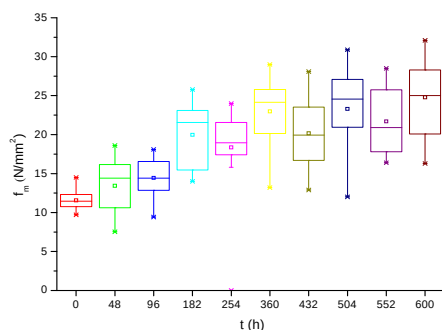
Upogibna trdnost pri sušenju z blagim režimom narašča, tako pri tangencialno usmerjenih deskah (Slika 29) kot pri radialno usmerjenih. Ugotovitve kažejo, da je upogibna trdnost večja pri radialno usmerjenih deskah ($p \leq 0,05$).



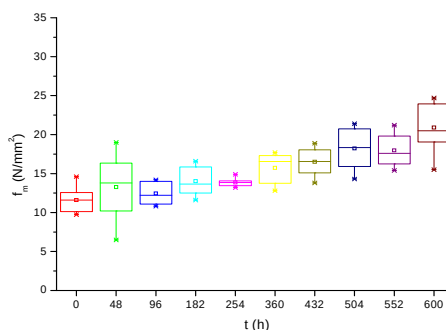
a) TAN_ZUNANJI SLOJ



b) TAN_SREDNJI SLOJ



c) RAD-ZUNANJI SLOJ

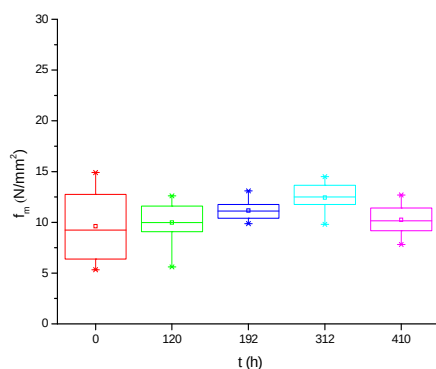


d) RAD-SREDNJI SLOJ

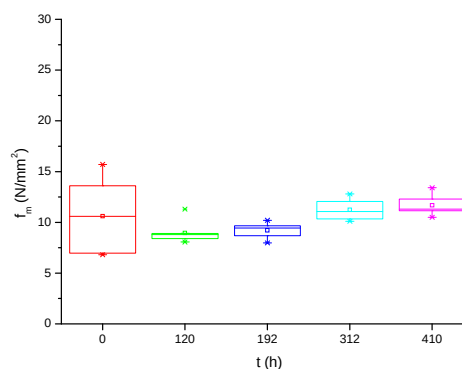
Slika 29: Upogibna trdnost v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z blagim režimom; a) zunanji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; b) srednji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; c) zunanji sloj radialno orientiranih vzorcev; d) srednji sloj radialno orientiranih vzorcev.

Figure 29: Bending strength as a function of drying time for drying with a mild drying regime: a) an outer layer of tangentially oriented samples, b) middle layer of tangentially oriented samples, c) the outer layer of radially oriented samples, d) middle layer of radially oriented samples.

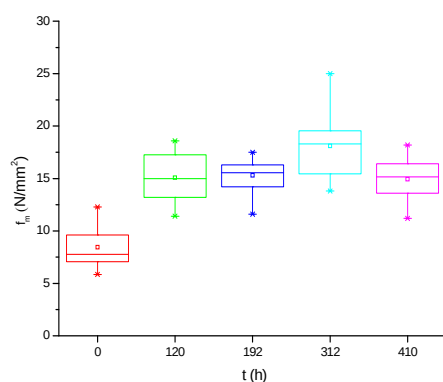
Upogibna trdnost pri sušenju z oscilirajočim režimom narašča tako pri tangencialno usmerjenih deskah (Slika 30) kot pri radialno usmerjenih. Statistična primerjava upogibne trdnosti nam je potrdila ($p \leq 0,05$), da je upogibna trdnost večja pri radialno usmerjenih deskah.



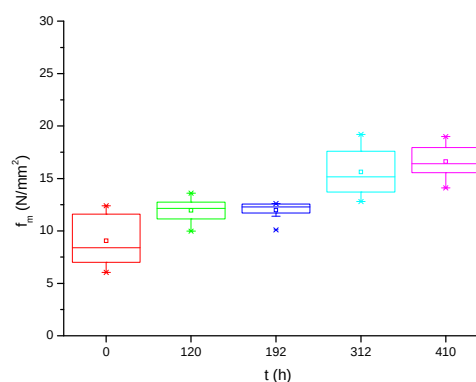
a) TAN_ZUNANJI SLOJ



b) TAN_SREDNJI SLOJ



c) RAD-ZUNANJI SLOJ



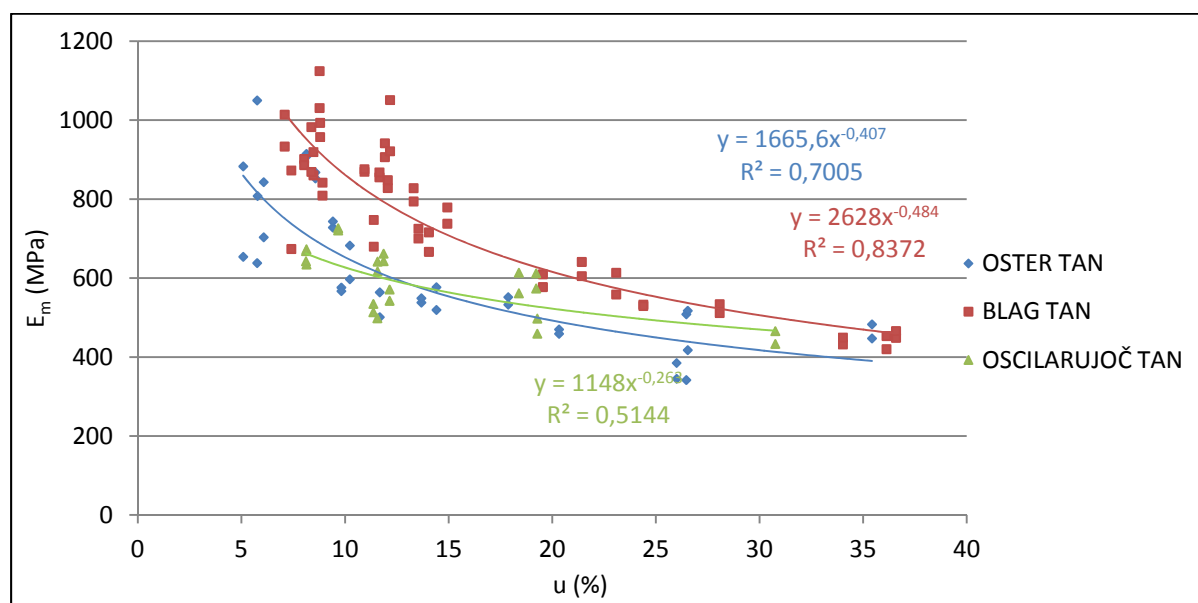
d) RAD-SREDNJI SLOJ

Slika 30: Upogibna trdnost v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z oscilirajočim režimom; a) zunanji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; b) srednji sloj tangencialno orientiranih vzorcev; c) zunanji sloj radialno orientiranih vzorcev; d) srednji sloj radialno orientiranih vzorcev.

Figure 30: Bending strength as a function of drying time for drying with oscillating drying regime: a) an outer layer of tangentially oriented samples, b) middle layer of tangentially oriented samples, c) the outer layer of radially oriented samples, d) middle layer of radially oriented samples.

Pri primerjavi upogibne trdnosti smo ugotovili, da le ta med sušenjem narašča, kar je posledica zmanjševanja relativne vlažnosti lesa. Primerjava vseh treh režimov je pokazala značilne spremembe v velikosti upogibne trdnosti. Najnižje vrednosti upogibne trdnosti so pri sušenju z ostrim režimom, kar pomeni, da je med postopkom sušenja prišlo do razpok in mikrorazpok, ki so poslabšale upogibne lastnosti lesa. Ugotovili smo, da z osciliranjem relativne ravnovesne vlažnosti upogibne lastnosti lesa izboljšamo v primerjavi z ostrim režimom. Ugotovili smo še, da imajo radialno usmerjene deske prav tako boljše upogibne lastnosti.

Primerjava med vsemi tremi režimi sušenja, je pokazala naslednje ugotovitve. Modul elastičnosti pri upogibni trdnosti (E_m) zunanjih slojev tangencialno usmerjenih desk je bil največji pri sušenju z blagim režimom. Vrednosti modula elastičnosti pri upogibni trdnosti so večje pri ostrem režimu, v primerjavi z oscilirajočim režimom proti koncu sušilnega postopka (Slika 31). Do dosežene 40 % lesne vlažnosti ni bilo bistvenih razlik pri upogibnem modulu elastičnosti tangencialno usmerjenih desk, nato pa vrednosti eksponentno naraščajo. Največje vrednosti smo v celotnem intervalu od 40 do 8% lesne vlažnosti izmerili pri sušenju z blagim režimom. Pri 40% lesni vlažnosti so bile vrednosti modula elastičnosti večje pri oscilirajočem režimu. Proti koncu sušenja so bile vrednosti večje pri sušenju z ostrim režimom. Pri sušenju z blagim režimom smo dosegli najvišji upogibni modul elastičnosti in sicer 1000 MPa, pri ostrem 800 MPa, pri oscilirajočem pa 650 MPa. Pri sušenju z ostrim režimom se je skoraj polovica vzorcev razpadla oziroma je prišlo do loma, kar pomeni da so površinske razpoke segale do 6 mm v površino. Iz tega sklepamo, da je bil vlažnostni gradient pri sušenju z ostrim režimom zelo velik, kar je botrovalo površinskim razpokam. Loma materiala pa ni bilo pri radialno usmerjenih vzorcih, kar nam pove, da so v radialno usmerjenih vzorcih ostrega režima sušenja dosežene manjše napetosti in s tem manjše deformacije.

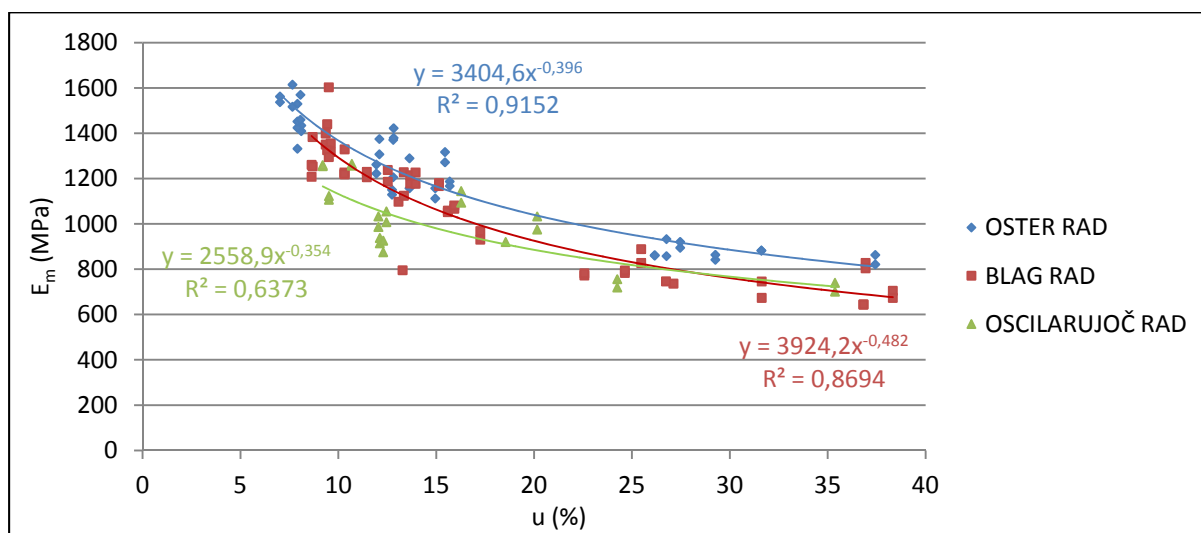


Slika 31: Odvisnost upogibnega modula elastičnosti (E_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri tangencialno usmerjenih deskah.

Figure 31: The dependence of the bending modulus of elasticity (E_m) during drying with a mild, sharp and oscillating regime in tangentially oriented boards.

Modul elastičnosti pri upogibni trdnosti zunanjih slojev radialno usmerjenih desk je bil največji pri sušenju z ostrim režimom. Vrednosti modula elastičnosti pri upogibni trdnosti so večje pri blagem, v primerjavi z oscilirajočim režimom (Slika 32). Pri sušenju z ostrim

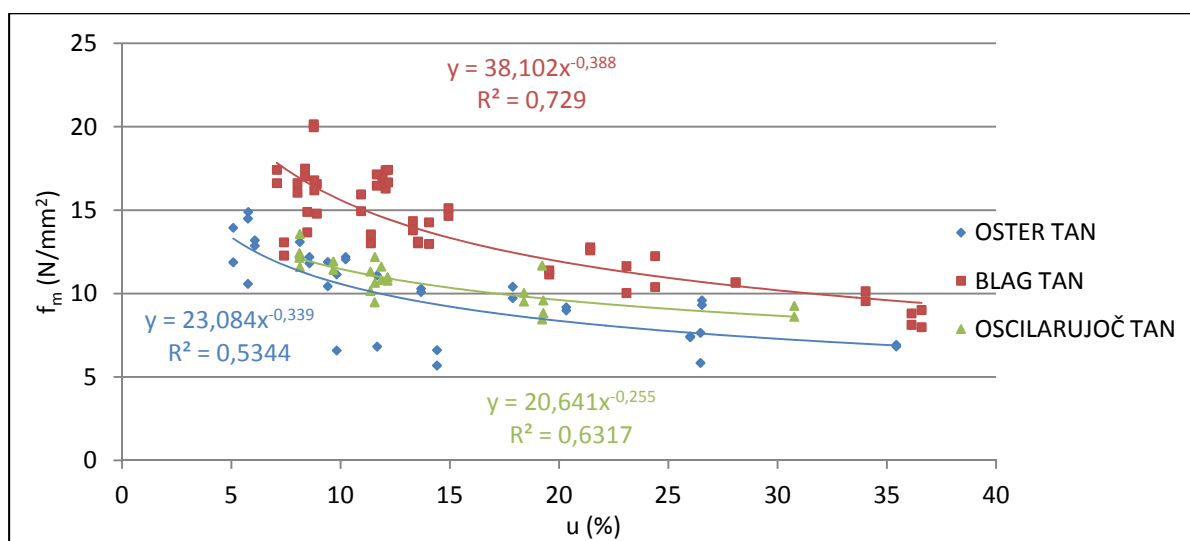
režimom smo dosegli najvišji upogibni modul elastičnosti in sicer 1600 MPa, pri blagem 1450 MPa, pri oscilirajočem pa 1250 MPa. V primerjavi z tangencialno usmerjenimi vzorci so vrednosti upogibnega modula elastičnosti večje, s čimer lahko potrdimo, da so pri tangencialno usmerjenih vzorcih dosežene večje napetosti in s tem večje deformacije. Tudi vizualna ocena je pokazala manj veženj in površinskih razpok pri radialno usmerjenih deskah.



Slika 32: Odvisnost upogibnega modula elastičnosti (E_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri radialno usmerjenih deskah.

Figure 32: The dependence of the bending modulus of elasticity (E_m) during drying with a mild, sharp and oscillating regime in radially oriented boards.

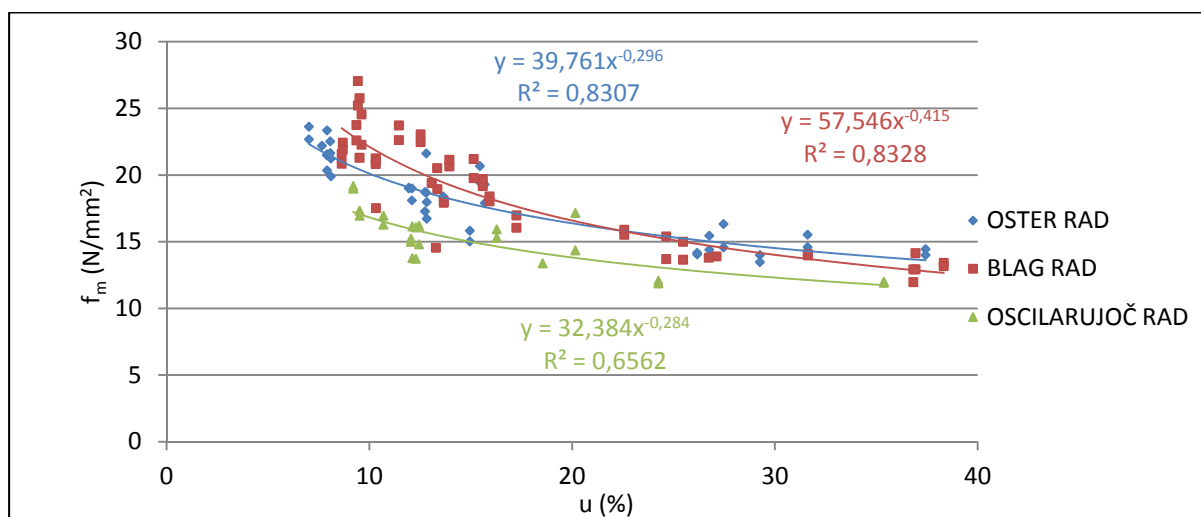
Upogibna trdnost (f_m) je bila prav tako do točke 40 % skoraj enaka, nato pa je začela eksponentno naraščati. Pri tangencialno orientiranih deskah smo največjo upogibno trdnost dosegli pri sušenju z blagim režimom, najnižjo pa pri sušenju z ostrim režimom. Vpliv oscilacij pozitivno vpliva na upogibno trdnost. Iz grafa je razvidno, da kinetika sušenja vpliva na upogibno trdnost materiala, saj smo iz navedb avtorjev pričakovali eksponentno naraščanje upogibne trdnosti med sušenjem glede na zmanjšanje vlažnosti lesa. Pri sušenju z blagim režimom smo dosegli najvišjo upogibno trdnost in sicer 18 MPa, pri oscilirajočem 13 MPa, pri ostrem režimu pa 15 MPa (Slika 33).



Slika 33: Odvisnost upogibne trdnosti (f_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri tangencialno usmerjenih deskah.

Figure 33: Dependence of bending strength (f_m) during drying with a mild, sharp and oscillating regime in tangentially oriented boards.

Pri radialno usmerjenih deskah smo največjo upogibno trdnost dosegli pri sušenju z blagim režimom. Najnižjo upogibno trdnost smo izmerili pri oscilirajočem sušenju. Pri sušenju z blagim režimom smo dosegli najvišjo upogibno trdnost in sicer 26 MPa, pri oscilirajočem 18 MPa, pri ostrem režimu pa 23 Mpa (Slika 34).



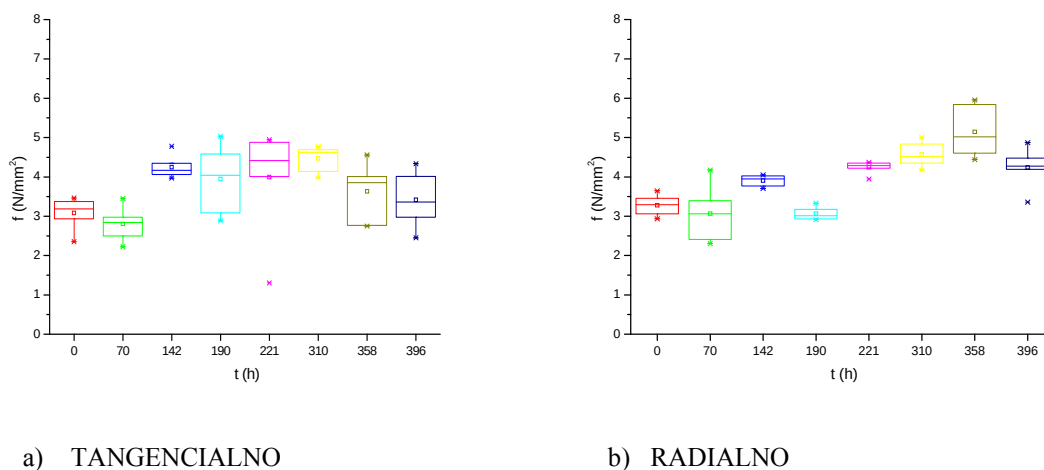
Slika 34: Odvisnost upogibne trdnosti (f_m) med sušenjem z blagim, ostrim in oscilirajočim režimom pri radialno usmerjenih desk.

Figure 34: Dependence of bending strength (f_m) during drying with a mild, sharp and oscillating regime in radially oriented boards.

4.5.2 Natezna trdnost

Natezne lastnosti lesa smo merili zaradi nastanka zaskorjenja v vzorcih, saj zaradi notranjih napetosti nastanejo frakture in zmanjšajo natezne trdnosti. Z merjenjem nateznih

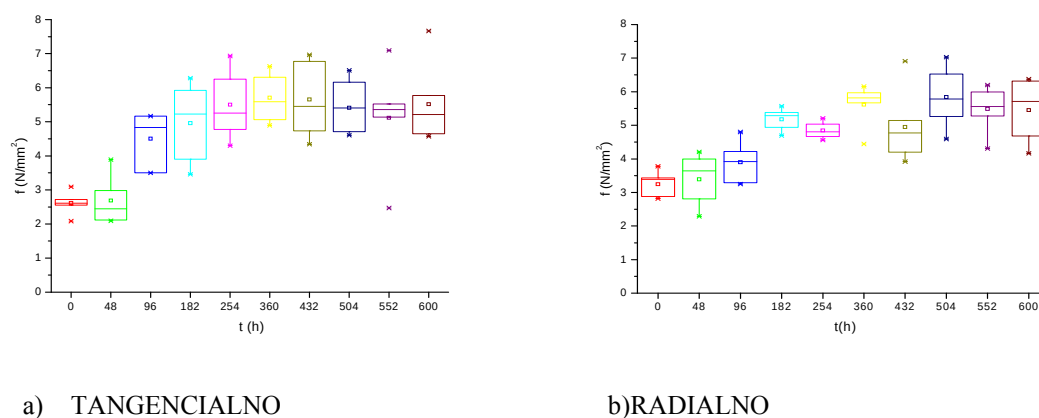
trdnosti smo poskušali ugotoviti, v kateri fazi sušenja nastanejo te frakture. Pri testiranju nateznih lastnosti smo se osredotočili na natezno trdnost (σ). Največjo natezno trdnost smo pri radialno usmerjenih deskah (Slika 35) dosegli tik preden smo začeli s postopkom kondicioniranja in sicer 5,15 MPa po 358 urah sušenja in pri povprečni vlažnosti 13,6%. Največjo natezno trdnost 4,47 MPa smo dosegli po 310 urah sušenja in vlažnosti 9,3%.



Slika 35: Natezna trdnost tangencialno (a) in radialno (b) orientiranih vzorcev v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z ostrim režimom.

Figure 35: Tensile strength of tangentially (a) and radially (b) oriented samples as a function of drying time for drying with a sharp drying regime.

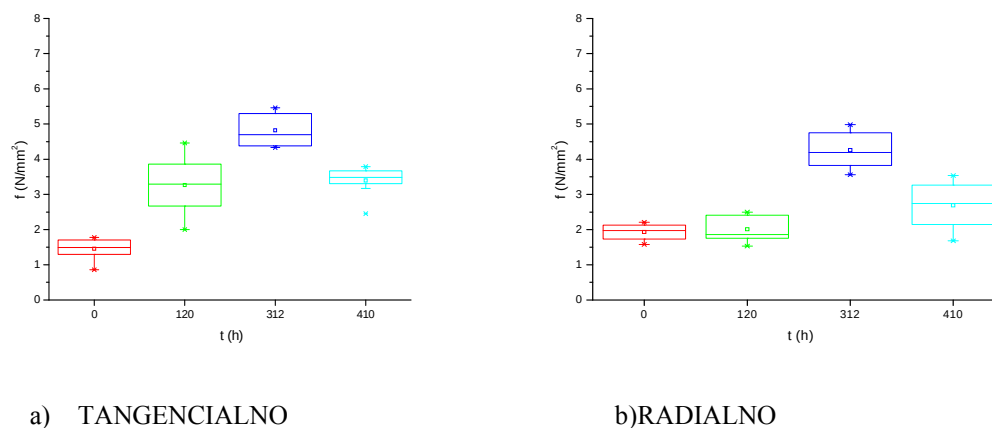
Pri sušenju z blagim režimom natezna trdnost narašča (Slika 36) do 182 ure sušenja, ko znaša 5,18 MPa, nato pa variira med 4,85 in 5,84 MPa. Natezna trdnost narašča do 360 ure sušenja, ko znaša 5,71 MPa, nato pa variira med 5,12 in 5,65 MPa.



Slika 36: Natezna trdnost tangencialno (a) in radialno (b) orientiranih vzorcev v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z blagim režimom.

Figure 36: Tensile strength of tangentially (a) and radially (b) oriented samples as a function of drying time for drying with a mild drying regime.

Pri sušenju z oscilirajočem režimom natezna trdnost pri radialno usmerjenih deskah (Slika 37) v začetku narašča in sicer do 312 ure sušenja, ko doseže vrednost 4,26 MPa pri vlažnost 16,3%. Natezna trdnost pri tangencialno usmerjenih deskah (Slika 29) narašča do 312 ure sušenja, ko znaša 4,82 N/mm² pri vlažnosti 11,9%.



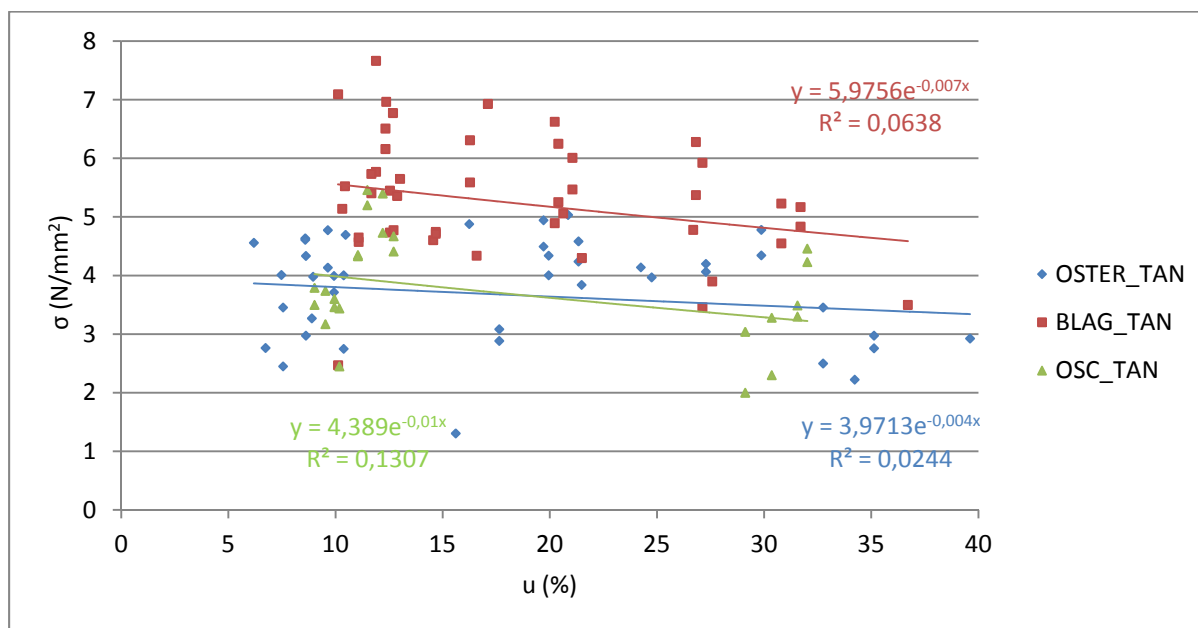
Slika 37: Natezna trdnost tangencialno (a) in radialno (b) orientiranih vzorcev v odvisnosti od časa sušenja pri sušenju z oscilirajočim režimom.

Figure 37: Tensile strength of tangentially (a) and radially (b) oriented samples as a function of drying time for drying with oscillating drying regime.

Natezna trdnost med sušenjem narašča pri vseh treh režimih sušenja. Največje vrednosti smo izmerili pri sušenju z blagim režimom, kar smo glede na navedbe avtorjev tudi pričakovali. S tem smo potrdili, da nepravilno voden postopek sušenja (velika ostrina sušenja) negativno vpliva na razvoj natezne trdnosti, saj med sušenjem nastane velik vlažnostni gradient, zaradi česar v notranjosti vzorca nastanejo razpoke in mikro razpoke, ki zmanjšajo natezno trdnost lesa.

Glede na navedbe avtorjev in svoje ugotovitve, smo se odločili pri primerjavi sušenja z vsemi tremi režimi osredotočiti na izmerjene podatke do točke vlažnosti 40%. Nad 40% meritve niso pokazale bistvenih sprememb in so bile linearne, zato smo podatke odrezali do 40% lesne vlažnosti in upoštevali podatke pod to lesno vlažnostjo. Natezna trdnost (σ) glede na vlažnost lesa je pri tangencialno usmerjenih deskah največja pri uporabi blagega režima. Med lesno vlažnostjo 30 do 40 % so vrednosti natezne trdnosti najmanjše pri uporabi oscilirajočega režima. V zaključni fazi sušenja smo najmanjše vrednosti dosegli pri sušenju z ostrim režimom. Pri sušenju z blagim režimom smo dosegli najvišjo natezno trdnost okoli 6 N/mm², pri ostrem 4,5 N/mm², pri oscilirajočem pa okoli 5 N/mm² (Slika 38). Ugotovili smo, da med podatki ni velike eksponentne ali linearne povezanosti, ampak iz grafa se lepo

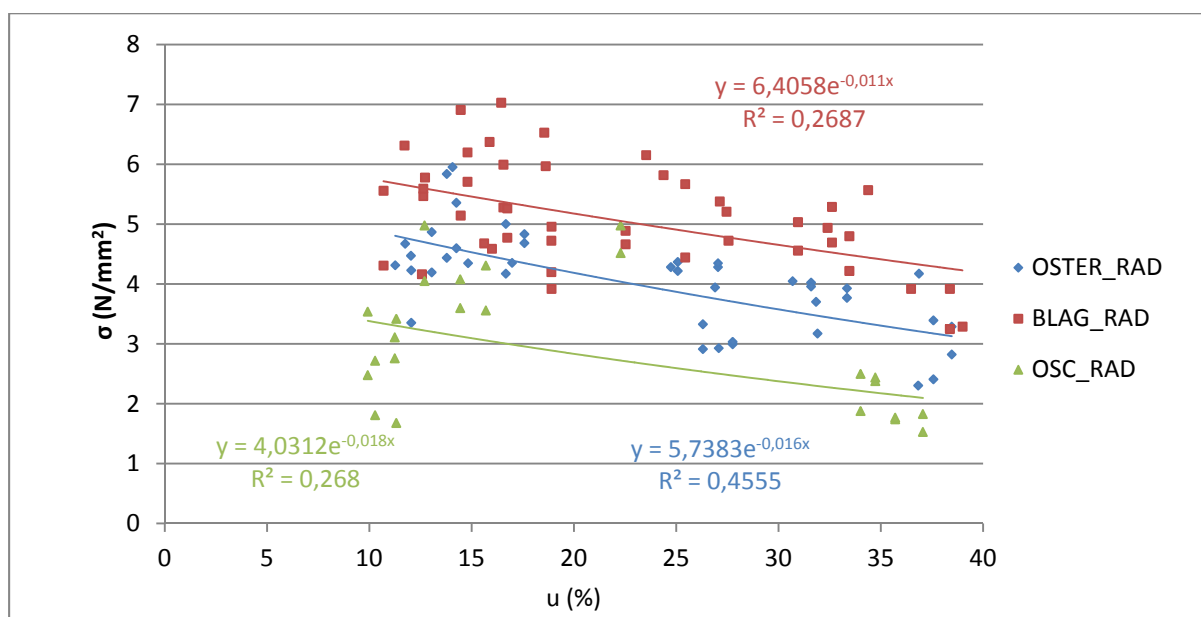
vidi, da smo največjo natezno trdnost dosegli pri sušenju z blagim režimom. Takšen rezultat smo pričakovali, saj kot smo že omenili, so pri sušenju z blagim režimom notranje razpoke oz deformacije manjše, saj so tudi notranje napetosti manjše. Pri primerjavi ostrega in oscilirajočega režima so vrednosti zelo podobne. Avtorji navajajo, da z oscilacijo povzročimo relaksacijo napetosti in zaradi tega smo pričakovali, da bodo natezne trdnosti višje pri oscilirajočem sušenju.



Slika 38: Odvisnost natezne trdnosti (σ) pri tangencialno usmerjenih deskah, glede na vlažnost lesa (u).

Figure 38: Dependence of tensile strength (σ) in tangentially oriented boards, depending on wood moisture content (u).

Natezna trdnost glede na vlažnost lesa je pri radialno usmerjenih deskah največja pri uporabi blagega režima. Presenetljivo so vrednosti modula elastičnosti najmanjše pri uporabi oscilirajočega režima, saj smo pričakovali večje natezne trdnosti pri oscilirajočem režimu. Pri sušenju z blagim režimom smo dosegli najvišjo natezno trdnost okoli 6 N/mm², pri ostrem 5 N/mm², pri oscilirajočem pa 4 N/mm² (Slika 39).



Slika 39: Odvisnost natezne trdnosti (σ) pri radialno usmerjenih deskah, glede na vlažnost lesa (u).

Figure 39: Dependence of tensile strength (σ) in radially oriented boards, depending on wood moisture content (u).

5 RAZPRAVA

5.1 KINETIKA SUŠENJA

Primerjava treh režimov sušenja je pokazala, da spremenjeni procesni parametri vplivajo na čas sušilnega postopka. Najdaljši čas sušenja smo dosegli pri sušenju z blagim režimom, ki je trajalo 600 ur. Planirani čas smo presegli za 38 ur (572 ur). Pri sušenju z ostrim režimom smo močno zmanjšali čas sušenja in sicer na 396 ur, planiran čas je znašal 476 ur. Vzrok za časovno razliko med ostrim in blagim režimom, ki znaša 204 ure je v višji temperaturi in ostrini sušenja, zaradi katere je transport vode hitrejši. Cloutier in Fortin (1993), povečanje prevodnosti z dvigom temperature pripisujeta manjši viskoznosti vode, saj se viskoznost z večanjem temperature sušenja manjša. Stamm (1959) je ugotovil, da dvig temperature za 45°C poveča permeabilnost za 10 %. Welling s sod. (2003) navajajo, da se oscilacijsko trajanje sušilnega procesa zmanjša za do 10 % pri uporabi oscilacij glede na navaden režim sušenja. Večino skrajšanega časa so dosegli pri izločanju proste vode. V našem primeru se je čas sušilnega postopka zmanjšal za 6,5% pri sušenju z oscilirajočim režimom. S tem lahko potrdimo našo hipotezo, da se čas sušenja zmanjša, če pri istem režimu uporabimo oscilacije relativne zračne vlažnosti.

Choong in sod., 1974 so ugotovili veliko variabilnost permeabilnosti v različnih anatomskih smereh (fiziološko stanje lesnega tkiva), kar smo potrdili z doseganjem nižje končne lesne vlažnosti pri tangencialno usmerjenih vzorcih. Ugotovili smo, da smo pri tangencialno usmerjenih vzorcih s krajšim časom sušenja dosegli zastavljeno končno vlažnost lesa, saj je končna vlažnost pri radialno usmerjenih vzorcih višja kot pri tangencialno usmerjenih. Predpostavljamo, da imajo pomembno vlogo pri doseženi končni vlažnosti trakovi, ki ležijo pravokotno na letnice pri tangencialno usmerjenih vzorcih, zaradi česar je izhlapevanje vode pri tangencialno usmerjenih deskah boljše. Rezultati se skladajo s splošnimi priporočili o sortiranju žaganic glede na orientacijo pred sušilnim procesom (Zhang in sod., 1996).

Med več analitičnimi modeli, ki opisujejo pričakovano sigmoidno obliko odvisnosti hitrosti sušenja od vlažnosti lesa, smo s testi potrdili najboljše ujemanje eksperimentalnih podatkov z asimetrično Gompertz-ovo funkcijo. S pomočjo modela smo ugotovili, da na začetku sušenja pri dovolj blagih pogojih obstaja faza konstantne sušilne hitrosti, kot so to potrdile nekatere druge raziskave pri sušenju svežega lesa (Straže, 2010). Primerjava hitrosti

sušenja v odvisnosti od vlažnosti nam je s pomočjo Gompertz – ovega modela (Preglednica 12) pokazala, da smo maksimalno začetno hitrost sušenja dosegli pri ostrem režimu sušenja radialno usmerjenih desk, kjer je maksimalna vrednost hitrosti sušenja 1,91 %/h. Pri tangencialno usmerjenih deskah je ta vrednost znaša 1,61%/h. Najnižje vrednosti hitrosti sušenja smo dosegli pri blagem režimu sušenja in znaša pri radialno usmerjenih deskah 1,10 %/h, pri tangencialno usmerjenih deskah pa 1,00 %/h. Maksimalno spremembo hitrosti sušenja (k) smo dosegli pri sušenju z blagim režimom. Pri radialno usmerjenih deskah smo vrednost $k = 0,0399$ dosegli pri vlažnosti 45,77%, pri tangencialno usmerjenih deskah pa $k = 0,0386$ pri vlažnosti 47,92%.

Preglednica 12: Primerjava hitrosti sušenja po posameznih režimih (BL = blag, OST = oster, OSC = oscilirajoč) z Gompertzovo krivuljo (a = asimptota začetne maksimalne hitrosti sušenja, x_c = vlažnost, kjer dosežemo maksimalno konstantno spremembo hitrosti sušenja, k = maksimalna hitrost sušenja, R^2 = koeficient variacije.)

Table 12: Comparison of speed drying by individual regimes (BL = mild, OST = sharp, OSC = oscillating) with Gompertz curve (a = asymptote of initial maximum speed of drying, x_c = humidity, when a maximum speed of drying was reached, k = max speed of drying, R^2 = coefficient of variation.)

	a	x_c	k	R^2
BL-RAD	1,10	45,77	0,0399	0,90
BL-TAN	1,00	47,92	0,0386	0,94
OST-RAD	1,91	57,72	0,0307	0,99
OST-TAN	1,61	50,55	0,0323	0,97
OSC-RAD	1,40	49,97	0,0307	0,88
OSC-TAN	1,87	50,17	0,0326	0,97

Prevojna točka (x_c) v modelu hitrosti sušenja vode v odvisnosti od povprečne vlažnosti lesa (u) predstavlja lesno vlažnost, pri kateri je pojemek hitrosti sušenja dosegel vrhunec (k), pod to vrednostjo pa se je z nadaljnjim sušenjem lesa eksponentno zmanjševala. Zmanjševanje hitrosti sušenja po prevojni točki (x_c), ter dejansko vlažnostno območje nakazujeta na ireverzibilen prehod v difuzijski režim sušenja. Obratno je moč domnevati, da nad vlažnostjo v prevoju modela (x_c) obstaja sušenje tako v obliki kapilarnega toka kot tudi v obliki toka vezane vode zaradi nastalih koncentracijskih razlik. Glede na navedbe avtorjev (Keey s sod., 2000) in proučene literature smo pričakovali večjo hitrost sušenja pri ostrejšem režimu, vendar smo največjo hitrost dosegli pri blagem režimu. Domnevamo, da smo pri ostrem režimu sušenja hitro zasušili površino, zaradi česar je prosta voda težje izhajala iz

sredine preizkušanca. Prav tako sklepamo, da smo zaradi ostrega režima hitro iz kapilarnega režima prešli v difuzijski mehanizem izločanja vode.

Izkaže se, da se pri preizkušancih, ki so sušeni z ostrejšim režimom, izvede prehod v difuzijski režim sušenja že pri visokih lesnih vlažnostih, bistveno nad vlažnostjo nasičenja celičnih sten ($x_c \gg u_{TNCS}$). Zaradi tega se zelo zmanjša sušilna hitrost, saj se more velik del proste vode izločiti po difuzijski poti. Iz tega sklepamo, da je prilagoditev kinetike izločanja proste vode takšna, da je vlažnost prehoda v difuzijski režim sušenja čim nižja.

Iz primerjave sušilnih diagramov (Slika 19) smo ugotovili največjo hitrost sušenja v odvisnosti od vlažnosti pri sušenju z oscilirajočim režimom, kar smo glede na temperaturo, ostrino sušenja in vpliv oscilacij sušenja tudi pričakovali. Primerjava med ostrim in oscilirajočim režimom potrdi višje hitrosti sušenja pri sušenju z oscilacijami. Najnižjo hitrost sušenja smo izmerili pri sušenju z blagim režimom.

Ugotovili smo še, da oscilacije pozitivno vplivajo na hitrost sušenja. Prav tako smo večje sušilne hitrosti dosegli pri tangencialno orientiranih vzorcih, kar smo glede na navedbe avtorjev tudi pričakovali (Gorišek, 1992). Največje hitrosti sušenja smo pri vseh treh režimih dosegli v zunanjem sloju vzorcev, medtem ko najmanjše v srednjem sloju vzorcev. Ugotovitve pokažejo, da ostrina sušenja vpliva na hitrost sušenja in prav tako določa trajanje sušilnega postopka. Potrdimo lahko, da oscilacije ravnovesne vlažnosti povečajo hitrost sušenja, prav tako se zmanjša trajanje sušilnega postopka. Sušilna hitrost je večja pri tangencialno usmerjenih deskah, kar nam pove, da se tangencialno usmerjene deske hitreje sušijo.

Najmanjša intenzivnost je dosežena pri sušenju z blagim režimom, kjer smo posledično ugotovili, da je razvoj sušilnih napetosti najmanjši, oziroma smo izmerili največje trdnosti pri upogibnem in nateznem testu, saj s sušilnimi pogoji nismo vplivali na mehanske lastnosti lesa.

5.2 RAZVOJ NAPETOSTNEGA POLJA

Razvoj napetostnega polja smo določali z zaskorjenostjo, ki je določena posredno s prežagovalno metodo in merjenjem uklona lamel, kar so v svojih raziskavah uporabljali tudi nekateri drugi avtorji. (Perre, 2007; Kowalski, 2001). Prav tako smo za vsako lamelo izračunali vlažnost, iz podatkov izračunali vlažnostni gradient, saj poznamo ugotovitve, da

lahko sušilne napetosti določamo na podlagi gradienta vlažnosti (Dengyun s sod., 2007; Hanhijärvi in sod., 2003).

Odklon loka lamel je večji pri tangencialno usmerjenih vzorcih v primerjavi z radialno usmerjenimi, kar smo glede na teorijo prečne krčitvene anizotropije tudi pričakovali. Če primerjamo zunanjo lamelo, so vrednosti 2 - krat manjše pri radialno usmerjenih lamelah pri sušenju z ostrim in oscilirajočim režimom. Najvišje vrednosti smo pričakovano izmerili pri tangencialno usmerjenih lamelah ostrega režima, kjer je vrednost s padanjem vlažnosti naraščala in je na koncu sušenja povprečje znašalo 4,10. Oster režim je v tangencialnih deskah zaradi ostrega sušenja povzročil takšne napetosti, da so na vzorcih nastale površinske razpoke do 6 mm globine, zaradi česa se je vzorec razpadel in ni bilo možno izmeriti loka lamele. Vzrok tiči v veliki ostrini sušenja, ki je povzročila, da smo prekoračili trdnost lesa in zaradi tega so nastale površinske razpoke. Najmanjše vrednosti odklona loka lamel smo izmerili pri sušenju z blagim režimom, ki so prav tako nastale na koncu sušenja in so znašale 1,70. Prikazan rezultat (Preglednica 13 in 14) nam pokaže, da lok lamele s padanjem vlažnosti narašča pri vseh treh režimih sušenja.

Preglednica 13: Primerjava odklona loka zunanje lamele pri tangencialno usmerjenih deskah.

Table 13: Comparison of deflection arc of outer lamella in tangentially oriented boards.

	6% -10%	10% - 20%	20% - 30%
OST-TAN	4,10	3,52	3,58
BL-TAN	1,70	1,77	1,30
OSC-TAN	3,03	2,62	2,00

Primerjava radialno in tangencialno usmerjenih vzorcev nam potrdi, da je odklon loka lamele manjši pri vseh zastavljenih režimih pri radialno usmerjenih deskah. Iz rezultatov smo ugotovili, da smo v radialno usmerjenih vzorcih z istim režimom sušenja dosegli manjše napetostno polje kot pa pri tangencialno usmerjenih, kar smo nameravali razložiti z doseženimi vlažnostnimi gradienti. Iz primerjave gradientov vseh treh režimov sušenja so vidne statistične razlike pri primerjavi radialno in tangencialno usmerjenih vzorcev. Večji vlažnostni gradient smo dosegli pri radialno usmerjenih deskah v vseh treh režimih sušenja. Iz spoznanja lahko zaključimo, da je kvaliteta sušenja pri istih pogojih boljša pri radialno usmerjenih deskah. Najmanjša razlika nastane pri sušenju z blagim režimom, kjer nam tudi statistična metoda ne pokaže bistvenih razlik.

Iz primerjave gradientov po ostrem in blagem režimu sušenja takšnih razlik ni bilo mogoče potrditi, saj so razlike v gradientih statistično neznačilne. Del nastalih razlik bi lahko

pripisali večji relaksaciji napetosti pri počasnejšem režimu sušenja. Posledično so bile izmerjene deformacije lamel pri tem postopku manjše.

Iz tega lahko sklepamo, da smo z blagim režimom sušenja dosegli pogoje, ki so pomembni za kvalitetno sušenje in smo na površini ustvarili takšne napetosti, da še le-te ne povzročajo razpok in mikrorazpok, kar je pomembno z vidika kvalitete sušenja lesa. Statistične razlike so pri ostrem in oscilirajočem režimu potrjene in dokazane, zato lahko potrdimo navedbe avtorjev (Welling s sod., 2003), da oscilacije relativne zračne vlažnosti pozitivno vplivajo na razvoj napetostnega polja, kar posledično pomeni, da je odklon loka pri tangencialno usmerjenih vzorcih manjši pri oscilirajočem sušenju.

Preglednica 14: Primerjava odklona loka zunanje lamele pri radialno usmerjenih deskah.

Table 14: Comparison of deflection arc of outer lamella in tangentially oriented boards.

	6% -10%	10% - 20%	20% - 30%
OST-RAD	1,58	1,34	0,93
BL-RAD	1,41	1,34	1,30
OSC-RAD	1,48	1,45	0,97

Če primerjamo srednje lamele z zunanjimi, so vrednosti razumljivo manjše pri srednji lameli, saj je vlažnostni gradient v srednji lameli veliko manjši kot pri zunanji lameli. Primerjava srednjih lamel med vsemi tremi režimi sušenja ni pokazala statističnih razlik, kar smo pričakovali, saj ostrina sušenja vpliva na odklon loka lamele predvsem na zunanji sloj preizkušanca, kjer je sušenje najintenzivnejše.

Ugotovili smo, da kinetika sušenja vpliva na odklon loka lamel. Vrednosti so največje pri sušenju z ostrim režimom, najmanjše pri sušenju z blagim režimom. Če primerjamo oster režim z oscilirajočim, vidimo, da oscilacije relativne zračne vlažnosti pozitivno vplivajo na odklon loka lamel.

5.3 TRDNOSTNE LASTNOSTI

Trdnostne lastnosti smo merili z vidika kvalitete sušilnega postopka na sam material. Znano je, da na trdnostne lastnosti vpliva več dejavnikov, med najpomembnejše pa štejemo vrsto lesa, vlažnost lesa, temperaturo, poroznost in anizotropijo. S sušilnim postopkom smo na trdnostne lastnosti vplivali s temperaturo, lesno vlažnostjo in ostrino sušenja zaradi katere so pri nepravilnem sušenju v lesu nastale deformacije v vzorcih. Zaradi velike heterogenosti lesa in velikega števila vplivnih dejavnikov, ki lahko vplivajo na trdnostne lastnosti, so le-te zelo variabilne.

Pri zniževanju vlažnosti v higroskopskem območju (pod TNCS) se mehanske lastnosti izboljšujejo. Razlog je verjetno v vzpostavljanju novih vodikovih vezi med mikrofibrilami, ko se le-te med izhajanjem vezane vode medsebojno približajo. Vpliv vlažnosti na mehanske lastnosti je na območju med 8 in 40 % vlažnosti eksponenten. Ugotovili smo, da na trdnost nad TNCS vlažnost nima več vpliva in so vrednosti skoraj enake.

V lesu se pri naraščajoči temperaturi pojavi večje oscilirajoče gibanje molekul in povečanje nihanja kristalne rešetke, ki se odraža v slabšanju mehanskih lastnosti. V praksi upoštevamo linearno zmanjšanje elastičnih parametrov z naraščanjem temperature, kar smo v naši primerjavi ugotovili, saj smo najmanjši E_{modul} dosegli pri sušenju z ostrim režimom, kjer smo na začetku sušilnega procesa uporabili večjo temperaturo sušenja.

Pomemben vpliv na trdnost ima tudi nehomogenost lesa, saj lahko pri isti lesni vrsti trdnosti močno variirajo. Vpliv na trdnost ima prav tako gostota lesa, rastne anomalije, razpoke, delež kasnega in ranega lesa, pravilnost postopka sušenja.

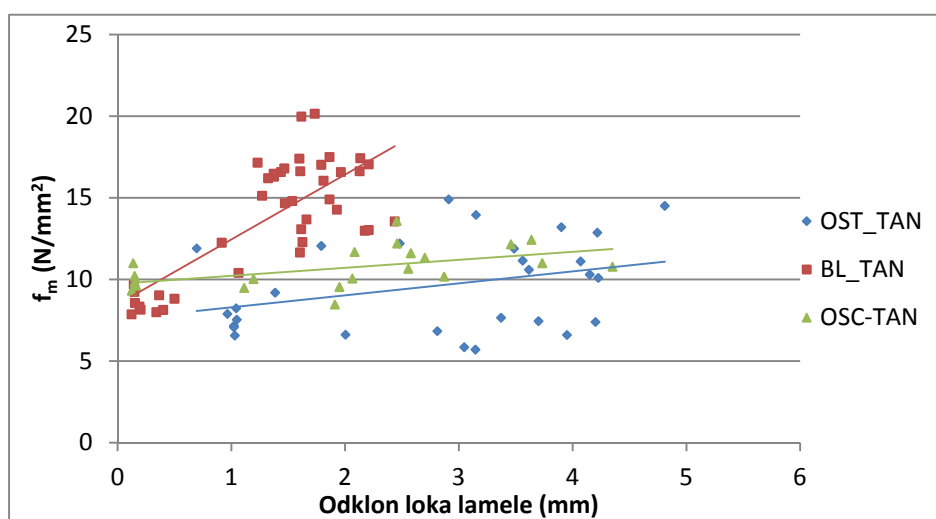
V našem primeru smo na trdnost najbolj poskušali vplivati z ostrino sušenja, ki naj bi zaradi nepravilnega postopka sušenja povzročila razpoke zaradi prevelikih napetosti v samem lesu. Majhen vpliv ima tudi temperatura, vendar sklepamo da je le ta zanemarljiv, saj pri postopkih nismo uporabili velikih sprememb temperature in je ta znašala okoli 15°C. Pri vseh treh režimih je trdnost do TNCS linearna, v intervalu od 8 – 40% eksponentno narašča.

5.3.1 Upogibna trdnost

Test upogibne trdnosti smo izvedli, da smo ugotovili ali smo z ostrino sušenja povzročili takšne notranje napetosti, da so le-te povzročile trajne deformacije v vzorcu. Večina avtorjev navaja, da je razvoj napetosti in pojav deformacij bistveno odvisen od lesne vlažnosti, vlažnostnega gradienta in temperature (Ranta-Maunus, 1975; Salin, 1992; Kowalski, 1996). Vlažnost lesa v higroskopskem območju ima močan vpliv na mehanske lastnosti lesa. Nad točko nasičenosti celičnih sten so mehanske lastnosti lesa bolj ali manj neodvisne od količine vode v lesu. Pod TNCS pa se mehanske lastnosti (upogibna in natezna trdnost) izboljšujejo s padanje lesne vlažnosti, kar smo v naših rezultatih tudi potrdili (Slika 33 in 34). Iz rezultatov je mogoče potrditi eksponentno povečevanje upogibne trdnosti z zmanjševanjem lesne vlažnosti. Pri sušenju z blagim režimom so vrednosti najvišje tako pri radialno kot tudi tangencialno usmerjenih deskah. Upogibna trdnost je manjša pri ostrem in

oscilirajočem režimu, saj smo z ostrejšim režimom vplivali na mehanske lastnosti lesa in povzročili deformacije, zato se je upogibna trdnost zmanjšala.

Upogibno trdnost smo primerjali z odklonom lamele in ugotovili, da obstaja linearna povezanost med upogibno trdnostjo in odklonom lamele (Slika 40) pri tangencialno usmerjenih deskah. Pri sušenju z blagim režimom, lahko z veliko verjetnostjo trdimo ($R^2 = 58\%$), da obstaja med upogibno trdnostjo in odklonom loka lamele linearna povezanost. Največjo povezanost smo dosegli zaradi blagih pogojev sušenja, saj so ti dovoljevali, da med sušenjem na vzorcu ni nastalo površinskih fraktur in razpok, ki botrujejo manjši upogibni trdnosti. Pri ostrem in oscilirajočem režimu te povezanosti ne moremo potrditi, saj sta koeficienta variacije zelo nizka. Vzrok nizke korelacije se nahaja v ostrih pogojih sušenja, ki so povzročile takšne notranje napetosti, da so te vodile v deformacije lesnega tkiva. Ta povezanost je pri sušenju z ostrim in oscilirajočim režimom bistveno manjša, kar nam pove, da postopka nista bila optimalno postavljena in smo s prehitrim sušenjem posegli v mehanske lastnosti lesa. Zaradi ostrejših pogojev sušenja so v lesu že nastale razpoke, mikro razpoke in frakture, zaradi česar se je upogibna trdnost zmanjšala.

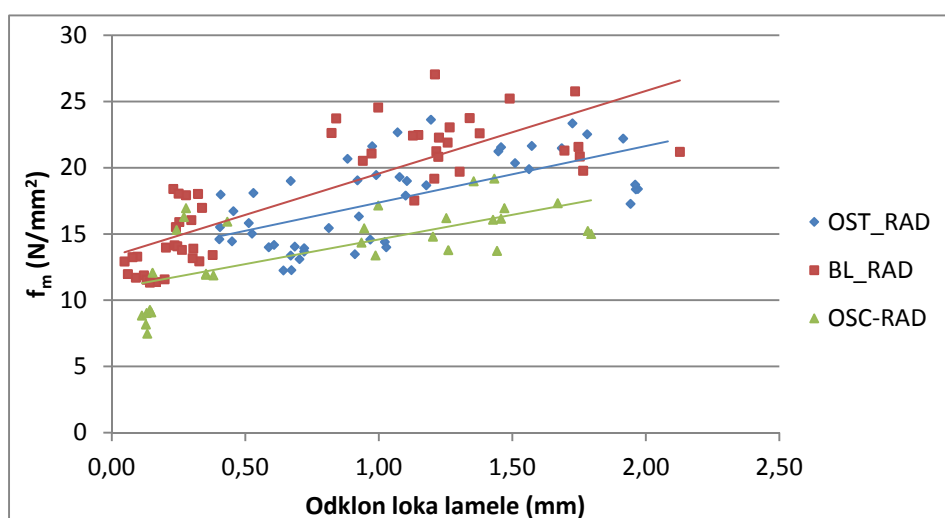


Slika 40: Odvisnost upogibne trdnosti od odklona loka lamele pri tangencialno usmerjenih deskah vseh treh režimov sušenja.

Figure 40: Dependence of bending strength and of the deviation arc of lamella for tangentially oriented boards of all three drying regimes.

Primerjava oscilirajočega in ostrega režima nam ne pokaže, da oscilacije pozitivno vplivajo na upogibno trdnost, kar trdijo nekateri avtorji (Welling s sod., 2003), saj nam statistična primerjava ni pokazala razlik. Vzrok lahko iščemo v preostrem režimu sušenja in oscilacije niso prišle do izraza. Možnost razlage je tudi v nepravilnem izboru časa in velikosti oscilacij, za kar pa bi bilo potrebno izvesti še nekaj dodatnih testiranj.

Pri primerjavi radialno usmerjenih desk vidimo, da je povezanost večja pri vseh treh režimih sušenja (Slika 41). Pri blagem režimu lahko z veliko verjetnostjo ($R^2 = 68\%$) potrdimo linearno povezanost. Koeficienta sta prav tako višja pri ostrem (39%) in oscilirajočem (46%) režimu sušenja, vendar je povezanost še zmerom majhna, tako da tudi pri teh dveh režimih ne moremo potrditi, da obstaja povezanost, saj smo z režimom prav tako spremenili mehanske lastnosti lesa. Večja povezanost pri oscilirajočem in ostrem režimu sušenja nastane zaradi orientiranosti vzorca, saj avtorji navajajo, da nastanejo pri istih pogojih sušenja večje napetosti pri tangencialno usmerjenih vzorcih, ki posledično zaradi razpok in mikrorazpok zmanjšajo upogibno trdnost lesa.



Slika 41: Odvisnost upogibne trdnosti od odklona loka lamele pri radialno usmerjenih deskah vseh treh režimov sušenja.

Figure 41: Dependence of bending strength and of the deviation arc of lamella for radially oriented boards of all three drying regimes.

Iz tega lahko sklepamo, da pri pravilno zastavljenih režimih sušenja, kjer s sušilnimi pogoji ne povzročimo notranjih napetosti, ki vodijo do nastanka fraktur in razpok, lahko na podlagi izmerjenega loka lamele izračunamo upogibno trdnost na podlagi linearne povezanosti, vendar moramo vedeti, da z režimom sušenja nismo zmanjšali mehanskih lastnosti lesa. Z vidika kontrole sušenja nam lahko ta podatek odklona loka lamele pove, kakšne upogibne napetosti nastanejo v različni fazi sušenja v lesu. Seveda bi bilo potrebno izvesti še dodatne meritve in raziskave, da bi lahko to potrdili z večjo verjetnostjo.

5.3.2 Natezna trdnost

Ugotovili smo, da je natezna trdnost večja pri sušenju z blagim režimom. Potrdimo lahko navedbe avtorjev, da je natezna trdnost večja pri tangencialno usmerjenih deskah.

Presenetljivo je natezna trdnost manjša pri sušenju z oscilirajočim režimom kot pri ostrim. Iz tega sklepamo, da oscilacije nimajo pozitivnega vpliva na sredino deske, saj so vrednosti modula elastičnosti tako pri tangencialno kot pri radialno usmerjenih deskah vrednosti manjše od sušenja z ostrim režimom. Zaključimo lahko, da bi pri sušenju z oscilirajočim režimom bilo potrebno spremeniti čas oziroma velikost oscilacij, kar je lahko predmet nadaljnjih raziskav. Natezna trdnost je pri tangencialno usmerjenih deskah skoraj enaka, medtem ko je pri radialno usmerjenih deskah natezna trdnost manjša pri oscilirajočem režimu v primerjavi z ostrim režimom. Primerjava ostrega in blagega režima pokaže, da so vrednosti modula elastičnosti in natezne trdnosti večje pri uporabi blažjega režima. S tem lahko potrdimo da ostrina sušenja, vlažnostni gradient in kinetika sušenja vplivajo na natezni modul elastičnosti, kakor tudi na natezno trdnost.

5.4 PRIMERJAVA PARAMETROV

Iz ugotovitev sklepamo, da na trdnost v sušilnem postopku vpliva veliko dejavnikov, ki so med seboj povezani in skupaj vplivajo na trdnostne lastnosti lesa. Znano je, da s padanjem lesne vlažnosti (pod TNCS) trdnost narašča. Glede na zastavljene režime smo ugotovili, da lahko z nepravilnim postopkom sušenja vplivamo na mehanske lastnosti lesa in se te zmanjšajo. Primerjava vlažnostnega gradienta med režimi ni pokazala bistvenih razlik. Največje gradiente smo pričakovali pri ostrem režimu, kjer so pogoji sušenja zelo ostri, vendar v našem primeru ni bilo bistvenih razlik med blagim in ostrim režimom sušenja. Sklepamo, da smo pri ostrem režimu zamudili največji vlažnostni gradient, saj je bila vlažnost srednjega sloja pri ostrem režimu nižja kot pri blagem režimu pri največjem izmerjenem vlažnostnem gradientu. Prav tako smo potrdili, da ostrina sušenja vpliva na odklon loka lamele in je ta največji pri sušenju z ostrim režimom, najmanjši je pri sušenju z blagim. Ostrina vpliva tudi na trdnostne lastnosti lesa, saj smo največje trdnosti izmerili pri sušenju z ostrim režimom. Ugotovili smo, da ostrina močno vpliva na odklon loka lamele, ki je v medsebojni odvisnosti z upogibno trdnostjo. Vse te odvisnosti so med seboj povezane, če s sušilnim režimom ne vplivamo na kakršne koli deformacije v lesu. Če deformacije nastanejo te povezanosti ne moremo potrditi. Oscilirajoč režim kaže boljše rezultate v primerjavi z ostrim režimom, vendar jih statistično ne moremo potrditi. Potrdimo lahko samo, da se trajanje sušilnega postopka zmanjša pri uporabi oscilacije relativne zračne vlažnosti.

6 SKLEPI

Rezultati raziskave so potrdili vpliv različnih sušilnih režimov na različno nastajanje notranjih napetosti in s tem nastajanje deformacij pri sušenju bukovine (*Fagus sylvatica* L.). V nalogi smo prišli do naslednjih ugotovitev:

- Razvoj sušilnih napetost je močno odvisen od zastavljenega sušilnega režima. Večja kot je ostrina sušenja, večji je vlažnostni gradient in tudi hitrejša je izhlapevanje vode iz površine, kar povzroča nastanek večjih notranjih napetosti v lesu med postopkom sušenja. Primerjava intenzivnosti sušenja je pokazala vpliv na notranje napetosti in deformacije. Razvoj napetostnega polja je najbolj intenziven pri sušenju z ostrim režimom.
- Ostrina sušenja ima pomemben vpliv na trdnost materiala. Tako natezna kot tudi upogibna trdnost sta največji pri uporabi blagega režima, oziroma pri najmanjši ostrini sušenja. Najmanjši vlažnostni gradient, ki ga določa ostrina sušenja je prav tako dosežen pri sušenju z blagim režimom.
- Ugotovili smo, da so na začetku sušenja sušilne napetosti in s tem deformacije manjše, kar se najbolj vidi pri sušenju z ostrim režimom, kjer se po 190 urah sušenja pojavijo takšne deformacije, da je vzorec, ki smo ga naredili za testiranje razpadel (LOM). To pomeni, da so bile razpoke oziroma deformacije globoke tudi do 6 mm v vzorec. Pri sušenju z ostrim režimom smo prekoračili trdnost materiala, zato se je upogibna in natezna trdnost zmanjšala.
- Ugotovili smo, da je trdnost najmanjša pri sušenju z ostrim režimom tako pri natezni kot tudi upogibni trdnosti. Vzrok leži v intenzivnem sušilnem postopku, ki je zaradi velike ostrine sušenja in velikega vlažnostnega gradienta povzročil, da so se v vzorcih pojavile razpoke in mikro razpoke, ki so zaradi intenzivnega sušenja zmanjšale tako upogibno kot tudi natezno trdnost lesa. Največje natezne in upogibne trdnosti smo izmerili pri sušenju z blagim režimom, kjer notranjih razpok in deformacij ni bilo.

- Če primerjamo oscilirajoč in oster režim, kjer so bili vsi parametri enaki, razen oscilacij relativne zračne vlažnosti, samo ugotovili, da je pri tangencialno usmerjenih deskah upogibna trdnost oscilirajočega režima večja, medtem ko je pri radialno usmerjenih deskah manjša. Iz vseh teh ugotovitev lahko potrdimo, da trdnost materiala v odvisnosti od vlažnosti eksponentno narašča. Primerjava ostrega in oscilirajočega režima je pokazala izboljšanje natezna in upogibne trdnosti pri tangencialno usmerjenih deskah, a pri radialno usmerjenih deskah so bile vrednosti manjše pri oscilirajočem režimu. Zato sklepamo, da bi bilo potrebno oscilirajoč režim še dodatno optimizirati. Pri sušenju z oscilirajočim režimom smo ugotovili zmanjšanje napetostnega polja, s čimer lahko potrdimo, da oscilacije pozitivno vplivajo tudi na razvoj napetostnega polja.
- Iz primerjav med radialno usmerjenimi in tangencialno usmerjenimi deskami pri vseh treh režimih sušenja smo ugotovili, da so bile večje napetosti in deformacije pri tangencialno usmerjenih deskah, kar smo po navedbah avtorjev tudi pričakovali. Takšne rezultate smo pričakovali na osnovi krčitvene anizotropije, katere vzrok krčenja je lahko tudi učinek poissonovega razmerja, ki zaradi zaviranja radialnega krčenja osnovnega tkiva poveča njegovo krčenje v tangencialni smeri.
- Z rezultati, ki smo jih raziskali, smo seznanili uporabnike v praksi glede modifikacije režimov sušenja ter jih opozorili na kritične intervale v procesu sušenja, kjer je nastanek napetosti največji in kakšne prednosti je mogoče doseči z oscilirajočo klimo.

7 POVZETEK (SUMMARY)

7.1 POVZETEK

Za proučevanje smo uporabili bukovino (*Fagus sylvatica* L), ki je z vidika uporabnosti, razširjenosti in specifičnih lastnosti naša najpomembnejša lesna vrsta. Les bukve je trd, ima visoko gostoto, je nagnjen k distorzijam, zvijanju, pokanju in obarvanju ter se zelo krči in nabreka (dimenzijsko nestabilen). Trdnostne lastnosti so glede na gostoto nadpovprečno visoke, elastičnost pa je nižja (Wagenführ, 1985). V nalogi smo hoteli ugotoviti, kako različni režimi sušenja lesa vplivajo na glavne naloge sušenja lesa (čas sušenja in kakovost osušenega lesa). Tako na čas kot tudi kakovost sušenja vpliva več dejavnikov, ki smo jih vključili v tri različne režime sušenja lesa. Uporabili smo oster režim sušenja, kjer smo uporabili večjo ostrino in temperaturo sušenja. Pri sušenju z blagim režimom sušenja smo ostrino in temperaturo zmanjšali tako, da je to sušenje čim kakovostnejše. Pri sušenju z oscilirajočim režimom smo parametrom ostrega režima dodali oscilacijo ravnovesne vlažnosti in sicer $\pm 15\%$. Pri vsakem od treh režimov smo spremljali vlažnostni gradient, povprečno vlažnost, odklon loka lamele, ter mehanske lastnost (natezno in upogibno trdnost), ki smo jih v nadaljevanju primerjali.

Sušilne eksperimente smo izvajali v kontroliranih laboratorijskih pogojih in sicer v specialnem sušilnem kanalu, ki omogoča doseganje temperature na $0,1^\circ\text{C}$ natančno in relativne zračne vlažnosti na 1% natančno. Temperaturo in relativno zračno vlažnost smo spremljali in zajemali s programom LAB-view. Na kinetiko sušenja smo vplivali s sušenjem pri različnih temperaturah in s spreminjanjem relativne zračne vlažnosti. Po natančni proučitvi svežega lesa smo v enakomernih intervalih sušilnega postopka na sušečem se materialu proučevali spremembo vlažnosti in vlažnostnega gradienta, razvoj napetostnega polja ter trdnostne lastnosti lesa. Proučevali smo pojavljanje notranjih napetosti pri bukovini, kjer smo uporabili različne ostrine sušenja. Prvo meritev smo opravili pred začetkom sušilnega postopka. Med samim postopkom smo sukcesivno na več intervalih odvzeli več odvzemov ter še enega takoj po kondicioniranju in zaključku sušilnega postopka.

Zastavljene režime sušenja smo dosegli pri ostrem in oscilirajočem režimu, pri sušenju z blagim pa smo dosegli višjo temperaturo v začetku sušilnega postopka od pričakovane. Sušilni postopek ostrega režima je trajal 396 ur, blagi režim je trajal 600 ur, oscilirajoč pa 372 ur. Večje hitrosti sušenja smo dosegali v tangencialno usmerjenih deskah in je pri sušenju z

ostrim režimom znašala 0,624 %/h, pri sušenju z blagim režimom pa 0,501%/h. Primerjava med tangencialno in radialno usmerjenimi deskami pokaže manjše vrednosti hitrosti sušenja v radialno usmerjenih preizkušancih. V diagramu sušenja smo podatke pojasnili z Gompertzovo krivuljo iz katere smo določili največjo spremembo hitrosti sušenja (k), asimptoto maksimalne hitrosti sušenja (a) in vlažnost pri kateri smo dosegli največjo spremembo hitrosti sušenja (x_c). Največjo hitrosti sušenja smo izračunali pri sušenju z ostrim režimom sušenja (RAD - 1,91%/h; TAN – 1,61%/h), kjer smo največjo spremembo hitrosti sušenja dosegli pri vlažnosti 57,7% za radialno usmerjene deske in pri vlažnosti 50,7% za tangencialno usmerjene. Najmanjšo začetno hitrosti sušenja smo izračunali pri sušenju z blagim režimom sušenja (RAD - 1,10%/h; TAN – 1,00%/h), kjer smo največjo spremembo hitrosti sušenja dosegli pri vlažnosti 45,8% za radialne in pri vlažnosti 47,9% za tangencialne deske. Iz podatkov sklepamo, da smo pri ostrem režimu sušenja hitro prešli iz kapilarnega v difuzijski mehanizem izločanja vode, zato so vlažnosti pri prevojni točki višje pri sušenju z ostrim režimom.

Vlažnostni gradient se med posameznimi režimi ni bistveno razlikoval, razlike pa smo ugotovili pri primerjavi radialno in tangencialno usmerjenih deskah. Radialne deske imajo v primerjavi s tangencialnim dosežene večje vlažnostne gradiente.

Odklon lamel (GAP) nam je potrdil nastanek večjih napetosti pri sušenju z ostrim režimom sušenja. Prav tako smo potrdili, da odklon lamel narašča, ko se lesna vlažnost zmanjšuje. Največje vrednosti smo dosegli pri sušenju z ostrim režimom, kjer je povprečen odklon lamel pri vlažnosti med 6 – 10% znašal 4,10 mm, pri oscilirajočem 3,03 mm, pri blagem pa 1,70 mm. Pri radialno usmerjenih deskah je odklon lamel manjši. Pri ostrem (1,58 mm) je vrednost 2,59 – krat manjša, pri blagem (1,41) je 1,21 – krat manjša in pri oscilirajočem 2,05 – krat manjša. Ugotovili smo, da sušilni parametri vplivajo na nastanek odklona lamele, prav tako glede na rezultate sklepamo, da je potrebno za optimalno izvedbo sušilnega postopka sortirati deske glede na tangencialno in radialno usmerjene, saj pri istem režimu v tangencialno usmerjenih deskah nastanejo večje notranje napetosti, ki posledično pomenijo večji odklon lamel.

Visoke sušilne napetosti kot posledica velikih vlažnostnih gradientov, ki nastanejo pri ostrih pogojih sušenja lahko povzročijo mikro porušitve v celičnih stenah in tako zmanjšajo trdnosti lesa. Z merjenjem upogibne trdnosti smo želeli ugotoviti mikro porušitve, ki naj bi nastale v površinskih slojih lesa in bi vplivale na zmanjšanje trdnosti že v začetku druge faze

sušenja. Nad lesno vlažnostjo 40% nismo opazili razlik, zato smo se osredotočili na interval med 6% in 40%. Pri sušenju z blagim režimom je upogibna trdnost s padanjem lesne vlažnosti naraščala tako pri zunanji lameli kot srednji lameli. Pri sušenju z ostrim in oscilirajočim režimom sta vrednosti prav tako naraščali pri srednji lameli, medtem ko je upogibna trdnost v zunanji lameli na začetku naraščala, med predzadnjim in zadnjim odvzemom so se vrednosti zmanjšale. Naraščanje upogibne trdnosti v odvisnosti od vlažnosti na intervalih od 6% do 40% smo ponazorili z eksponentno funkcijo. Primerjava med posameznimi režimi največje vrednosti upogibne trdnosti pokaže pri sušenju z blagim režimom. Glede na dosežene rezultate sklepamo, da smo pri sušenju z ostrim in oscilirajočim režimom ustvarili površinske razpoke, ki so posledica preostrih pogojev sušenja na površini ter so zmanjšale upogibno trdnost lesa. Primerjava upogibne trdnosti pri radialno usmerjenih vzorcih pokaže manjše razlike med režimi, iz česar sklepamo, da sušilni parametri manj vplivajo na radialno usmerjene vzorce. Prav tako smo ugotovili večje vrednosti upogibne trdnost na radialno usmerjenih deskah, kar pomeni, da isti režim sušenja povzroči manj deformacij v radialno usmerjenih deskah.

Predpostavili smo, da na natezno trdnost vpliva tudi intenzivnost zaskorjenja. Pri ostrih režimih sušenja nastanejo zaradi velikega gradienta napetosti, ki v notranjosti lesa povzročijo deformacije oz. razpoke. Zaradi večjega tangencialnega skrčka so pogostejše razpoke pravokotno na branike. Ugotovili smo, da je natezna trdnost največja pri sušenju z blagim režimom, kar smo tudi pričakovali. Pri ostrem in oscilirajočem režimu so vrednosti manjše, saj smo s preostrim režimom sušenja presegli maksimalne napetosti in povzročili deformacije.

Ugotovitve kažejo, da na kakovost sušenja vpliva več dejavnikov. Primerjava režimov (procesni parametri) so pokazali razlike v trdnostnih lastnostih, odklonu lamel, pri vlažnostnem gradientu razlik nismo zasledili. Ugotovili smo negativno linearno povezanost in sicer večji kot je odklon, manjšo trdnost smo dosegli. Povezanost med odklonom loka lamele in upogibno trdnostjo ni tako dobra, če zaradi ostrih parametrov sušenja, ki posledično ustvarjajo velike odklone, vplivamo na porušitve v lesu. Potrdili smo, da oscilacije zmanjšajo čas sušilnega postopka in je potrebno za kakovostno sušenje sortirati deske po orientiranosti na radialno usmerjene in tangencialno usmerjene.

7.2 SUMMARY

For the study we used beech wood (*Fagus sylvatica* L), which is in terms of usability, prevalence and specific properties our most important wood species. Beech wood is hard, has a high density, it is prone to distortion, twisting, cracking, staining and swelling (dimensionally unstable). Strength properties, according to density are above-average, elasticity is lower (Wagenführ, 1985). The study was carried out to see how different drying regimes affect on the main task of drying the wood (drying time and quality of dried wood). Drying time, as well as the quality of drying was affected by several factors, which were included in the three different regimes of drying wood. We used a sharp drying regime, where we used the maximum drying temperature and sharpness. When drying with a mild drying regime we reduced the temperature and sharpness so it gave us a drying with the best quality. When drying with the oscillating regime, we added the sharp drying regime oscillation of equilibrium humidity and which is $\pm 15\%$ from the set. In each of the three regimes we were monitoring humidity gradient, average humidity deviation arc of lamella, and mechanical properties (tensile and bending strength), which we had compared.

Drying experiments were carried out in controlled laboratory conditions in the special drying tunnel, which enables the temperature to $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ accuracy and relative humidity at 1% accurate. The temperature and relative humidity were monitored and included with the LAB-view program. The drying kinetics were affected by drying at different temperatures and changes in relative humidity. After careful examination of fresh wood we studied change of moisture and humidity gradient, the development of stress field and strength properties of wood in regular intervals of drying process. We studied the occurrence of internal stresses in beech wood, where we used different drying regimes. The first measurement was performed before the start of the drying process. During the process, we successively made more measurements and than one immediately after conditioning and one at the end of the drying process.

We achieved planning conditions in sharp and oscillating regime. In mild drying regime we have reached a higher temperature at the beginning of the drying process than expected. Drying process of sharp drying regime lasted for 396 hours, mild drying regime lasted for 600 hours and the oscillating drying regime lasted for 372 hours. Higher drying speed was achieved in a tangentially oriented boards drying with a sharp drying regime and it was $0.624\text{ }\%/h$. In drying with a mild regime it was $0.501\text{ }\%/h$. Comparison between tangential and radial oriented boards shows lower values of drying speed in the radially

oriented specimens. The diagram drying data were explained by the Gompertz curve from which we determined the maximum change in speed drying (k), asymptote of maximum speed drying (a) and humidity at which we reached maximum change in speed drying (x_c). Maximum speed drying was calculated in drying with a sharp drying regime (RAD - 1.91% / h; TAN - 1.61% / h), where we had the biggest change in speed drying at humidity 57, 7% for radially oriented boards and 50.7% for tangentially oriented boards. Minimum speed drying was calculated in drying with a mild drying regime (RAD - 1.10 %/h; TAN - 1.00 %/h, where we had the biggest change in speed drying at humidity 45, 8% for radially oriented boards and 47.9% for tangentially oriented boards. From the data we conclude that in sharp drying regime we quickly came out of the capillary to the diffusion mechanism in the elimination of water, so the humidity at inflection point is higher at drying with a sharp regime.

Humidity gradient between the regimens was not significantly different, differences were found when we compared radially and tangentially oriented boards. Radial boards in comparison with the tangential achieved higher humidity gradients.

With deviation arc of lamella (GAP), we confirmed the emergence of major tension with a sharp drying regime. We have also confirmed that the deviation arc of lamella increases when the wood moisture decreases. Maximum values were achieved in the sharp drying regime, where the average deviation of lamella with humidity between 6 - 10% was 4.10 mm, 3.03 mm in oscillating drying regime and 1.70 mm in mild drying regime. In radially oriented boards deviation arc of lamella is smaller. In sharp drying regime (1.58 mm), the value is 2.59 – times lower, in mild (1.41) the value is 1.21 - times lower and in oscillating drying regime it is 2.05 – times lower. We found out that the drying parameters had influence on deviation arc of lamella. According to the results we suggest that it is necessary to optimize the execution of the drying process by the sorting boards on tangentially oriented and radially oriented, because in the same regime at tangentially oriented boards consequently represent a bigger deviation arc of lamella which provide significant internal tensions.

High drying stress as a result of large humidity gradients arise from sharp drying conditions and can cause micro burst in the cell walls and this reduces the wood strength. By measuring the bending strength we wanted to determine the micro-burst, which would occur in the superficial layers of wood and would affect in reduction of strength at the beginning of the second stage of drying. Wood humidity over 40% was observed with no differences, so we focused on the interval between 6% and 40% wood humidity. When drying with a mild

regime, the bending strength of wood with decreasing wood humidity increased in both - the outer lamella, as well as the middle lamella. When drying with a sharp and oscillating drying regime, values also grew in the middle lamella, while the bending strength in the outer lamella initially increased, during the penultimate and last deprivation values of bending strength decreased. The increase in bending strength as a function of wood humidity at interval from 6% to 40%, we illustrated with the exponential function. Comparison between different regimes showed us maximum bending strength in drying with mild drying regime. According to the obtained results we conclude that drying with sharp and oscillating regime created surface cracks caused by sharp drying conditions which reduce the bending strength of wood. Comparison of bending strength in radial oriented samples showed small differences between the regimes from what we assumed that drying parameters have less impact on radially oriented samples. We also found higher values of bending strength in radially oriented boards, which means the same regime drying causes less deformation in the radially oriented boards.

We have assumed that on tensile strength also affects the intensity of casehardening. In sharp drying regimes arise due to the large humidity gradient which causes deformation and cracks in wood. Due to increasing tangential shrinkage cracks are more common perpendicular to the growth rings. We found that the maximum tensile strength is measured in mild drying regime, which was also expected. In sharp and oscillating drying regimes values are lower, because we caused bigger stress and strain because drying regime was too harsh.

We found that the quality of the drying influenced by several factors. Comparison of regimes (process parameters) showed us the difference in strength properties and deviation of lamella, in humidity gradient differences can't be found. We found a negative linear relationship between deviation arc of lamella and bending strength, larger is deviation arc of lamella lower strength was achieved. The relationship was not good with sharp drying parameters, which generated large deviations arc of lamella and caused internal deformations in the wood. We have also confirmed that oscillations reduce drying process time and that for quality drying we need to sort boards by orientation to radially and tangentially oriented.

8 VIRI

- Allegretti O., Bagolini A., Margesin B., Travan L. 2005. A sensor to measure wood stress during the drying process. V: 9th IUFRO Wood drying conference, Nanjing, China
- Allegretti O., Ferrari S. 2008. A Sensor for Direct Measurement of Internal Stress in Wood During Drying . Experimental Tests Toward Industrial Application. Drying technology, 26, 7-9: 1150-1154
- Backman A.C., Lindberg K.A.H. 2001. Differences in wood material responses for radial and tangential direction as measured by dynamic mechanical thermal analysis. Journal of Materials Science, 36, 3: 777-3783
- Brandao A., Perré P. 1996. The "Flying Wood" - A quick test to characterise the drying behaviour of tropical woods. V: 5th International IUFRO Wood Drying Conference, Quebec: 315-324
- Brooke A. S., Langrish T. A. G. 1997. The simulation of stresses and strains in the drying of *Pinus radiata* sapwood: the effect of board geometry. Computers chem. Enging., 21, 11: 1271-1281
- Choong E.T., Tesoro F.O., Manwiller F.G. 1974. Permeability of twenty-two small diameter hardwoods growing on southern pine sites. Wood and Fiber, 6: 91-101
- Cloutier A., Fortin Y. 1993. A model of moisture movement in wood based on water potential and determination of the effective water conductivity. Wood Science and Technology, 27: 95-114
- Čufar K. 2001. Opisi lesnih vrst. Študijsko gradivo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 54 str.
- Dengyun Tu., Lianbai Gu., Bin Liu, Xiang Zhou. 2007. Modeling and On-line measurement od drying stress of *Pinus massoniana* board. Drying Technology, 25: 441-448
- Gorišek Ž. 1992. Vpliv prečne krčitvene anizotropije lesa na sušenje in stabilnost. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Ljubljana
- Gorišek Ž. 2008. LES Zgradba in lastnosti njegova variabilnost in heterogenost. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.

- Hanhijärvi A. 2007. Creep deformation in drying wood. V: Fundamentals of wood drying; Perré P. (iz.), A.R.BO.LOR., Nancy
- Hanhijärvi A., Hunt D. 1998. Experimental indication of interaction between viscoelastic and mechano-sorptive creep. Wood Science and Technology, 32, 1:57-70
- Hanhijärvi A., Wahl P., Räsänen, J., Silbennoinen, R. 2003. Observation of Development of Microcracks on Wood Surface Caused by Drying Stresses. Holzforschung, 57: 561-565
- Hansmann C., Gindl W., Wimmer R., Teischinger A. 2002. Permeability of wood. Wood Research, 47: 1-16
- Hunter, A. J. 2002. Movement in a board of impermeable wood during drying. Wood Science and Technology, 36: 27-40
- Keey R. B., Langrish T. A. G., Walker J. C. F. 2000. Kiln – Drying of Lumber. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, New York: 326 str.
- Kollmann F.F.P., Cote W.A.J. 1968. Principles of wood science and technology. I. Solid wood. Springer-Verlag, New York: 592 str.
- Kowalski S. J. 2001. Thermomechanical approach to shrinking and cracking phenomena in drying. Drying Technology, 19, 5: 731-765
- Kowalski S. J., Molinski W., Musielak G. 2004. The identification of fracture in dried wood based on theoretical modelling and acoustic emission. Wood Sci Technol, 38: 35–52
- Kowalski, S.J., Rybicki, A. 2007. Residual stresses in dried bodies. Drying Technology, 25: 629-637
- Kubler H. 1975. Study on drying of tree cross sections. Wood Sci, 7: 173–181
- McMillen J.M., Baltes R.C. 1972. New kiln schedule for presurfaced oak lumber. Forest Products Journal, 22: 19-26
- Pang S. 2005. Development, validation and practical application of mathematical models for wood drying. V: 9th IUFRO Wood Drying Conference, Nanjing, 21-26 avg. 2005. Lianbai G. (ur). Nanjing
- Perré P., Karimi A. 2002. Fluid migration in two species of beech (*Fagus sylvatica* and *Fagus orientalis*): a percolation model able to account for macroscopic measurements and anatomical observations. MADERAS: Cince & Technologia, 4: 50-68

- Perré P., Passard J. 2007. Stress development. U: Fundamentals of wood drying. Perré P. (iz.), A.R.B.O.L.O.R., Nancy
- Perré P., Turner, I. 2007. Coupled heat and mass transfer. V: Fundamentals of wood drying; Perré, P. (ur). Nancy, A.R.B.O.L.O.R.: 203-241
- Ranta-Maunus A. 1975. The viscoelasticity of wood at varying Moisture Content. Wood Science and Technology, 9: 189-205
- Ranta-Maunus A., Korttesmaa M. 1988. An analysis of the state of stress in timber caused by moisture gradient. V: IUFRO Timber Engineering Meeting, Turku, Finland
- Ranta-Maunus A. 1992. Determination of drying stresses in wood when shrinkage is prevented: Test method and modeling. V: 3rd IUFRO International Wood Drying Conference; Viena; 139-144
- Salin J-G. 1992. Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model. Holz als Roh- und Werkstoff, 50, 5: 195-200
- Salin J.G. 2002. Theoretical analysis of mass transfer from wooden surfaces. V: 13th International Drying Symposium, Beijing, 27-30 avg. 2002. Mujumdar (ur). Beijing: 1826-1834
- Siau J.F. 1984. Transport processes in wood. New York, Springer: 245 str.
- Siau J.F. 1995. Wood: Influence of moisture on physical properties. Blacksburg, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University: 227 str.
- Simpson W. 1991. Dry kiln operator's manual. Ag. Handb. 188. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory
- Simpson W.T. 1993. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*). Wood Science and Technology, 27: 409-420
- Skaar C. 1988. Wood-water relations. New York, Springer: 283 str.
- Stamm A.J. 1959. Bound water diffusion into wood in the fiber direction. Forest Products Journal, 9: 27-32
- Straže A. 2010. Vpliv notranjega in zunanjega snovnega upora na kinetiko konvekcijskega sušenja lesa. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 114 str.

- Svensson S. 1995. Strain and Shrinkage Force in Wood Under Kiln Drying Conditions. I. Measuring Strain and Shrinkage Under Controlled Climate Conditions. Equipment and Preliminary Results, *Holzforschung*, 49, 4: 363–368
- Svensson S. 1996. Strain and Shrinkage Force in Wood under Kiln Drying Conditions. II: Strain, Shrinkage and Stress Measurements under Controlled Climate Conditions. *Holzforschung*, 50, 5: 463–469
- Svensson S., Martensson A. 1999. Simulation of drying stresses in wood; Part 1: Comparison between one- and two-dimensional models. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57: 129-136
- Svensson S., Martensson A. 1999. Simulation of drying stresses in wood. Part 2: Convective air drying of sawn timber. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57: 72-80
- Wagenführ R. 1985. *Holzatlas*. Leipzig, VEB Fachbuchverlag: 720 str.
- Welling J., Riehl T., Kruse K., Rose B. 2003. Verbesserte Schnittholztrocknung im Frischluft-/Ablufttrockner durch Wechselklima. Arbeitsbericht; Bundes-forschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg, Germany
- Welty R.J., Wicks E.C., Wilson R.E. 1984. Fundamentals of momentum, heat and mass transfer. New York, John Wiley & Sons: 786 str.
- Wiberg P. 2001. X-ray CT-scanning of wood during drying. Doct. dissertation. Lulea, Lulea University of Technology: 142 str.
- Wu Q., Milota M.R. 1994. Effect of creep and mechano-sorptive effect on the stress development during drying. *Drying Technology*, 12, 8: 2057-2085
- Zhang Y.C., Oliveira L., Avramidis S. 1996. Drying characteristics of hem-fir squares as affected by species and basic density presorting. *Forest Products Journal*, 46: 44-50

ZAHVALA

Izr. prof. dr. Željko Gorišek, hvala za mentorstvo, podporo in pomoč pri izdelavi magistrske naloge. Zahvaljujem se tudi dr. Alešu Stražetu in izr. prof. dr. Stjepan Pervanu za recenzijo magistrske naloge in koristne pripombe.

Zahvaljujem se g. Bojanu Karnerju za možnost šolanja in podporo ter Tehnološki agenciji Slovenije (TIA), ki je šolanje financirala.

Hvala vsem mojim prijateljem, ki so tako ali drugače pripomogli k izdelavi naloge. Prav tako hvala mojima staršema Mariji in Zvonku za podporo. Moja najdražja, Valentina in Patrik, hvala tudi vama za pomoč in razumevanje in vero vame, da zmorem ob delu v službi in skrbi za našo družinico opraviti še to magistrsko delo. Z vama sem ta projekt lažje uresničil!