

UNIVERZITET U BEOGRADU

ŠUMARSKI FAKULTET

Aleksandar M. Lovrić

**MOGUĆNOST PRIMENE TERMIČKI
MODIFIKOVANOG TOPOLOVOG
FURNIRA U PROIZVODNJI FURNIRSKIH
PLOČA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF FORESTRY

Aleksandar M. Lovrić

**POSSIBILITY OF APPLICATION OF
THERMALLY MODIFIED POPLAR
VENEER IN PLYWOOD PRODUCTION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

MOGUĆNOST PRIMENE TERMIČKI MODIFIKOVANOG
TOPOLOVOG FURNIRA U PROIZVODNJI FURNIRSKIH PLOČA

mr Aleksandar Lovrić

MENTOR:

dr Vladislav Zdravković, vanr. prof.
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

ČLANOVI KOMISIJE:

dr Branko Kolin, red. prof.
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

dr Branko Rabadžiski, red. prof.
Univerzitet u Skoplju, Fakultet za dizajn i tehnologii
na mebel i enterier

dr Goran Milić, docent
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

dr Nebojša Todorović, docent
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

Datum odbrane doktorske disertacije:

Izjava zahvalnosti

Zahvaljujem se svom mentoru dr Vladislavu Zdravkoviću vanr. prof. Šumarskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, što mi je svojim stručnim savetima i učešćem u realizaciji probnog eksperimenta pomogao da oblikujem temu, a u kasnijim fazama rada na disertaciji, pomogao da objasnim neke od rezultata istraživanja.

Zahvaljujem se i svim članovima komisije na korisnim primedbama i savetima koji su doprineli poboljšanju kvaliteta ovog rada.

Posebno se zahvaljujem Ranku, Mladenu, Goranu i Nebojši, bez čije bi pomoći teško mogao da obavim predviđeni eksperimentalni deo rada.

Zahvalnost dugujem i Goranu Milutinoviću na pomoći pri izradi uzoraka i Goranu Cvjetićaninu na pomoći tokom merenja i ispitivanja ovih uzoraka.

Veliku zahvalnost dugujem i rukovodstvu fabrike "Novi drvni kombinat" iz Sremske Mitrovice, koji su mi omogućili da u njihovoj fabrici izvedem najveći deo eksperimenta i koji su mi obezbedili sirovinu i radnike neophodne za izradu furnirskih ploča.

Rad ne bi mogao da se izvede ni bez pomoći firme "Tarkett" iz Bačke Palanke, u kojoj je odrađena termička modifikacija furnira i gde je izvršeno merenje boje. Zahvaljujem se kolegama i radnicima ove fabrike Mlađi, Milici, Urošu, Bojanu, Jovanu i Đorđu na pruženoj pomoći tokom ove faze rada.

Veliku zahvalnost dugujem i svojoj porodici na pruženoj moralnoj i finansijskoj pomoći.

Zahvaljujem se i svom "malom" lektoru kao i svima drugima koji su pomogli u izradi ovog rada.

Aleksandar

MOGUĆNOST PRIMENE TERMIČKI MODIFIKOVANOG TOPOLOVOG FURNIRA U PROIZVODNJI FURNIRSKIH PLOČA

Izvod: Predmet istraživanja doktorske disertacije bio je da se ustanovi da li se kombinovanjem termički modifikovanog i nemodifikovanog furnira topole može dobiti proizvod koji je dimenzionalno stabilniji u odnosu na klasičnu topolovu furnirsku ploču, uz istovremeno minimalno narušavanje mehaničkih svojstava. Formati topolovog furnira termički su modifikovani na temperaturama od 190 °C, 200 °C, 210 °C i 215 °C u trajanju od 1 h, uz prisustvo vodene pare kao zaštitnog sredstva. Pre termičke modifikacije ustanovljena je značajna razlika u boji između topolovog furnira nastalog iz zone beljike i iz zone lažne srčevine. Sa stanovišta izjednačavanja boje, najbolji rezultati ostvareni su pomoću tretmana na 210 °C, dok tretmani na 190 i 200 °C nisu dali željeni efekat. Od dobijenih termički tretiranih i od kontrolnih (netretiranih) formata izrađeno je 13 različitih tipova petoslojnih ploča (za svaki tip po 6 ploča). Presovanje ploča obavljeno je po suvom vrućem postupku presovanja u industrijskim uslovima, a kao vezivno sredstvo korišćen je MUF (melamin-ureaformaldehidni) lepak. Analize su pokazale da su na ravnotežnu vlažnost i dimenzionu stabilnost dobijenih ploča imali uticaj i termički tretmani i konstrukcije ploča. Promena vlažnosti i dimenzija bila je manja sa porastom temperature režima, kao i sa povećanjem učešća termički modifikovanog furnira u konstrukciji ploče. Ustanovljeno je da kontrolne ploče imaju značajno veću tvrdoću u odnosu na sve druge tipove ploča. Pri poređenju različitih režima, statistički značajna razlika u tvrdoći ploča postoji, ali samo se režim na 190 °C značajno razlikuje od režima na 210 i 215 °C. Na osnovu analize rezultata, zaključeno je da su termički tretmani manje uticali na smanjenje modula elastičnosti nego na smanjenje savojne čvrstoće. Ispitivanje smicajne čvrstoće u slojevima lepka, pokazalo je da svi tipovi ploča zadovoljavaju uslove za upotrebu u enterijeru. Sa povećanjem zahteva (testovi za uslove povećane vlažnosti i za spoljašnju upotrebu), došlo je do značajnog pada smicajne čvrstoće u slojevima lepka. Ovaj pad smicajne čvrstoće najverovatnije je posledica slabljenja kvaliteta lepljene veze pod dejstvom predtretmana. Prema svim ispitivanim svojstvima, tretmani na 200 °C i 210 °C su se pokazali kao optimalni, dok se tretman na 215 °C pokazao kao preoštari i ne treba ga koristiti za termičku modifikaciju furnira topole.

Ključne reči: Topola, furnir, furnirska ploča, termička modifikacija, fizička i mehanička svojstva furnirskih ploča

POSSIBILITY OF APPLICATION OF THERMALLY MODIFIED POPLAR VENEER IN PLYWOOD PRODUCTION

Abstract: The objective of the doctoral dissertation was to establish whether the production of plywood made by combining thermally modified and unmodified poplar veneer, could yield products that would be dimensionally more stable compared to ordinary poplar plywood, with minimum decreasing of mechanical properties. Formats of poplar veneers were thermally modified at temperatures of 190 °C, 200 °C, 210 °C and 215 °C during 1 h in the presence of steam as protection agents. The data indicated that there was significant difference in color between poplar veneers made from sapwood and wet heartwood, before thermal modification. After thermal treatments, the best results in reducing of color difference between veneers gained treatment at 210 °C, while thermal treatments at 190 and 210 °C didn't show satisfactory effect. The thermally treated and control (untreated) veneer formats were used to make 13 different types of five-layer plywood's (6 boards of each type). Plywood pressing was done in a dry-hot pressing process on industrial press, and MUF (melamine-urea-formaldehyde) glue was applied as adhesive. Analyses showed that the equilibrium moisture content and dimensional stability of plywoods were highly influenced by both thermal treatments and plywood constructions. Change of moisture content and dimensions of plywoods were lower with the increase of schedule temperature, and with the increase of percentage of thermally modified veneer in plywood construction. There was established that control plywood had significantly higher hardness than all other produced plywood types. The statistically significant difference in hardness between plywood made of thermally treated veneers at different temperatures existed, but only treatment at 190 °C was significantly different compared by treatments at 210 °C and 215 °C. Analysis of the results indicated that thermal treatments had a lower influence on the decrease of modulus of elasticity than on the decrease of bending strength. Analysis of the results of shear strength in the adhesive layers, showed that every plywood type had satisfactory properties for plywood application in indoor use. Increase of intensity of pre-treatments (tests for plywood application in conditions of high humidity and in outdoor use), caused a significant decrease in shear strength in the adhesive layers. This decrease of shear strength was a consequence of weakening of adhesive bond caused by pre-treatments. It was concluded that treatments at 200 °C and 210 °C gained optimal results, while treatment at 215 °C proved to be too intensive, and should not be used for thermal modification of poplar veneer.

Keywords: Poplar, veneer, plywood, thermal modification, physical and mechanical plywood properties

KLJUČNA DOKUMENTACIONA INFORMACIJA

Redni broj:

Identifikacioni broj (IBR):

Tip dokumenta: Monografska publikacija

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

Vrsta rada (VR): Doktorska disertacija

Autor (AU): mr Aleksandar Lovrić

Mentor/Ko-mentor (MN): dr Vladislav Zdravković, red. prof.

Naslov rada: Mogućnosti primene termički modifikovanog topolovog furnira u proizvodnji furnirskih ploča

Jezik publikacije: Srpski

Zemlja publikovanja: Republika Srbija

Godina izdavanja: 2014

Izdavač: Autorski reprint

Mesto i adresa: 11030 Beograd, Kneza Višeslava 1

Fizički opis rada (br. pgl./strana/
lit. navoda/ tabela/ slika/ dod. : 10/151/111/39/49/3

Naučna oblast (NO) Prerada drveta

Naučna disciplina (DIS) Primarna prerada drveta

Pred. odred./ključne reči (PO) Topola, furnir, furnirska ploča, termička modifikacija

UDK:

Čuva se (ČU): Biblioteka šumarskog fakulteta, 11030 Beograd, Kneza Višeslava 1

Primedbe:

Izvod: Predmet istraživanja doktorske disertacije bio je da se ustanovi da li se proizvodnjom furnirskih ploča od termički modifikovanog topolovog furnira može dobiti proizvod zadovoljavajućih svojstava. Formatu topolovog furnira termički su modifikovani na temperaturama od 190 °C, 200 °C, 210 °C i 215 °C u trajanju od 1 h. Od dobijenih termički tretiranih i od kontrolnih (netretiranih) formata izrađeno je 13 različitih tipova ploča. Analize su pokazale da su na ravnotežnu vlažnost dobijenih ploča imali uticaj i termički tretmani i konstrukcije ploča. Ustanovljeno je da su termički tretmani manje uticali na smanjenje modula elastičnosti nego na smanjenje savojne čvrstoće. Pooštavanje predtretmana dovelo je do značajnog pada smicajne čvrstoće u sloju lepka.

Datum prihvatanja teme (DP): 09.11.2011.

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession Number (AN):

Indenticatio number (INO):

Document Type: Monographic publication

Type of Record (TR): Textual printed article

Contains Code (CC): Ph.D. Thesis

Author (AU): mr Aleksandar Lovrić, M.Sc.

Mentor/Co-mentor (MN): dr Vladislav Zdravković, Ph.D

Title: Possibility of application of thermally modified poplar veneer in plywood production

Language of Text (LT): Serbian

Country of Publication (CP): Serbia

Publication Year (PY): 2014

Publisher: Author's reprint

Publication Place (PL): Faculty of Forestry, 11030 Belgrade, Kneza Visislava 1

Physical Description (PD): 10/151/111/39/49/3

Scientific Field (SF): Wood processing

Scientific Discipline (SD): Primary wood processing

Subject/ Key words (CX): Poplar, veneer, plywood, thermal modification, physical and mechanical plywood properties

UDC:

Holding data (HD): Library of Faculty of Forestry, 11030 Belgrade, Kneza Visislava 1

Note (N):

Abstract (AB): The object of the doctoral dissertation was to establish if production of veneer plywoods made of thermally modified poplar veneer can yield products of satisfactory properties. Formats of poplar veneer were thermally modified at temperatures of 190 °C, 200 °C, 210 °C and 215 °C during 1 h. The produced thermally treated and control (untreated) formats were used to make 13 different types of five-layer plywoods. Analyses showed that the equilibrium moisture content of plywoods was highly influenced by both thermal treatments and plywood constructions. It was established that thermal treatments had a lower influence on the decrease of modulus of elasticity than on the decrease of bending strength. Increase of intensity of pre-treatments produced a significant decrease in shear strength in the adhesive layer.

Acc. by Sc. Board on (ASB): 09.11.2011.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. PREDMET I CILJ RADA.....	5
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	8
3.1 Topole u Srbiji	8
3.2 Svojstva drveta topole.....	9
3.2.1 Hemijski sastav.....	9
3.2.2 Fizička svojstva	11
3.2.3 Mehanička svojstva	11
3.3 Nastanak i svojstva lažnog srca topole	12
3.4 Termički modificovano drvo	14
3.4.1 Istorijat termičke modifikacije drveta	14
3.4.2 Najznačajniji procesi proizvodnje termički modificovanog drveta	16
3.4.2.1 Plato proces	16
3.4.2.2 Oil Heat Treatment (OHT).....	17
3.4.2.3 Retifikacija	19
3.4.2.4 Thermowood proces.....	20
3.4.3 Uticaj termičke modifikacije na svojstva tretiranog drveta.....	22
3.4.3.1 Hemijske promene.....	22
3.4.3.2 Anatomske promene.....	26
3.4.3.3 Mehanička svojstva	27
3.4.3.4 Fizička svojstva	29
3.4.3.5 Trajnost termički modificovanog drveta.....	33
3.4.3.6 Lepljenje termički modificovanog drveta	34
3.4.3.7 Ploče na bazi termički tretiranog drveta.....	38
4. PROGRAM ISTRAŽIVANJA.....	40
5. MATERIJAL I METOD RADA	43
5.1 Izbor materijala	43
5.2 Termička modifikacija.....	47
5.3 Merenje boje	50
5.4 Izrada furnirskih ploča	52

5.5	Izrada epruveta i ispitivanje	55
5.5.1	Promena vlažnosti i debljine nad vodom.....	56
5.5.2	Kondicioniranje epruveta	58
5.5.3	Ispitivanje tvrdoće ploča.....	59
5.5.4	Ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti.....	60
5.5.5	Ispitivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka	62
5.5.6	Statistička obrada podataka	65
6.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA I ANALIZA.....	66
6.1	Uticaj termičkih tretmana na svojstva furnira topole.....	66
6.1.1	Boja furnira topole pre termičke modifikacije	66
6.1.2	Boja furnira topole posle termičke modifikacije	68
6.1.3	Poređenje boje furnira topole pre i posle termičke modifikacije.....	72
6.1.4	Vlažnost furnira topole pre i posle termičke modifikacije	74
6.2	Svojstva ploča od termički modifikovanog furnira topole	77
6.2.1	Ravnatežna vlažnost i gustina	77
6.2.2	Promena vlažnosti i bubrenje	82
6.2.3	Tvrdoća ploča	89
6.2.4	Savojna čvrstoća i modul elastičnosti pri savijanju.....	93
6.2.4.1	Savojna čvrstoća.....	93
6.2.4.2	Modul elastičnosti pri savijanju	100
6.2.4.3	Upotrebna klasifikacija	107
6.2.5	Smicajna čvrstoća u sloju lepka	109
7.	ZAKLJUČCI	117
8.	LITERATURA	124
9.	PRILOZI.....	138
10.	BIOGRAFIJA AUTORA	148

Sadržaj tabela

Tabela 1. Svojstva najznačajnijih evropskih nemodifikovanih vrsta topola	10
Tabela 2. Fizička svojstva tri klona topole <i>Populus x euramericana</i>	11
Tabela 3. Mehanička svojstva tri klona topole <i>Populus x euramericana</i>	12
Tabela 4. Uticaj termičkih tretmana na svojstva topolovog LVL-a	39
Tabela 5. Klasifikacija razlike u boji preko ΔE	52
Tabela 6. Tipovi izrađenih ploča	53
Tabela 7. Sastav, fizičke i hemijske karakteristike lepka korišćenog u eksperimentu ..	53
Tabela 8. Opšti uslovi za prolaz testa vodootpornosti.....	64
Tabela 9. Osnovni statistički pokazatelji izmerene boje topolovog netretiranog furnira u CIELAB koordinatnom sistemu boja.....	67
Tabela 10. Prosečna razlika u boji (ΔE) između furnira iz zone beljike, međuzone i zone srčike	68
Tabela 11. Boja toplovih furnira posle termičkog tretmana na 190 °C.....	69
Tabela 12. Boja toplovih furnira posle termičkog tretmana na 200 °C.....	69
Tabela 13. Boja toplovih furnira posle termičkog tretmana na 210 °C.....	69
Tabela 14. Boja toplovih furnira posle termičkog tretmana na 215 °C.....	70
Tabela 15. Razlika u boji (ΔE) između formata furnira iz zone srčike, međuzone i zone beljike, pre i posle termičkih tretmana	73
Tabela 16. Vlažnost uzoraka furnira pre i posle sušenja u fabričkoj sušari	74
Tabela 17. Osnovni statistički pokazatelji važnosti furnira posle termičke modifikacije (prosečne vrednosti za sve tri kategorije furnira)	75
Tabela 18. Vlažnost ploča posle četiri nedelje pri $\phi=30\%$ i 60% i $T=22\text{ °C}$	78
Tabela 19. Gustina ploča u apsolutno suvom stanju i pri $\phi = 60\%$ i $T=22\text{ °C}$	80
Tabela 20. Izračunate vrednosti upresovanja za pojedine tipove ploča (%)	87
Tabela 21. Tvrdoća ploča u apsolutno suvom stanju (MPa)	90
Tabela 22. Tvrdoća ploča posle četiri nedelje kondicioniranja na $\phi=60\%$ i $T=22\text{ °C}$..	90
Tabela 23. Tvrdoća ploča u apsolutno suvom stanju i pri $\phi=60\%$ i $T=22\text{ °C}$	91
Tabela 24. Savojna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete u aps. stanju vlažnosti (MPa)	94

Tabela 25. Savojna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete pri 60% φ (MPa)	94
Tabela 26. Savojna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete u aps. stanju vlažnosti (MPa)	95
Tabela 27. Savojna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete pri 60% φ (MPa).....	95
Tabela 28. Savojna čvrstoća paralelnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)	97
Tabela 29. Savojna čvrstoća poprečnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa).....	97
Tabela 30. Modul elastičnosti u aps. stanju vlažnosti, epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete (MPa)	101
Tabela 31. Modul elastičnosti pri 60% φ , epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete (MPa)	101
Tabela 32. Modul elastičnosti u aps. stanju vlažnosti, epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete (MPa).....	102
Tabela 33. Modul elastičnosti pri 60% φ , epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete (MPa).....	102
Tabela 34. Modul elastičnosti podužnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)	104
Tabela 35. Modul elastičnosti poprečnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)	104
Tabela 36. Klasifikacija ploča prema standardu EN 636	108
Tabela 37. Mogućnost upotrebe pojedinih ploča u suvim uslovima	110
Tabela 38. Mogućnost upotrebe pojedinih ploča u uslovima povećane vlažnosti	110
Tabela 39. Mogućnost upotrebe pojedinih ploča u eksterijeru.....	110

Sadržaj slika

Slika 1. Upotreba termički modifikovanog drveta u spoljašnjoj sredini	4
Slika 2. Bela topola (<i>Populus alba</i>) - levo i Krta vrba (<i>Salix fragilis</i>) - desno	8
Slika 3. Komora za vlažnu fazu termičke modifikacije izrađena od nerđajućeg čelika	17
Slika 4. Upotreba termički modifikovanog drveta po Plato procesu za fasadu zgrada..	17
Slika 5. Šema rada fabrike za modifikaciju drveta po OHT procesu	18
Slika 6. Primena modifikovanog drveta pomoću procesa retifikacije u enterijeru (levo) Primena u eksterijeru (desno)	20
Slika 7. Faze termičke modifikacije po finskom Thermowood procesu	21
Slika 8. Prodaja termički modifikovanog drveta proizvedenog po Thermowood tehnološkom procesu	21
Slika 9. Formiranje furanskih jedinjenja iz heksoza i pentoza kao posledica termičkog tretmana	22
Slika 10. Uticaj temperature i trajanja prve faze termičkog tretmana na PH vrednost belog bora	23
Slika 11. Promena komponenti drveta usled termičkih tretmana/sušenja.....	25
Slika 12. Glavne fizičko-hemijske promene osnovnih konstituenata drveta pod uticajem temperature	25
Slika 13. SEM snimci uzdužnog i poprečnog preseka traheida crvenog kedra	27
Slika 14. Razlika u ravnotežnoj vlažnosti uzoraka termički obrađenih korišćenjem pare povišenog pritiska, atmosferskog pritiska i netretiranih uzoraka	29
Slika 15. Promena boje tretiranih uzoraka bukve, bora i norveške smrče u zavisnosti od dužine i temperature tretmana	32
Slika 16. Slepljeni uzorci drveta pomoću epoksi lepka	37
Slika 17. Program istraživanja	42
Slika 18. Stovarište trupaca u fabrici „Novi drvni kombinat“ iz S. Mitrovice	43
Slika 19. Okoravanje trupčića pre operacije ljuštenja (levo), lagerovanje furnirskog platna na rolne (desno)	44
Slika 20. Obeležavanje i merenje uzoraka furnira za određivanje vlažnosti	44
Slika 21. Ubacivanje izrađenih formata i uzoraka u sušaru	45

Slika 22. Priprema topolovog furnira za termičku modifikaciju (levo) i ubacivanje pripremljenog furnira u laboratorijsku komoru (desno)	47
Slika 23. Prikaz termičkog tretmana na 190 °C	48
Slika 24. Izgled topolovog furnira posle termičke modifikacije	49
Slika 25. Formati furnira pre (levo) i posle termičke modifikacije (desno).	50
Slika 26. CIELAB koordinatni sistem boja (internet baza podataka).....	51
Slika 27. Formiranje “sendviča” za presovanje	54
Slika 28. Priprema za presovanje (levo) i presovanje ploča (desno)	55
Slika 29. Šema krojenja ploča pri izradi epruveta	55
Slika 30. Izrađene epruvete za ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstava.....	56
Slika 31. Kondicioniranje epruveta u klima komori firme “Tarkett”	59
Slika 32. Izgled epruveta za ispitivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka.....	62
Slika 33. Ispitivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka na mašini “WT4”	63
Slika 34. Izgled epruveta sa različitim učešćem loma u zoni drveta i lepka.....	64
Slika 35. Primeri epruveta koje su pukle van ispitivane zone	65
Slika 36. Komadi furnira dobijeni iz različiti zona.	66
Slika 37. Prosečne vrednosti parametara boje netretiranog topolovog furnira u CIELAB koordinatnom sistemu boja.....	67
Slika 38. Prosečne vrednosti komponente boje L* furnira topole iz različitih zona, pre i posle termičkih tretmana	70
Slika 39. Prosečne vrednosti komponente boje a* (levo) i b* (desno) furnira topole iz različitih zona, pre i posle termičkih tretmana	71
Slika 40. Ukupna promena boje tamnih, mešanih i belih formata usled termičke modifikacije	72
Slika 41. Raspodela vlažnosti topolovog furnira posle termičke modifikacije.....	76
Slika 42. Promena vlažnosti uzoraka nad vodom u toku prve nedelje eksperimenta	83
Slika 43. Ukupna promena vlažnosti uzoraka nad vodom.....	83
Slika 44. Promena debljinskog bubrenja uzoraka nad vodom u toku prve nedelje eksperimenta.....	84
Slika 45. Ukupna promena debljinskog bubrenja uzoraka nad vodom.....	84
Slika 46. Uticaj konstrukcije ploča i temperature modifikacije na dostignutu vlažnost	85

Slika 47. Uticaj konstrukcije ploča i temperature modifikacije na dostignuto debljinsko bubrenje	87
Slika 48. Povećanje dimenzione stabilnosti ploča preko ASE pokazatelja	89
Slika 49. Izgled loma pojedinih epruveta TNTNT ploča, pri ispitivanju savojne čvrstoće.....	107

Spisak skraćenica i simbola

5N	– petoslojna ploča izrađena samo od netretiranih furnirskih listova;
5T	– petoslojna ploča izrađena samo od termički tretiranih furnirskih listova;
a^*_0	– vrednost koordinate a^* pre termičke modifikacije;
a^*_m	– vrednost koordinate a^* posle termičke modifikacije;
a_1	– izmerena vrednost ugiba pri sili F_1 u mm;
a_2	– izmerena vrednost ugiba pri sili F_2 u mm;
ANOVA	– analiza varijanse (engl. - <i>analysis of variance</i>);
ASE	– indikator stabilnosti ploče (engl. - <i>anti swelling (shrink) efficiency</i>);
b	– širina epruvete u mm;
b_1	– širina ispitivane linije lepljenja u mm;
b^*_0	– vrednost koordinate b^* pre termičke modifikacije;
b^*_m	– vrednost koordinate b^* posle termičke modifikacije;
CIEL*a*b*	– CIELAB koordinatni sistem boja;
D	– prečnik kuglice u mm;
d	– prečnik otiska kuglice u mm;
DRIFT	– metod difuzne refleksije (engl. - <i>diffuse reflectance infrared Fourier transformation</i>);
E_m	– modul elastičnosti u MPa;
F	– sila utiskivanja kuglice u N;
F_1	– izmerena sila na 10% od ukupne sile loma epruvete u N;
F_2	– izmerena sila na 40% od ukupne sile loma epruvete u N;
FAO	– organizacija Ujedinjenih nacija (engl. - <i>Food and Agriculture Organization</i>);
FF	– fenol-formaldehidni lepak;
F_{max}	– izmerena sila u trenutku loma epruvete u N;
FRF	– fenol-rezorcinolno formaldehidni lepak;
FTIR	– Furierova transformisana infra crvena spektroskopija;
H	– tvrdoća po Brinelu u MPa;
KOV	– koeficijent varijacije;
L	– dužina epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće u mm;

l_1	– dužina ispitivane linije lepljenja u mm;
l	– rastojanje između oslonaca u mm;
L_0^*	– vrednost koordinate L^* pre termičke modifikacije;
L_m^*	– vrednost koordinate L^* posle termičke modifikacije;
$L_{5\%}$	– donjih pet posto;
LSD	– test najmanje značajne razlike (engl. - <i>least significant difference</i>);
LVL	– tip konstruktivne ploče (engl. - <i>laminated veneer lumber</i>);
M_0	– masa epruvete u apsolutno suvom stanju u g;
M_{iz}	– masa epruvete po izrezivanju u g;
M_{k0}	– masa komada furnira u apsolutno suvom stanju u g;
M_{kp}	– masa komada furnira po završetku operacije sušenja u g;
MOE	– modul elastičnosti (engl. - <i>modul of elasticity</i>);
MOR	– savojna čvrstoća (engl. - <i>modul of rupture</i>);
M_{u0}	– masa uzorka furnira u apsolutno suvom stanju u g;
MUF	– melamin urea-formaldehidni lepak;
M_{up}	– masa uzorka furnira po završetku operacije sušenja u g;
OHT	– tip termičke modifikacije drveta (engl. - <i>oil heat treatment</i>);
OSB	– tip konstruktivne ploče (engl. - <i>oriented strand board</i>);
PUR	– poliuretanski lepak;
PVAc	– polivinilacetatni lepak;
s_0	– debljina apsolutno suve epruvete u mm;
SD	– standardna devijacija;
SEM	– skenirajući elektronski mikroskop (engl. - <i>scanning electron microscope</i>);
SG	– standardna greška merenja;
Snt	– bubrenje (utezanje) netretiranog drveta u %;
St	– bubrenje (utezanje) tretiranog drveta u %;
s_x	– debljina epruvete određenog dana u mm;
t	– debljina epruvete u mm;
t_p	– debljina ploče u mm;
T	– temperatura u °C;

T3NT	– petoslojna ploča izrađena sa spoljnim listovima od termički tretiranog i srednjicom od netretiranog furnira;
TGA	– termogravimetrijska analiza (engl. - <i>thermal gravimetric analysis</i>);
TNTNT	– petoslojna ploča izrađena naizmeničnim slaganjem termički tretiranog i netretiranog furnira;
TZV	– tačka zasićenosti vlakanaca;
UV	– ultraljubičasto zračenje;
V_0	– zapremina epruvete u apsolutno suvom stanju u cm^3 ;
V_{iz}	– zapremina epruvete po izrezivanju u cm^3 ;
VOC	– isparljive organske komponente (engl. - <i>Volatile organic compounds</i>);
w	– pucanje po zoni drveta u %;
β_{uNT}	– ukupno debljinsko bubrenje epruveta iz kontrolnih ploča u %;
β_{u_x}	– ukupno debljinsko bubrenje epruveta iz upoređivanog tipa ploče u %;
β_{sx}	– debljinsko bubrenje epruvete određenog dana u %;
Δa	– promena koordinate a^* u CIELAB koordinatnom sistemu boja;
Δb	– promena koordinate b^* u CIELAB koordinatnom sistemu boja;
ΔE	– ukupna promena boje;
ΔL	– promena koordinate L^* u CIELAB koordinatnom sistemu boja;
α_r	– utezanje u radijalnom pravcu u %;
α_t	– utezanje u tangencijalnom pravcu u %;
α_v	– zapreminsko utezanje u %;
ρ_0	– gustina u apsolutno suvom stanju;
ρ_s	– gustina u sirovom suvom stanju;
ρ_{iz}	– gustina epruvete po izrezivanju;
σ_{sav}	– savojna čvrstoća u MPa;
σ_p	– pritisna čvrstoća u MPa;
σ_{sm}	– smicajna čvrstoća u sloju lepka u MPa;
v_{iz}	– vlažnost epruvete po izrezivanju u %;
v_{kp}	– vlažnost komada furnira po završetku operacije sušenja u %;
v_{us}	– vlažnost uzoraka furnira pre operacije sušenja u %;
φ	– relativna vlažnost vazduha u %;
\bar{x}	– srednja vrednost;

1. UVOD

Vekovima su ljudi koristili drvo za izradu raznih proizvoda i izgradnju objekata za stanovanje. Bilo je dostupno, lako se moglo obraditi i pružalo je dobru termičku izolaciju. Vremenom je kao građevinski materijal gubilo na značaju jer su ga potiskivali drugi materijali poput betona, čelika i stakla. Novi zalet drvnoj industriji dali su ekološki pokreti koji su krajem XX veka postali uticajna sila. Težnja da se živi u objektima izgrađenim od prirodnog materijala, reflektovala se na povećanu potražnju za proizvodima od drveta. Problem je nastao zbog toga što je ovaj trend bio u suprotnosti sa raspoloživim šumskim fondom koji se sve više smanjivao usled narastajuće svetske populacije.

Prema nekim procenama (Laurance et al. 2014), očekuje se da će se svetska populacija povećati sa oko 7 milijardi ljudi u 2011. godini, na 11 milijardi do kraja ovog veka. Da bi se zadovoljile egzistencijalne potrebe stanovništva, svake godine se velike površine pod šumama raskršuju i pretvaraju u oranice. Prema podacima FAO (2012a), trenutno se pod šumama nalazi oko 30% svetske teritorije, ali su se ove površine u periodu od 1990. do 2005. god. smanjivale za oko 0,11% godišnje, odnosno u posmatranom periodu od petnaest godina površine pod šumama su se smanjile za oko 1,7%. Ovo smanjenje se prvenstveno odnosi na Južnu Ameriku i Afriku, gde se i u budućnosti očekuje nastavak ovakvog trenda.

Uvozom trupaca iz manje razvijenih područja, privrede zapadnih zemalja su nadoknađivale manjak sirovine. Na taj način podmirivane su potrebe industrije i stanovništva, koje su bile veće od kvantitativnih i kvalitativnih proizvodnih mogućnosti šuma ovih zemalja. Nastavak takve prakse doveden je u pitanje kada je usled povećanja ekološke svesti u mnogim zemljama došlo do formiranja stranki "zelenih", koje su svojim delovanjem doprinele da očuvanje životne sredine postane jedan od prioriteta skoro svake vlade. Prekomerna eksploatacija šuma subtropskog i tropskog regiona sve više je izazivala negodovanje javnog mnjenja, pogotovo što su ove seče dovodene u vezu sa zagađenjem atmosfere i nastalim klimatskim promenama. Jedna od posledica ovakvog stava stanovništva je i nastanak zahteva za održivim gazdovanjem i sertifikacijom šuma i sertifikacijom proizvoda od drveta. Na ovaj način želelo se stati na put prekomernim i ilegalnim sečama šuma.

Drvena industrija je morala potražiti izlaz iz nastale situacije uvođenjem novih tehnologija koje su mogle povećati stepen iskorišćenja raspoložive sirovine (npr. proizvodnja ploča iverica, OSB, LVL-a...). Pored povećanja kvantitativnog iskorišćenja, išlo se i ka razvoju proizvoda poboljšanih svojstava u odnosu na polaznu sirovinu. Tako se pri proizvodnji furnirskih ploča (usled naizmeničnog ukrštanja listova furnira), smanjuje utezanje, bubrenje, raspucavanje i vitoperenje drveta. Pored toga, furnirske ploče imaju veću trajnost, poboljšana mehanička svojstva, veću izotropnost i veću površinu u odnosu na masivno drvo (Nikolić 1988). Upravo je ovo poboljšanje svojstava u odnosu na polaznu sirovinu, proširilo mogućnosti eksploatacije i na one drvene vrste koje se ranije nisu previše koristile, a koje su se zbog brzog rasta mogle plantažno gajiti.

Tako su (zahvaljujući kratkom periodu ophodnje od 10 do 20 godina), predstavnici roda topola (*Populus*) i njihovi mnogobrojni klonovi, danas među najčešće plantažno gajenim vrstama. Intezivnim naučnim istraživanjima na selekciji i genetskoj modifikaciji, omogućeno je da se topole danas u svetu gaje na oko 90 miliona hektara, pri čemu su oko 80 miliona hektara prirodna staništa topola, a oko 10 miliona hektara su veštačko podignuti zasadi. Eksploatacijom ovih zasada, u svetu se godišnje proizvede 70.350.000 m³ različitih proizvoda od drveta topole, od toga najviše furnirskih ploča - 42.919.000 m³, a najveći proizvođač je NR Kina koja godišnje proizvede 38.000.000 m³ topolovih furnirskih ploča (FAO 2012b).

Povećanjem iskorišćenja i plantažnim gajenjem delimično je rešeno pitanje nedostajućih količina sirovine, ali je za dalju ekspanziju drvne industrije bilo potrebno proširiti mogućnosti upotrebe proizvoda od drveta. Pored svojih brojnih prednosti (obnovljivost, laka obradivost, dobar odnos između težine i opterećenja koju može podneti, osećaj topline...), upotreba drveta je ograničena prvenstveno iz dva razloga:

- drvo je higroskopan materijal koji sa promenom temperature i relativne vlažnosti vazduha menja svoje dimenzije (uteže se ili bubri), pri čemu je ta promena različita u različitim anatomskim pravcima;
- drvo je podložno napadu gljiva i insekata usled čega većina vrsta ima malu trajnost ako se prethodno ne zaštiti hemijskim sredstvima.

Standardni način rešavanja problema promene dimenzija, podrazumeva da se rezana građa osuši do vlažnosti približne onoj koja će odgovarati uslovima eksploatacije proizvoda od drveta izrađenih iz te građe. Tako su proizvodi namenjeni za upotrebu u eksterijeru podrazumevali upotrebu vlažnije građe od proizvoda namenjenih za enterijer. Dodatna zaštita postizala se površinskom obradom, a izbor vrste i tipa premaza takođe je zavisio od namene proizvoda i uslova u kojima će se eksploatisati.

Može se reći da se pri upotrebi proizvoda odgovarajuće vlažnosti i tipa površinske obrade uglavnom može smanjiti problem promene dimenzija proizvoda u enterijeru. Kod eksterijera situacija je drugačija usled toga što su ovi proizvodi izloženi stalnim promenama vlažnosti i temperature koje ubrzavaju propadanje površinskih premaza, a zatim i samih proizvoda. Pri tome, vrlo često površinska obrada podrazumeva upotrebu toksičnih hemijskih preparata, pogotovo kada se želi postići i zaštita od ksilofagnih insekata i gljiva izazivača truleži. Kako je primena ovih preparata u suprotnosti sa zahtevima ekoloških pokreta, od osamdesetih godina prošlog veka traga se za ekološki prihvatljivim sredstvima i procesima koji će prevazići ove nedostatke.

Ove procese (koji menjaju prirodna svojstva drveta) nazivamo modifikacijama drveta. Hill (2006) ih je definisao na sledeći način: „Modifikacija drveta podrazumeva dejstvo hemijskog, biološkog ili fizičkog faktora na materijal, sa ciljem dobijanja željenog svojstva modifikovanog drveta tokom njegovog upotrebnog perioda“. Termička modifikacija drveta je upravo jedan takav postupak koji povećava otpornost drveta na dejstvo gljiva truležnica i ksilofagnih insekata. Pored toga, ispostavilo se da se termičkim tretmanima (usled smanjene higroskopnosti), može postići bolja dimenziona stabilnost tretiranog materijala, što je proširilo mogućnosti za njegovu upotrebu (Slika 1).

Osim što se termičkom modifikacijom postiže trajna promena svojstava tretiranog materijala, termička modifikacija u velikoj meri ispunjava i drugi deo Hilove definicije - koju treba posmatrati kao preporuku. U njoj se navodi da modifikovano drvo treba da bude netoksično tokom perioda eksploatacije, kao i da ne oslobađa toksične supstance na kraju upotrebnog ciklusa.



Slika 1. Upotreba termički modificiranog drveta u spoljašnjoj sredini (International ThermoWood Associations)

Upravo zbog toga što se pozitivne promene svojstava drveta postižu na ekološki prihvatljiv način, omogućen je razvoj industrijskih postrojenja za proizvodnju termički modificiranog drveta, kao i stvaranje tržišta za plasman ovih proizvoda.

2. PREDMET I CILJ RADA

Drvo topole najviše se koristi u industriji celuloze i papira kao i u proizvodnji furnira i furnirskih ploča. Pored lošijih fizičkih i mehaničkih svojstava u odnosu na tvrde lišćare, drvo topole uglavnom nema veliku estetsku vrednost, tako da se u proizvodnji nameštaja koristi za detalje koji se ne vide, ili se oblaže sečenim furnirom odnosno dekorativnim folijama.

Jedan od načina za povećanje vrednosti proizvoda od topole, mogao bi biti upotreba novih tehnologija kao što je termička modifikacija drveta. Pored povećanja trajnosti tretiranog materijala, termičkom modifikacijom se postiže i povećanje dimenzione stabilnosti. Treba imati u vidu da se termičkom modifikacijom drveta postiže i promena boje, što može dovesti do poboljšanja estetskih svojstva tretiranog drveta.

Za predmet istraživanja ove disertacije izabrano je ispitivanje mogućnosti primene termički modifikovanih listova topolovog furnira u proizvodnji furnirskih ploča, sa ciljem da se ustanovi da li se može dobiti proizvod koji je dimenzionalno stabilniji i estetski prihvatljiviji u odnosu na klasičnu topolovu furnirsku ploču, a koji će imati i zadovoljavajuća fizička i mehanička svojstva.

Kako je povećana dimenzionalna stabilnost termički modifikovanog drveta posledica smanjenja njegove higroskopnosti, jedna od mogućih primena ovakvog proizvoda bila bi upotreba u uslovima promenjive relativne vlažnosti vazduha i temperature. U uslovima povećane relativne vlažnosti vazduha, manja hidrofilitet termički tretiranih furnira treba da utiče na smanjenje bubrenja ploča, odnosno može se očekivati da će se smanjiti sile koje teže da odvoje pojedine listove u konstrukciji ploča. Na osnovu ovog, može se pretpostaviti da bi se uz upotrebu odgovarajućeg vodootpornog lepka dobile ploče povećane klase vodootpornosti.

Najčešći način proizvodnje vodootpornih ploča je pomoću melamin urea-formaldehidnog (MUF) lepka. Istraživanja u oblasti lepljenja termički modifikovanog drveta su pokazala da je hladno očvršćavajući MUF lepak pogodan za lepljenje termički modifikovanog drveta (Šernek et al. 2008 i Kariža 2011). Rezultati Sahin Kol et al. (2009),

nagoveštavaju da bi se i vruće očvršćavajući MUF lepak mogao koristiti za lepljenje termički modifikovanog drveta. Kako se hladno očvršćavajući lepkovi ne mogu koristiti u industrijskim uslovima (zbog dugotrajnog procesa presovanja), za izradu ploča od termički modifikovanog topolovog furnira izabran je vruće očvršćavajući MUF lepak.

Programom istraživanja je predviđeno ispitivanje ploča napravljenih od termički modifikovanih furnira i od kombinacije termički modifikovanog i nemodifikovanog topolovog furnira. Kombinovanjem tretiranih i netretiranih listova topolovog furnira, želi se utvrditi da li se povećanje dimenzione stabilnosti i vodootpornosti ploča može postići i korišćenjem termički modifikovanog furnira i u kolikoj meri primenjeni termički tretmani na listovima furnira utiču na promenu mehaničkih svojstava ploča.

Osnovni cilj ovog rada je:

ISTRAŽITI KAKO TERMIČKA MODIFIKACIJA TOPOLOVOG FURNIRA UTIČE NA PROMENU FIZIČKIH I MEHANIČKIH SVOJSTAVA FURNIRSKIH PLOČA PROIZVEDENIH OD OVOG MATERIJALA U INDUSTRIJSKIM USLOVIMA.

Analiza rezultata istraživanja treba da donese podatke o:

- uticaju termičkih tretmana na izjednačavanje boje. Prilikom ljuštenja većine vrsta topola dobija se furnir različite boje u zavisnosti da li je nastao iz zone beljike ili iz zone „lažne“ srčevine. Želi se utvrditi da li primenom termičkih tretmana dolazi do smanjenja ove razlike i da li postoje neki optimalni tretmani kod kojih je ovo smanjenje najveće;
- stepenu promene fizičkih i mehaničkih svojstava ploča izrađenih od termički tretiranih listova furnira. Treba utvrditi koje su to temperature optimalne za tretiranje topolovog furnira, odnosno kakva bi mogla biti namena proizvoda dobijenih od furnira tretiranog na različitim temperaturama;

- mogućnosti kombinovanja termički modifikovanog i nemodifikovanog topolovog furnira pri proizvodnji furnirskih ploča. Želi se ispitati kako učešće tretiranog furnira u konstrukciji ploče utiče na ispitivana svojstva i da li neke konstrukcije daju bolje rezultate od drugih;
- mogućnosti upotrebe vruće očvršćavajućeg MUF veziva za ovaj tip proizvoda. Da li će se zbog smanjenja broja slobodnih hidroksilnih grupa tretiranog materijala ostvariti slabija veza između pojedinih listova furnira, odnosno da li će različite konstrukcije ploča ostvariti i različiti kvalitet lepljene veze.

Osnovna hipoteza je da će termička modifikacija smanjiti hidrofилnost i higroskopnost topolovog furnira, te da će ovaj materijal biti pogodan za izradu furnirskih ploča poboljšane dimenzione stabilnosti i vodootpornosti.

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju prikazan je pregled dosadašnjih istraživanja značajnih za tematiku ovog rada. Prvi deo bavi se svojstvima drveta topole i topolove lažne srčevine, dok je u drugom delu obrađen istorijat nastanka termičkih tretmana, kao i njihov uticaj na svojstva i upotrebu tretiranog drveta.

3.1 Topole u Srbiji

Rod topola (*Populus*) pripada familiji Salicaceae (Slika 2). Rod obuhvata oko 160 vrsta rasprostranjenih u umerenim i hladnim područjima severne hemisfere. U Republici Srbiji spontano raste pet vrsta, a sreću se i introducirane vrste i mnogobrojni hibridi (Jovanović i Tucović 1972). U šumama Republike Srbije topole nastanjuju niže, uglavnom plavne terene oko rečnih vodotokova i prostiru se na površini od 48.000 ha. Sa zapremiskim učešćem od oko 7.800.000 m³, topole zauzimaju jedanaesto mesto sa 2,2% od ukupnog šumskog fonda. Od ukupne površine pod topolom, 35.600 ha zauzimaju veštački podignute sastojine uzgajane uglavnom u Vojvodini (Banković et al. 2009).



Slika 2. Bela topola (*Populus alba*) (FAO G. Montagna, P. Lassini)

Trenutno najzastupljenije vrste topola u Srbiji su *Populus x euramericana* 'I-214' i *Populus robusta*. Iako je klon 'I-214' visokoproduktivan, a drvo ovog klona je veoma kvalitetno i posebno traženo u proizvodnji furnira, pokazalo se da ga ozbiljno ugrožavaju bolesti drveća topola. Zato se u poslednje vreme najviše sade hibridi američke i domaće crne topole i to *Populus x euramericana* 'M-1', a sve više i klonovi *Populus deltoides* 'P-19/66' i *Populus deltoides* 'S 6-7' (Danilović 2005).

3.2 Svojstva drveta topole

Kao brzorastuće vrste, topole se odlikuju malom gustinom i slabijim mehaničkim svojstvima. Sklone su formiranju reakcionog (tenzionog) drveta, koje može da prouzrokuje deformisanje izrezanih sortimenata tokom procesa sušenja (Glavaški i Popadić 1997). Usled toga, izbegava se upotreba masivnog drveta topole u proizvodnji nameštaja, osim na onim mestima gde se ne zahteva velika nosivost tj. na mestima koja neće trpeti veća mehanička opterećenja tokom procesa eksploatacije.

Svojstva najznačajnijih evropskih vrsta iz prirodnih sastojina prikazane su u Tabeli 1. Pored ovih vrsta, danas u svetu postoji veliki broj klonova nastao ukrštanjem i selekcijom prvobitnih vrsta. Novija istraživanja iz ove oblasti (Fang i Jang 2003, Sykes et al. 2008...), uglavnom se bave proučavanjem prednosti i mana pojedinih klonova topole. Ova istraživanja su usmerena ka odabiru odgovarajućih klonova za pojedina područja, kako sa stanovišta otpornosti ka bolestima tokom rasta, tako i prema kvalitetu i količini drvne mase koja se dobija po postizanju zrelosti za seču.

3.2.1 Hemijski sastav

Ispitivanje hemijskog sastava klonova topole prvenstveno je bitno za industriju papira i celuloze. Na osnovu rezultata istraživanja donose se zaključci o svrsishodnosti uzgajanja pojedinih klonova, tj. na osnovu ovih podataka može se izračunati koliki će biti prinos celuloze, kakav bi se kvalitet papira mogao očekivati ili koliko je potrebno utrošiti hemikalija (koliki će biti troškovi proizvodnje) pri preradi pojedinih klonova.

Tabela 1. Svojstva najznačajnijih evropskih nemodifikovanih vrsta topola (Šumarska enciklopedija, 1963.)

	Trepetljika (Jasika) <i>P. tremula</i> L.	Bela topola <i>P. alba</i> L.	Siva topola <i>P. canescens</i> Smith	Crna topola <i>P. nigra</i> L.
Hemijski sastav	47,1% celuloze 27,5% pentozana 18,2% lignina 12,6% furfurola 2,9% smole voska i masti 0,3% pepela	-	-	47,4% celuloze 22,7% pentozana 2,6% heksozana 22,4% lignina 12,6% furfurola 2,6% smole voska i masti 1,4% proteina 8% pepela
Fizička svojstva	poroznost 70% $\rho_0 = 450 \text{ kg/m}^3$ $\rho_s = 810 \text{ kg/m}^3$ $\alpha_r = 3,5\%$ $\alpha_t = 8,5\%$ $\alpha_v = 12,8\%$	poroznost 69,5% $\rho_0 = 460 \text{ kg/m}^3$ $\rho_s = 950 \text{ kg/m}^3$ $\alpha_r = 4,1\%$ $\alpha_t = 9,8\%$ $\alpha_v = 14,5\%$	- $\rho_0 = 390 \text{ kg/m}^3$ - - - -	poroznost 72,7% $\rho_0 = 410 \text{ kg/m}^3$ $\rho_s = 900 \text{ kg/m}^3$ $\alpha_r = 5,2\%$ $\alpha_t = 8,3\%$ $\alpha_v = 14,3\%$
Mehanička svojstva	Napon na: pritisak 40 MPa savijanje 52 MPa smicanje 6,8 MPa udar 0,4 mkg/cm ² Em 7800 MPa tvrdoća 31 MPa	Napon na: pritisak 39 MPa savijanje 61 MPa - - - tvrdoća 33 MPa	Napon na: pritisak 71,4 MPa - - udar 0,63 mkg/cm ² Em 10700 MPa -	Napon na: pritisak 30 MPa savijanje 55 MPa smicanje 6,8 MPa udar 0,5 mkg/cm ² Em 8800 MPa tvrdoća 27 MPa

Istraživanja u ovoj oblasti pokazuju da postoji signifikantna razlika u hemijskom sastavu između različitih klonova topole. Ispitivanjem 40 različitih klonova topole *Populus deltoides* Bart., ustanovljeno je da prosečan sadržaj lignina iznosi 22,2% - sa varijacijom od 19,8% do 24,8%, prosečan sadržaj ekstraktivnih komponenti iznosi 2,2% (1,2% - 3,4%), a holoceluloze 75,3% (72,4% - 78,1%) (Klašnja et al. 2003). I ispitivanja koje su uradili Fang i Jang (2003) pokazuju da prosečan sadržaj celuloze između pojedinih klonova topole varira od 50,17% do 54,89%.

3.2.2 Fizička svojstva

Najčešće ispitivana fizička svojstva su gustina, promena dimenzija u pojedinim pravcima i određivanje tačke zasićenosti vlaknaca za pojedine klonove. Značajne podatke za često gajene vrste u našim područjima dao je Glavaški (1982) – Tabela 2, koji je na osnovu dobijenih podataka ustanovio je da postoje značajne razlike u svojstvima između vrste *Populus x euramericana* 'I-214' i druge dve ispitivane vrste.

Tabela 2. Fizička svojstva tri klona topole *Populus x euramericana* (Glavaški 1982)

	<i>Populus x euramericana</i> 'I-214'	<i>Populus x euramericana</i> 'Robusta'	<i>Populus x euramericana</i> 'Ostia'
Gustina ρ_0 (g/cm ³)	0,311	0,398	0,376
Radijalno bubrenje (%)	2,7	3,5	3,1
Tangen. bubrenje (%)	6,7	7,5	7,7
TZV (%)	33,6	32,6	32,3

U zavisnosti od vrste klona, ustanovljeno je da prosečna osnovna gustina „basic wood density“ (m_0/V_s), varira od 292 kg/m³ do 429 kg/m³ (Klašnja et al. 2003), od 374 kg/m³ do 400 kg/m³ (Fang i Jang 2003), odnosno od 324,3 kg/m³ do 346,8kg/m³ (Zhang et al. 2012). Da postoji razlika u utezanju različitih klonova topole ustanovili su Peters et al. (2002). U zavisnosti od klona, istraživači su zaključili da ukupno aksijalno utezanje iznosi od 0,131% do 0,521%, radijalno od 3,17% do 4,30%, a tangencijalno od 6,64% do 9,11%.

3.2.3 Mehanička svojstva

Istraživanja u ovoj oblasti pokazala su da postoji značajna razlika u mehaničkim svojstvima između različitih klonova topole (Peters et al. 2002), različitih vrsta topola (Zhang et al. 2012), između normalnog i tenzionog drveta topole (Coutand et al. 2004), kao i između prirodnih vrsta i njihovih klonova (Bjurhager et al. 2008). Istraživanjima je, takođe, ustanovljeno da mehanička svojstva rastu od srca prema periferiji stabla (Bjurhager et al. 2008).

Vrednosti nekih mehaničkih svojstava (pri vlažnosti od 12%), za tri klona topole *Populus x euramericana* prikazane su u Tabeli 3. I kod mehaničkih svojstava ustanovljena je značajna razlika klona 'I-214' u odnosu na druga dva klona (Glavaški 1982).

Tabela 3. Mehanička svojstva tri klona topole *Populus x euramericana* (Glavaški 1982)

	<i>Populus x euramericana</i> 'I-214'	<i>Populus x euramericana</i> 'Robusta'	<i>Populus x euramericana</i> 'Ostia'
Savojna čvrstoća σ_s (MPa)	39,83	47,21	51,01
Pritisna čvrstoća paralelno sa vlakancima σ_p (MPa)	27,69	32,02	31,75
Modul elastičnosti pri savijanju E_m (MPa)	6163	7694	7698

Prema istraživanjima Aydin et al. (2007), vrednosti mehaničkih svojstva topolovog drveta pri 16% vlažnosti su: napon na pritisak paralelno sa vlakancima 18,2 MPa; poprečno na vlakanca 1,9 MPa; modul elastičnosti pri pritiskanju paralelno sa vlakancima 5860 MPa; savojna čvrstoća paralelno sa vlakancima 2,2 MPa; upravo na vlakanca 40,2 MPa; modul elastičnosti pri savijanju upravo na vlakanca 3783 MPa.

3.3 Nastanak i svojstva lažnog srca topole

Topole su jedričave vrste kod kojih postoji razlika u boji između centralnog (tamnijeg) i perifernog (svetlijeg) dela stabla. Izuzetak je vrsta *Populus tremula* – trepetljika, koja spada u bakuljave vrste. Kod svih ostalih vrsta ova razlika je prisutna, ali ne razvijaju sve vrste pravu srčevinu. Kod vrsta poput *Populus alba* i *Populus cilita*, do promene boje centralnog dela dolazi usled lučenja gumoznih materija u određenoj fazi rasta, te se one klasifikuju kao jedričave vrste. Većina drugih vrsta (u koje spadaju i evroameričke topole), imaju tamniji centralni deo koji se odlikuje i povećanim sadržajem vlage. Kako ova promena nije praćena formiranjem tila i ne poklapa se sa linijom godova, kod ovih vrsta govorimo o lažnoj ili mokroj srčevini (eng. *wetwood*).

Razloge nastanka mokre srži većina autora dovodi u vezu sa bakterijskom infekcijom. Do stvaranja mokre srži dolazi usled dejstva bakterija koje ubrzavaju ili prouzrokuju smrt parenhimatičnih ćelija u unutrašnjosti stabla. Ove bakterije su najverovatnije u malom broju prisutne u živim delovima beljike, ali nisu u stanju da napadnu žive ćelije i da se namnože sve dok živa ćelija ne odumre. Neprijatni miris i proizvodnja gasa najverovatnije nastaju usled dejstva sekundarnih bakterija (Hartley et al. 1961).

Seliskar (1952) i Carter (1945) su uspeli da proizvedu mokru srž kod mladih stabala zarazivši ih bakterijama izdvojenim iz mokre srži starijih stabala i da potom kod zaraženih stabala ponovo izdvoje unete kulture bakterija. Da mokru srž prouzrokuju bakterije zaključili su i Xiaomei et al. (1993), izdvojivši iz klona *Populus deltoides* I-69 pet vrsta bakterija (*Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*, *E. rhapontioi* (Millard) Burkhold, *E. chrysanthemi* Burkholder, *Bacillus cereus* Frankland, *B. sphaericus* Neidehave).

Suprotnog mišljenja su Dapeng-a et al. (1998). Oni su zaključili da je za pojavu mokre srži i destrukciju membrana jamica odgovorna gljiva *Fusarium proliferatum* (Matsushima) Nirenberg. Ovu gljivu su istraživači izdvojili iz stabla i korena preko 20 vrsta topola. Istraživači su zaključili da ova gljiva ima snažna patogena dejstva i da značajno utiče na prouzrokovanje mokre srži kod topola.

Hemijski sastav mokre srži razlikuje se od hemijskog sastava beljike drveta topole. Mokra srž ima veću pH vrednost, veći sadržaj ekstraktivnih komponenti i pepela, dok je sadržaj hemiceluloze i celuloze nešto manji (Xiaomei et al. 1993). Sadržaj lignina po visini stabala se ne razlikuje, ali postoji signifikantna razlika u sadržaju lignina po poprečnom preseku i on opada od srca (27,8%) ka periferiji (20,9%) (Sykes et al. 2008). Neprijatan miris je često povezan sa mokrom srži kod topola. Analize ovog gasa pokazale su da je sadržaj metana u njemu oko 50% (Bushong 1907).

Fizička svojstva drveta topole razlikuju se od srca ka periferiji. Postoji opšti trend povećanja gustine i utezanja kako od srca ka periferiji tako i od osnove ka vrhu stabla (Kord et al. 2010). Prema Wallinu (1954), prosečan sadržaj vlage u mokroj srčevini topole iznosi 186%, dok je taj sadržaj u beljici oko 122%.

Mehanička svojstva mokre srži lošija su od svojstava beljike. Prosečna vrednost savojne čvrstoće i modula elastičnosti beljike je za 5,7% odnosno 12,2% veća od prosečnih vrednosti izmerenih kod srčike (Aydin et al. 2007). Čvrstoća na pritisak paralelno sa vlakancima je za 10 do 37% manja kod mokre srži u odnosu na beljiku, a tvrdoća za 27 do 55% (Clausen i Kaufert 1952). Ovo potvrđuju i istraživanja Glavaškog (1982), koji je zapazio da su mehanička svojstva epruveta iz obojenog dela klonova topole lošija od svojstava epruveta iz beljike.

Pored lošijih mehaničkih svojstava, mokra srž može stvoriti i probleme tokom transporta, sušenja i kod upotrebe gotovog proizvoda. Prevelika masa trupaca sa mokrom srži može dovesti do potapanja trupaca prilikom mokrog čuvanja ili tokom transporta vodom, a neravnomerno osušen furnir koji sadrži mokru srž može izazvati probleme tokom lepljenja.

Prema navodima Danilovića (2000), mokra srž utiče na vrednosnu sortimentnu strukturu. On je koristeći nacionalni standard za kvalitet (JUS) ustanovio da je ova greška treća po značajnosti (posle kvrga i koničnosti), prilikom kvalitativne podele topolovih stabala. U cilju što boljeg vrednosnog iskorišćenja, treba znati da učešće mokre srži opada sa visinom stabla, a povećava se sa povećanjem prsnog prečnika (Johanssona i Hjelma 2013, Ullah 2012).

3.4 Termički modifikovano drvo

3.4.1 Istorijat termičke modifikacije drveta

Da se svojstva drveta mogu poboljšati termičkom obradom, ljudima je poznato hiljadama godina unazad. Da bi povećali trajnost, ljudi su nagorevali drvo pre nego što bi ga upotreбили u spoljašnjoj sredini. Rowell et al. (2009) navodi da su Saami u Severnoj Švedskoj još pre 5200 godina koristili toplotu za savijanje drvenih skija. Prema hijeroglifskim slikama, Egipćani su između 2500-te i 3000-te godine pre nove ere, koristili metod zagrevanja drveta za izradu savijenih delova za stolice, za izradu lukova i bačvi. Vikinzi su u XI veku takođe zagrevali drvo pri izradi svojih brodova, a u Norveškoj su pri izradi crkvi velike grede savijali zagrevanjem i zatim spajali (Rowell et al. 2009).

Naučna istraživanja uticaja temperature na svojstva drveta počela su s početkom dvadesetog veka. Tako Manoj (2010) navodi da je Tiemann 1917. bio među prvim naučnicima koji su proučavali toplotne tretmane i koji je primetio da pri zagrevanju drveta pregrejanom parom dolazi do smanjenja higroskopnosti i do blagog smanjenja čvrstoće. Prema Manoj, prvi koji se ozbiljno posvetio izučavanju metoda za modifikaciju drveta (uključujući i termičku) bio je dr Alfred J. Stamm radeći u Forest Products Laboratory u Madisonu. On je 1916. godine objavio izveštaj u kome je spomenuo značajno smanjenje higroskopnosti drveta crnog kaučuka (*black gum*) posle zagrevanja suvim vazduhom na 205 °C u trajanju od 6 h.

U kasnijim istraživanjima Stamm (1956) je zaključio da je degradacija drveta veća ako se ono zagreva u zatvorenom sistemu. Takođe je ustanovio da veća degradacija drveta nastaje u prisustvu vazduha usled oksidacije prouzrokovane atmosferskim kiseonikom. Na osnovu toga je zaključio da je odsustvo kiseonika neophodno ukoliko se termičkom modifikacijom želi proizvesti stabilan proizvod sa pristojnim mehaničkim svojstvima.

Prema Sundqvist-u (2004), u periodu od 1950. do 1970. godine glavna izučavanja uticaja termičkih tretmana na svojstva drveta rađena su u Nemačkoj. Vršena su ispitivanja otpornosti termički modifikovanog drveta na dejstvo gljiva truležnica, određivan je uticaj termičke modifikacije na sorpciona svojstva, degradaciju i mehanička svojstva tretiranog materijala. Takođe, ispitivan je i uticaj termičkih tretmana na svojstva drveta pri visokom pritisku u zatvorenim sistemima.

Od 80-tih godina XX veka, pojavljuju se prvi komercijalni proizvodi nastali termičkom modifikacijom drveta. U zavisnosti od načina proizvodnje i zemlje porekla, ovi proizvodi se mogu naći pod različitim imenima. Na tržištu su se pojavili Staypak i Staybwood iz SAD, Lignoston, Lignofol i Oil heat treated (OHT) iz Nemačke, Jicwood i Jablo iz Engleske, Thermowood iz Finske, Plato proces iz Holandije, Perdure iz Kanade i New option Wood/Retification iz Francuske (Hill 2006).

3.4.2 Najznačajniji procesi proizvodnje termički modificiranog drveta

3.4.2.1 Plato proces

Plato proces modifikacije drveta sprovodi se u relativno blagim uslovima (ispod 200 °C). Tokom procesa razlikuju se dve glavne faze – termička modifikacije vlažnog i termička modifikacija suvog drveta. Glavne hemijske reakcije odigravaju se za vreme vlažnog termičkog tretmana, tokom kojeg se komponente građe drveta aktiviraju na relativno niskim temperaturama. Umerene temperature termičke modifikacije koriste se u cilju smanjenja negativnih efekata, pri čemu se želi držati pod kontrolom stepen degradacije hemiceluloza (Xie et al. 2002).

Zanimljivo je da je proces nastao na bazi rezultata istraživanja koje je sprovodio H. Ruyter (1989. god.), u Shell-ovoj laboratoriji u Amsterdamu, istražujući mogućnost dobijanja goriva i hemikalija iz obnovljivih izvora. Ova istraživanja su podrazumevala termičke tretmane pri visokim pritiscima i temperaturama, a kao sporedni rezultat istraživanja nastao je novi način modifikacije drveta (www.platowood.nl)

Ovaj proces je kasnije unapređen i optimiziran u cilju omogućavanja industrijske proizvodnje, a prvo postrojenje za proizvodnju po ovom postupku, otvoreno je 2000. godine. Današnji proces proizvodnje podrazumeva pet različitih faza:

1. Predsušenje u konvencionalnim sušarama do vlažnosti od 14-18%;
2. Faza hidrotermolize u kojoj se drvo zagreva na 150-180 °C u nerđajućem čeličnom reaktoru (Slika 3). Ova faza se odigrava u vlažnoj sredini i pod pritiskom većim od atmosferskog, a podrazumeva upotrebu zasićene vodene pare kao medijuma za zagrevanje;
3. Faza sušenja u konvencionalnim sušarama pomoću standardnog režima na vlažnost drveta od 8-9%;
4. Faza modifikacije suvog drveta. U ovoj fazi se drvo još jednom zagreva na temperaturu od 150-190 °C, ali u suvim uslovima i pri atmosferskom pritisku;
5. Faza kondicioniranja pomoću zasićene vodene pare, do vlažnosti drveta od 4-6%.



Slika 3. Komora za vlažnu fazu termičke modifikacije izrađena od nerđajućeg čelika (Plato international)

Od 2001. god. ovaj proces modifikacije se komercijalno koristi pod imenom Plato®WOOD. Kompanija proizvodi drvo pogodno za upotrebu u spoljašnjim uslovima, za bašte, fasade zgrada itd. (Slika 4)



Slika 4. Upotreba termički modifikovanog drveta po Plato procesu za fasadu zgrada (Plato international)

3.4.2.2 Oil Heat Treatment (OHT)

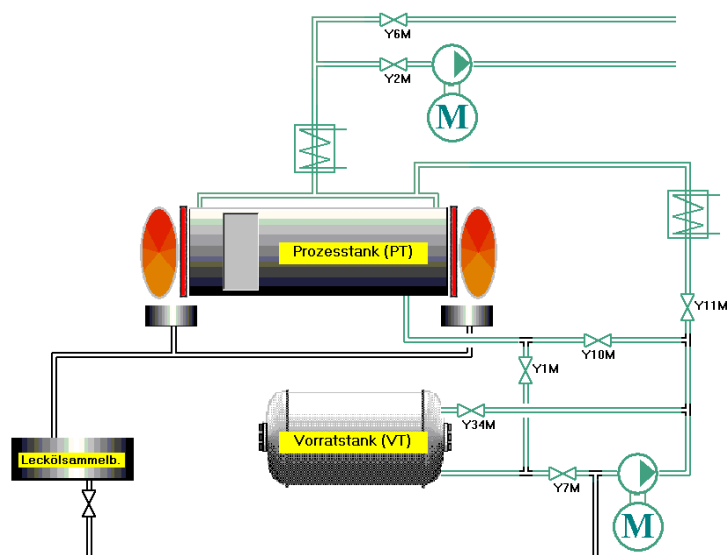
Specifičnost OHT procesa proizvodnje termički modifikovanog drveta je u tome što se kao medijum za zagrevanje ne koristi topao vazduh, već ulje. Prema Manoju (2010) prvi koji su proučavali mogućnost upotrebe tečnog medijuma za termičku modifikaciju drveta

bili su Stamm, Burr i Kline (1946). Oni su drvo tretirali u tečnom metalu na temperaturama od 160-320 °C i dobili su proizvod bolje dimenzionalne stabilnosti koji su nazvali Staybwood.

Kako se termička modifikacija drveta najčešće odvija na temperaturama do 260 °C, moguće je upotrebiti prirodna ulja kao medijum za zagrevanje. Tačka ključanja mnogih prirodnih ulja (ulje iz repice, laneno, suncokretovo) je viša od potrebnih za termičku modifikaciju.

Prednosti upotrebe ulja pri termičkoj modifikaciji su u brzini i ravnomernom zagrevanju tretiranog materijala, kao i u nemogućnosti kontakta tretiranog materijala sa kiseonikom iz vazduha. Mane ovog procesa su u tome što drvo tokom modifikacije upija veliku količinu ulja usled čega mu se masa povećava za 50-70% i što određene vrste ulja imaju neprijatan miris (Rapp i Sailer 2000).

Na osnovu pozitivnih rezultata istraživanja primene OHT procesa termičke modifikacije drveta, u avgustu 2000. godine u nemačkom gradu Reulbach-u konstruisana je fabrika kapaciteta od 2.900 m³/god. Princip rada ovog postrojenja kompanije MENZ HOLZ prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Šema rada fabrike za modifikaciju drveta po OHT procesu (MENZ HOLZ Germany)

Princip rada je takav da se proces modifikacije odvija u zatvorenom postrojenju (PT). Nakon što se postrojenje PT napuni građom, vrelo ulje se upumpava iz rezervoara (VT). Ono zatim konstantno cirkuliše oko građe, pri čemu se održava željena temperatura. Po završetku procesa modifikacije, pre otvaranja postrojenja PT, preostalo vrelo ulje se ispumpava i ponovo skladišti u rezervoar VT.

Za termičke tretmane moraju se birati ulja sa većom tačkom ključanja od one zahtevane tretmanom. Izbor ulja mora biti takav da odgovara krajnjoj upotrebi tretiranog proizvoda, jer u zavisnosti od krajnje namene, drvo se tretira na različitim temperaturama. Tokom tretmana (usled isparavanja) ulje postaje gušće i menja mu se boja zbog mešanja sa razgradivim komponentama drveta.

Prema navodima kompanije MENZ HOLZ, najbolja mehanička svojstva i maksimalna trajnost postiže se pri tretmanu na temperaturama od 180-220 °C. Ukupno vreme jednog ciklusa termičke modifikacije (sa fazama zagrevanja i hlađenja), za građu dužine od 4 m i debljine 10 cm iznosi 18 h.

3.4.2.3 Retifikacija

U Francuskoj su razvijena dva procesa modifikacije drveta – Retifikacija i Le Bois Perdure. Proces retifikacije (*Retified Wood*) odvija se u zatvorenim komorama gde se građa vlažnosti oko 12% termički tretira na temperaturama od 210 do 240 °C. Kao zaštitni gas, koji sprečava paljenje tretiranog materijala, koristi se azot, a koncentracija kiseonika u komori ne sme biti veća od 2% (Xie et al. 2002).

Ime retifikacija nastalo je kao složenica od reči retikulacija i torifikacija. Torifikacija drveta predstavlja proces umerene pirolize na temperaturama između 200 i 320 °C, a retikulacija označava proces umrežavanja molekula lignina sa međuproduktima razlaganja molekula hemiceluloze tokom termičke modifikacije drveta. Industrijsku proizvodnju ovog materijala započela je kompanija NOW (New Option Wood) od 1997. god. (Slika 6).

Za razliku od procesa retifikacije, Le Bois Perdure proces dozvoljava i upotrebu vlažnog drveta. Prvi korak pri modifikaciji drveta ovom metodom je postepeno sušenje drveta, a zatim se modifikacija vrši na temperaturi od 230 °C uz prisustvo vodene pare kao zaštitnog sredstva – vodena para nastaje iz vode u drvetu (Xie et al. 2002).

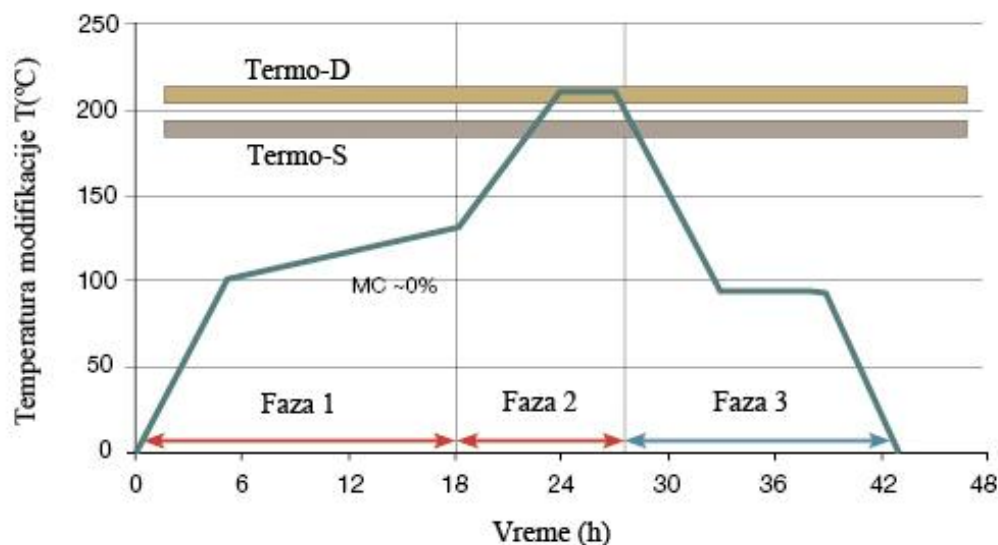


Slika 6. Primena modifikovanog drveta pomoću procesa retifikacije u enterijeru (levo); Primena u eksterijeru (desno) (retiwood.com)

3.4.2.4 Thermowood proces

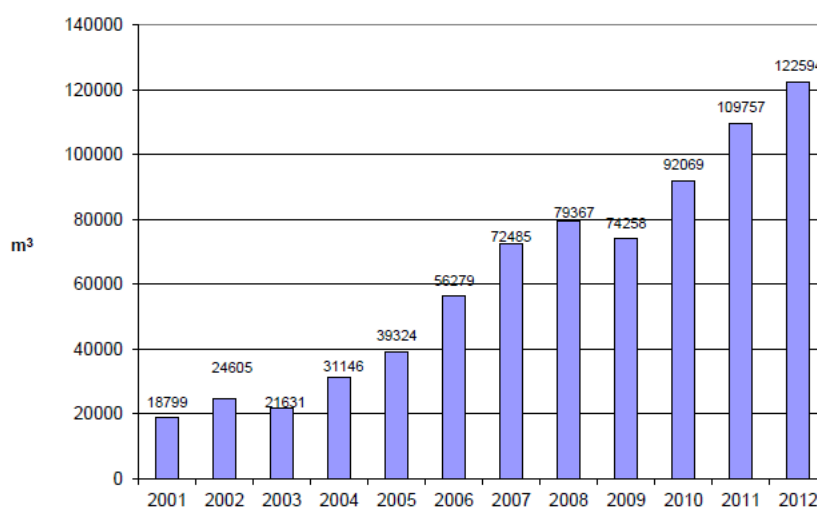
Ovaj proces se razlikuje od prethodnih po tome što se kao grejni medijum koristi prezasićena vodena para koja ujedno služi i kao zaštitno sredstvo protiv paljenja tretiranog materijala. Proces su patentirali Viitaniemi et al. (1994) i danas je ovaj način modifikacije drveta najzastupljeniji u Evropi. Sam proces se sastoji iz tri faze (Slika 7): 1) Faza zagrevanja i sušenja drveta; 2) Faza termičke modifikacije; 3) Faza hlađenja.

U prvoj fazi se temperatura naglo diže do 100 °C, a zatim se postepeno podiže do 130 °C kako bi se tretirano drvo osušilo na blizu 0% vlažnosti. Po završetku faze visokotemperaturnog sušenja, temperatura se u drugoj fazi podiže na željenu temperaturu modifikacije (185-215 °C). U završnoj fazi temperatura se spušta pomoću raspršavanja vode na 80-90 °C, pri čemu se sadržaj vlage tretiranog materijala povećava na 4-7% (ThermoWood handbook 2003).



Slika 7. Faze termičke modifikacije po finskom Thermowood procesu (Thermo Wood brochure)

U zavisnosti da li su korišćene više ili niže temperature tokom faze termičke modifikacije, razlikuju se dve klase kvaliteta gotovih proizvoda: Thermo-S (stability) i Thermo-D (durability). Prema podacima finskog udruženja proizvođača termodrveta (*Finnish ThermoWood Association*) osnovanog 2000. godine, proizvodnja i prodaja termički modifikovanog drveta se konstantno povećava (Slika 8). Prema podacima ovog udruženja vrste koje se najviše koriste za termičku modifikaciju po ovom procesu su: bor, smrča, breza i jasika.

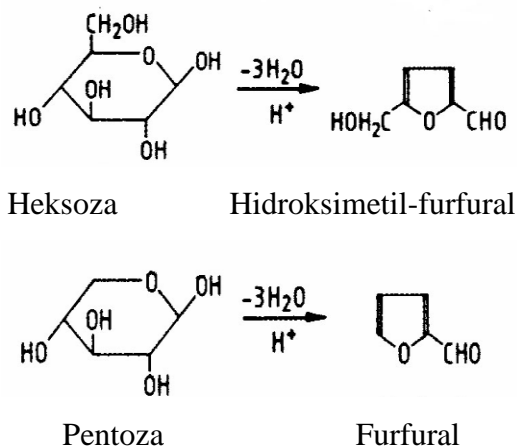


Slika 8. Prodaja termički modifikovanog drveta proizvedenog po Thermowood tehnološkom procesu (*Finnish ThermoWood Association*)

3.4.3 Uticaj termičke modifikacije na svojstva tretiranog drveta

3.4.3.1 Hemijske promene

Termički tretmani prouzrokuju degradaciju polimera unutar ćelijskog zida, prvenstveno hemiceluloza, a u kasnijim fazama i celuloze. Tokom degradacije nastaju furanska jedinjenja kao što su furfural i hidroksimetil furfural (Slika 9).

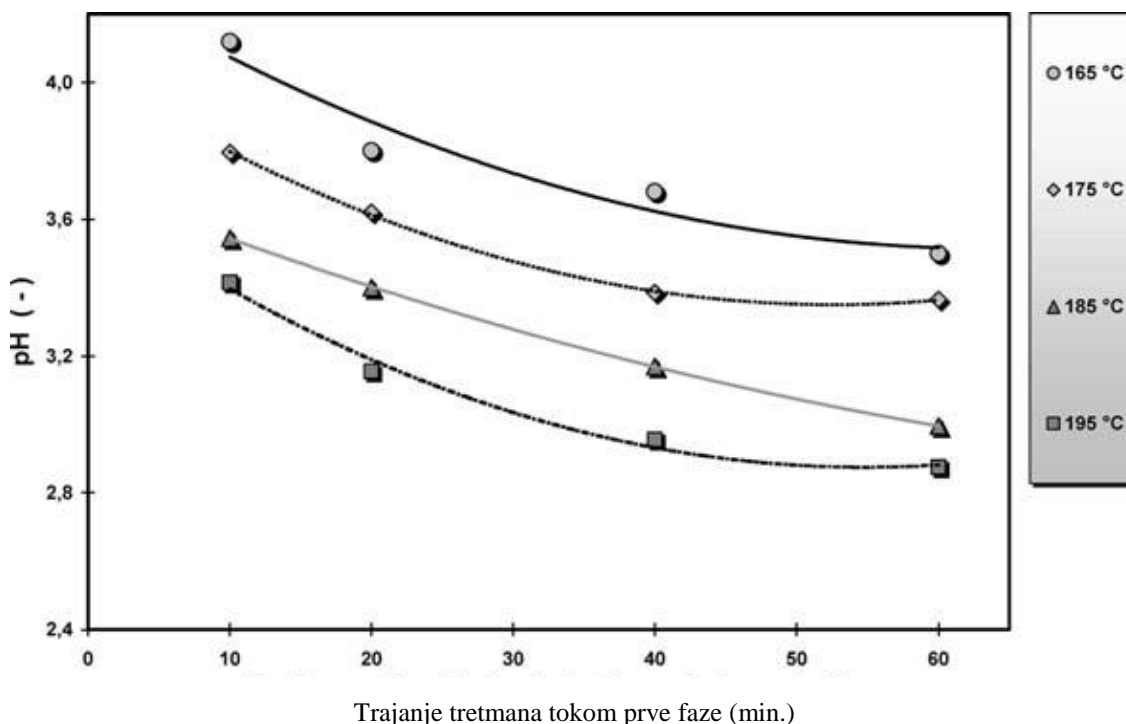


Slika 9. Formiranje furanskih jedinjenja iz heksoza i pentoza kao posledica termičkog tretmana (Rowell et al. 2009)

Tokom termičkih tretmana odigravaju se autokatalitičke reakcija konstituenata zidova drvnih ćelija. Kao rezultat razgradnje acetilnih grupa i to prvenstveno acetilnih grupa hemiceluloza, formiraju se organske kiseline (uglavnom sirćetna). U zavisnosti od koncentracije kiselina i primenjene temperature, doći će do hidrolize hemiceluloza (kao najreaktivnije komponente) i pri tom će nastati furfural i hidroksimetilfurfural. Na visokim temperaturama dolazi i do razgradnje veza unutar ligninskog kompleksa, rezultujući većom koncentracijom fenolnih grupa. Ova faza povećane reaktivnosti lignina, odlikuje se stvaranjem raznih kondenzacionih reakcija između aldehida i lignina, kao i autokondenzacijom lignina (Tjeerdsma et al. 2005).

Hemijska analiza produkata prve i druge faze "Plato" procesa termičke modifikacije drveta, pokazala je da i primenjena temperatura i dužina tretmana utiču na povećanje kiselosti nastalih fluida (Slika 10). Na osnovu izgleda dobijenih krivih, utvrđeno je da primenjena temperatura ima značajan uticaj na stepen oslobađanje kiselina. Ovo je vrlo bitno, jer količina nastalih organskih kiselina utiče na kasniju depolimerizaciju

ugljenohidrata. Analizom pomoću FTIR spektroskopije, potvrđeno je da su posle prve faze, na temperaturi od 185 °C, skoro sve slobodne acetilne grupe razgrađene, dok je na temperaturi od 165 °C razgrađen jedan deo acetilnih grupa (Tjeerdsma et al. 2005).



Slika 10. Uticaj temperature i trajanja prve faze termičkog tretmana na PH vrednost belog bora (Tjeerdsma et al. 2005)

Daljom analizom, autori su utvrdili da se na visokim temperaturama smanjuje koncentracija slobodnih hidroksidnih grupa, kao i da u toku druge faze procesa dolazi do reakcija esterifikacije. Formirani estri su uglavnom bili povezani sa ligninskim kompleksom. Iako esterifikacija hidroksilnih grupa umanjuje higroskopnost drveta, istraživači pretpostavljaju da glavni uticaj na smanjenje higroskopnosti ima unakrsno povezivanje, za koje se zna da nastaje tokom termičkih tretmana. Ovo istraživanje se u potpunosti nadovezuje na ranija istraživanja (Tjeerdsma et al. 1998) i potvrdilo je sve ranije pretpostavke ovih autora.

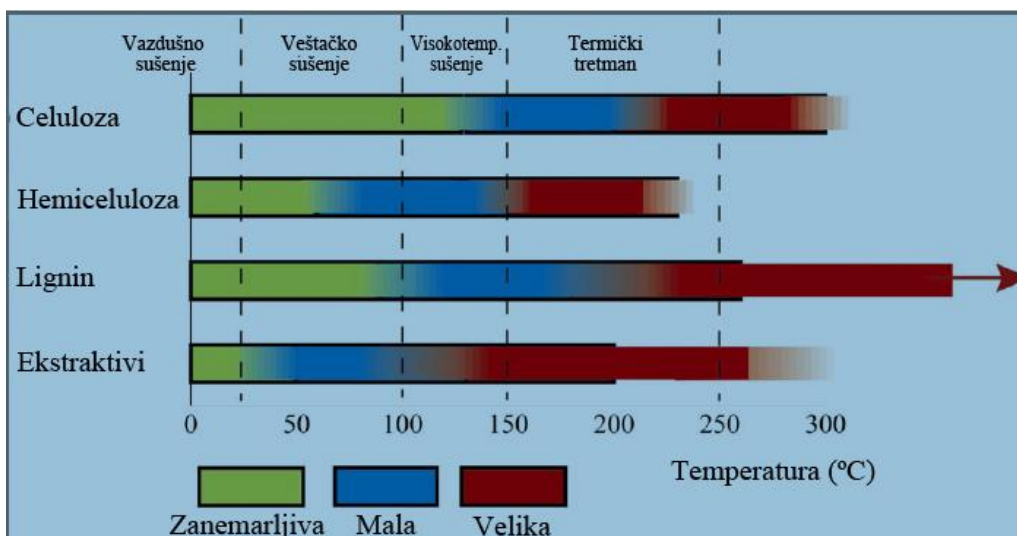
Daljim ispitivanjem hemijskih promena tokom dvofazne termičke modifikacije, Boonstra i Tjeerdsma (2006a) su zaključili da do smanjenja higroskopnosti drveta tokom termičkih tretmana dolazi usled:

- depolimerizacije ugljenih hidrata (naročito hemiceluloza) što rezultuje smanjenjem broja slobodnih hidroksilnih grupa;
- povećanja udela kristaltnog područja u celulozi u kojem hidroksilne grupe nisu lako dostupne;
- daljeg umrežavanja lignina, čime se smanjuje dostupnost hidroksilnih grupa.

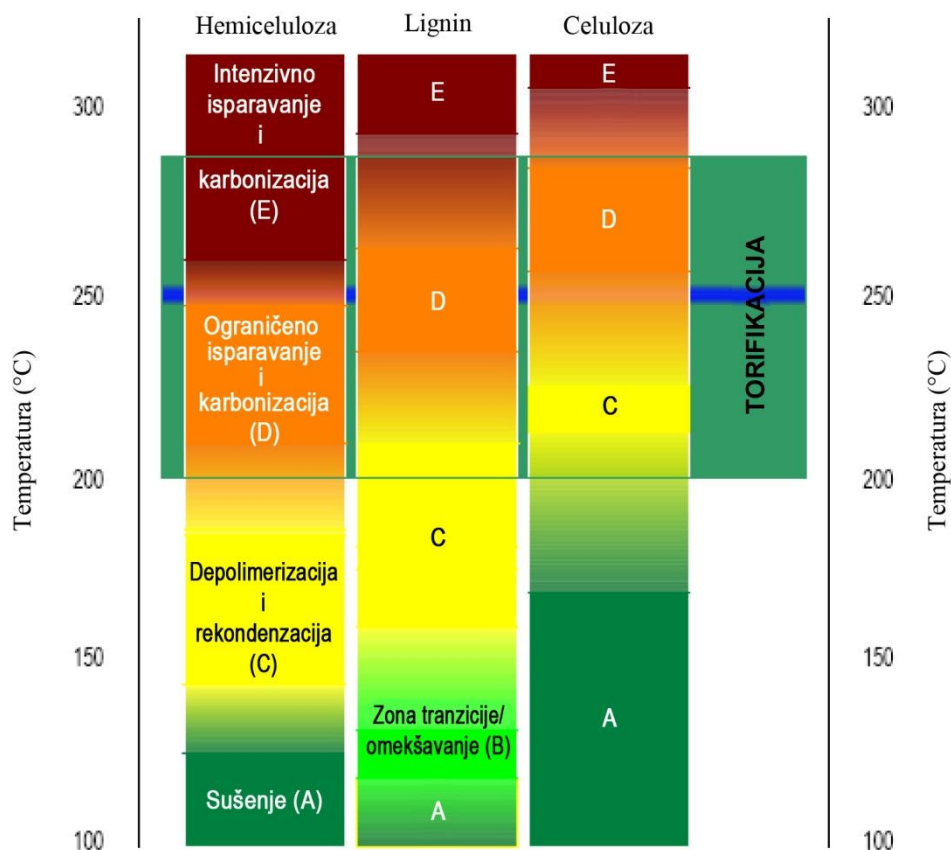
Ispitivanjem uticaja termičkih tretmana na promenu hemijskih komponenata tretiranog drveta bavili su se i Windeisen et al. (2007). Njihovo istraživanje je pokazalo da termički tretmani utiču na dekompoziciju konstituenata drveta, što se reflektuje na povećanje sadržaja ekstraktivnih komponenti pri korišćenju organskih rastvarača. Kristaltna područja celuloze pokazala su se mnogo otpornija na dejstvo termičkih tretmana u odnosu na hemiceluloze. Do sličnih zaključaka došli su Alen et al. (2002). Oni su ustanovili da se ukupni gubitak polisaharida može povezati sa ukupnim gubitkom mase tretiranog drveta i da se tokom termičkih tretmana najviše razlažu hemiceluloze, a zatim celuloza dok je lignin najotporniji. Suprotnog su mišljenja Andersons et al. (2009), koji su pomoću FTIR i TGA analize došli do podataka da se učešće hemiceluloze i lignina smanjuje sa povećanjem temperature termičkog tretmana, dok se relativno učešće celuloze povećava.

Prema Sundqvist (2004) temperature ispod 100 °C utiču uglavnom na sadržaj ekstraktivnih komponenti i delimično na hemiceluloze (Slika 11). Tek na temperaturama iznad 150 °C dolazi do značajnog razlaganja hemiceluloza, pa se ova temperatura uzima kao početna za termičku modifikaciju drveta. Značajnije promene u sadržaju lignina i celuloze počinju na temperaturama od 200-220 °C.

Do nešto drugačijih zaključaka o uticaju temperature na sadržaj hemiceluloza, lignina i celuloze može se doći na osnovu grafika po Bergmanu (2005) - Slika 12. Prema ovom grafiku, hemiceluloze su nešto otpornije na dejstvo toplote, tako da početne promene počinju tek na oko 120-130 °C, a intenzivno razlaganje na temperaturama preko 250 °C (kad je po Sundqvist razlaganje hemiceluloza završeno). Takođe, ovaj grafik ukazuje na to da temperature od 100-150 °C utiču na lignin tako što ga omekšavaju, a da početno razlaganje i umrežavanje novonastalih produkata počinje od 150 °C.



Slika 11. Promena komponenti drveta usled termičkih tretmana/sušenja (Sundqvist 2004)



Slika 12. Glavne fizičko-hemijske promene osnovnih konstituenata drveta pod uticajem temperature (Bergman 2005)

Termički tretmani utiču i na stepen kristalčnosti celuloze. Udeo kristaltnosti celuloze (u odnosu na celulozu iz amornog regiona), raste u početku termičkog tretmana, a sa produžetkom tretmana kristalčnost opada. Povećanje kristalčnosti objašnjava se

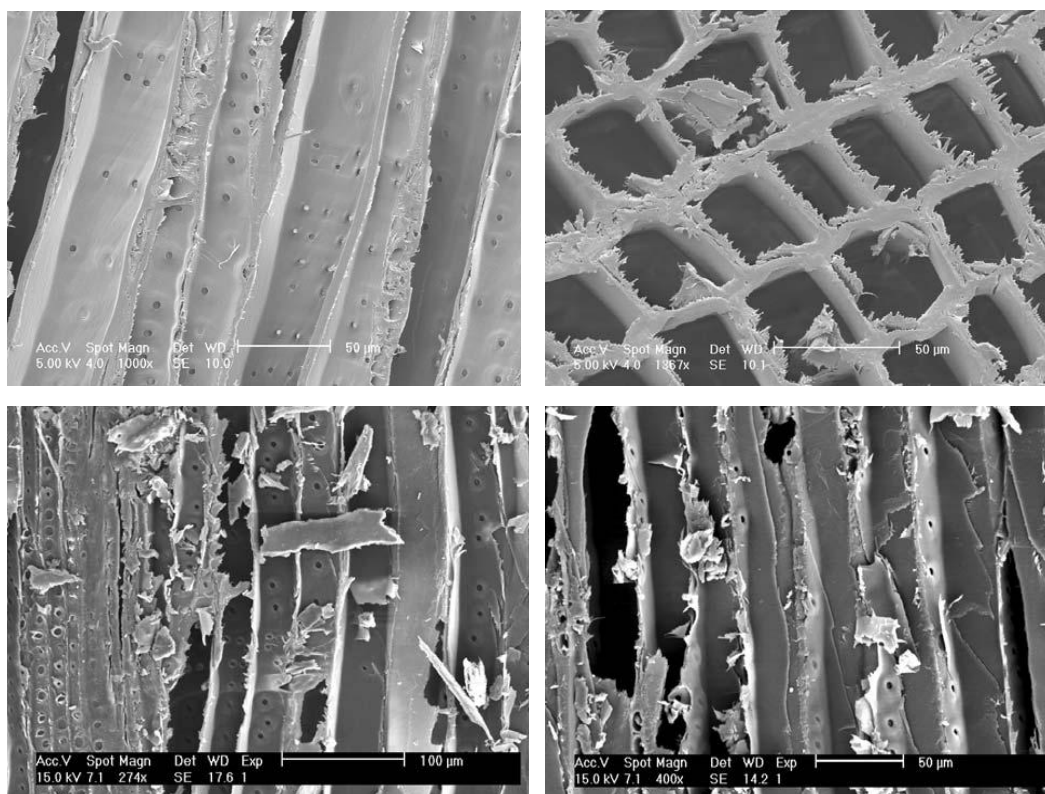
reorganizacijom i reorijentacijom molekula celuloze u amorfnom regionu. U toku kasnijih faza termičkog tretmana, dolazi do procesa depolimerizacije koji se dešava i u amorfnom i u kristalnom regionu celuloze, usled čega se smanjuje kristaličnost (Bhuiyan et al. 2000). Istraživači pretpostavljaju da prisustvo vode, odnosno vodena para, omogućuje lakšu kristalizaciju u amorfnim regionima i time objašnjavaju veću kristalizaciju kod tretmana sa prisustvom vode u odnosu na one bez prisustva vode.

U kasnijim istraživanjima Bhuiyan i Hirai (2001) su ustanovili da na stepen kristaličnosti utiče i da li se termički tretman vrši tokom neprekidnog procesa ili iz više delova. Rezultati eksperimenta su pokazali da se kod tretmana sa prekidima postiže manji stepen kristaličnosti nego kod neprekidnih, te da će na kristaličnost uticati dužina prvog tretmana kao i temperatura na kojoj se uzorci hlade pre sledećeg termičkog ciklusa.

3.4.3.2 Anatomske promene

Pored hemijskih promena tokom termičkih tretmana, dešavaju se i anatomske promene tretiranih uzoraka. Awoyemi i Jones (2010) su proučavali uticaj termičkih tretmana na anatomske promene crvenog kedra (*Thuja plicata*). Uzorke ovog drveta termički su tretirali na temperaturi od 220 °C u trajanju od 1 h i 2 h. Iz ovako tretiranog materijala uzeti su uzorci za analizu na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM) i upoređeni su sa uzorcima netretiranog drveta (Slika 13).

Rezultati njihovog istraživanja su pokazali da termički tretmani utiču na smanjenje: gustine, zapreminskog bubrenja, apsorpcije vode i savojne čvrstoće. Poredeći SEM fotografije tretiranog i netretiranog drveta, došli su do zaključka da su termički tretmani prouzrokovali destrukciju zidova traheida i sržnih zraka kao i da je došlo do povećanja prečnika jamica crvenog kedra. Ove promene, zajedno sa hemijskim promenama, objašnjavaju zašto termički tretmani utiču na smanjenje gustine, zapreminskog bubrenja i savojne čvrstoće. Rezultati istraživanja pokazali su da se tokom termičkih tretmana smanjuje i apsorpcija vode tretiranog drveta. Kako je ovo u suprotnosti sa povećanjem prečnika jamica (što bi trebalo da poveća permeabilnost tretiranog materijala), autori su zaključili da efekti hemijskih promena prevazilaze one nastale anatomskim promenama.



Slika 13. SEM snimci uzdužnog (gore levo) i poprečnog preseka (gore desno) traheida crvenog kedra, uzdužnog preseka posle 1 h (dole levo) i posle 2 h (dole desno) na 220 °C (Awoyemi L., Jones I. P. 2010)

3.4.3.3 Mehanička svojstva

Uticajem termičkih tretmana na mehanička svojstva tretiranog drveta bavili su se mnogobrojni istraživači. Tako su Poncsak et al. (2006) ustanovili da savojna čvrstoća i otpor pri izvlačenju vijaka termički tretiranog drveta breze opadaju sa povećanjem temperature tretmana (naručito iznad 200 °C), da nema značajnog uticaja termičkih tretmana na modul elastičnosti, a da se tvrdoća drveta lagano povećava iznad 200 °C. Slične rezultate dobili su i Poncsak et al. (2010) varirajući termičke tretmane na vrsti *Pinus banksiana*. Oni su zaključili da sa povećanjem temperature opada savojna čvrstoća, dok se modul elastičnosti bitnije ne menja. Kao i kod prethodnog istraživanja zaključeno je da brže zagrevanje do odgovarajuće temperature pozitivno utiče na ispitivana mehanička svojstva.

Nasuprot rezultatima ovih istraživanja, Kubojima et al. (2001) su zaključili da termički tretmani utiču na smanjenje modula elastičnosti kod vrsta *Picea sitchensis* Carr. i *Fraxinus spaethiana* Lingelsh. Rezultati prethodnih istraživanja (Kubojima et al. 2000), su pokazali da specifični modul elastičnosti (E/ρ) opada sa porastom temperature, odnosno da tokom procesa hlađenja ovaj modul raste. Autori su zaključili da do smanjenja dolazi usled promena viskoziteta i plastičnosti ispitivanog materijala.

Različiti zaključci o tome da li termički tretmani utiču na smanjenje modula elastičnosti ili ne, mogu biti posledica reagovanja ispitivane vrste na termičku modifikaciju. Tako su Shi et al. (2007) zaključili da se modul elastičnosti kod smrče i bora smanjuje usled termičke modifikacije, dok se kod jele i breze povećava. Njihova istraživanja su pokazala i da se savojna čvrstoća trepetljike posle termičkog tretmana smanjila za 35%, dok je modul elastičnosti porastao za 15%. Interesantno je da je samo kod ove vrste zabeležen pad tvrdoće u svim anatomskim pravcima i to od 15 do 39%. Slične zaključke primenom drugačijeg termičkog tretmana na drvetu jasike (*Populus tremuloides* Michx.), doneli su Kocafe et al. (2008a). Prema njihovim rezultatima, savojna čvrstoća jasike opala je za 2%, modul elastičnosti porastao je za 25%, tvrdoća u radijalnom i tangencijalnom pravcu opala za 24 i 13%, ali je tvrdoća u longitudinalnom pravcu povećana za 17%.

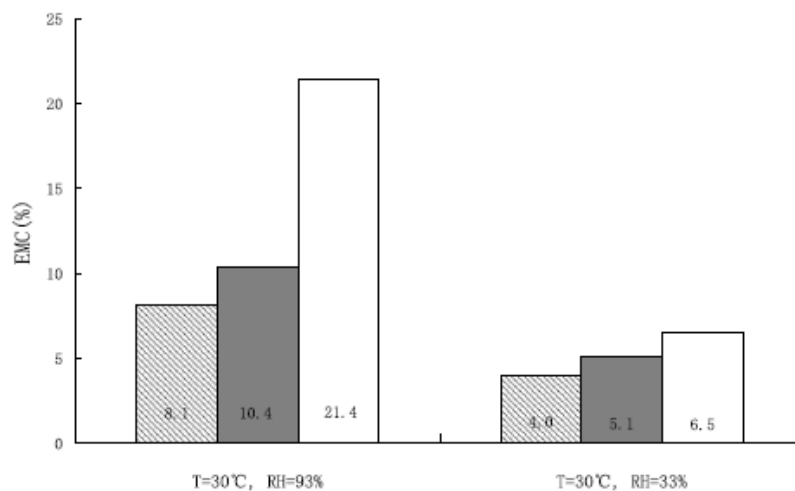
Prema Biziks et al. (2010), do smanjenja savojne čvrstoće tokom termičkih tretmana dolazi usled smanjenja prosečne veličine molekula celuloze ili usled kondenzacije lignina što bi doprinelo smanjenju elastičnosti drveta. Proučavajući uticaj termičkih tretmana na MOR i MOE vrsta *Picea sitchensis*, *Pinus contorta* i *Larix leptolepis*, Birkinshaw i Dolan (2009) su došli do sledećih zaključaka:

- da MOR opada tokom termičke modifikacije, pri čemu je smanjenje veće ako se termička modifikacija vrši bez prisustva vode kao zaštitnog sredstva;
- da su promene MOE blaže i da je u pojedinim slučajevima termički tretman doprineo rastu vrednosti modula elastičnosti u odnosu na kontrolne uzorke;
- da do povećanja krtosti termički tretiranog drveta dolazi usled razgradnje pojedinih hemijskih komponenata, odnosno usled raslojavanja delova

ćelijskog zida. Pri tome se narušava kompaktnost materijala i onemogućava se efikasno prenošenje i distribucija napona između pojedinih fibrila, odnosno pojedinih ćelija, što dovodi do loma materijala.

3.4.3.4 Fizička svojstva

Termička modifikacija dovodi do smanjenja mase tretiranog drveta, a sa povećanjem temperature tretmana gubitak mase se povećava (Biziks et al. 2010, Alen et al. 2002). Pored manje mase, termički tretirano drvo ima i manju ravnotežnu vlažnost. Mereći ravnotežnu vlažnost tretiranih i netretiranih uzoraka, Tao et al. (2010) su dobili da se sa povećanjem relativne vlažnosti vazduha značajno povećava razlika u sadržaju vlage tretiranih i netretiranih uzoraka (Slika 14). Na osnovu ovog grafika autori su zaključili da bi u uslovima sa povećanom vlažnošću vazduha termički tretirano drvo moglo imati neka mehanička svojstva bolja od netretiranog (većina mehaničkih svojstava drveta opada sa povećanjem vlage u higroskopnom području).



Slika 14. Razlika u ravnotežnoj vlažnosti uzoraka termički obrađenih korišćenjem pare povišenog pritiska, atmosferskog pritiska i netretiranih uzoraka (Tao et al. 2010)

Od uslova u kojima se odigrava termička modifikacija zavisice kasnije i ravnotežna vlažnost tretiranog drveta. Rezultati eksperimenta Borrega i Kärenlampi (2010), pokazali su da je ravnotežna vlažnost uzoraka termički tretiranih uz malo prisustvo vode, manja od uzoraka tretiranih bez prisustva vode ili uzoraka potopljenih u vodu. Rezultati ovog eksperimenta potvrdili su zaključke prethodnih istraživanja (Borrega, Kärenlampi 2008),

po kojima je termički tretirano drvo smrče (u uslovima relativne vlažnosti od oko 50%), imalo manju ravnotežnu vlažnost od tretmana obavljenih u uslovima relativne vlažnosti od 100% i oko 10%.

Da termički tretmani smanjuju hidrofilnost drveta dokazali su Kocaefe et al. (2008a), upoređujući ugao kvašenja tretiranog i netretiranog drveta belog jasena (*Fraxinus americana*) i mekog javora (*Acer rubrum*). Rezultati eksperimenta su pokazali da ugao kvašenja raste posle termičkih tretmana (površina drveta postoja hidrofobnija). Takođe, dobili su da je povećanje ugla kvašenja najveće u aksijalnom pravcu, dok su ovi uglovi u radijalnom i tangencijalnom pravcu slični. Smanjenje hidrofilnosti termički tretiranog furnira konstatovali su i Zdravković et al. (2010).

Posmatrajući promenu dimenzione stabilnosti preko ASE (*anti swelling (shrink) efficiency*) indikatora, Cao et al. (2010) su ustanovili da termički tretmani utiču na smanjenje bubrenja (utezanja) kineske jele (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook). Da termički tretmani povećavaju dimenzionu stabilnost tretiranog drveta dobili su i Kocaefe et al. (2008b) na vrstama *Pinus banksiana* Lamb. (bor) i *Populus tremuloides* Michx. (jasika). Obe vrste su pokazale povećanu dimenzionu stabilnost posle termičkih tretmana -debljinsko bubrenje bora je umanjeno za 38% u odnosu na netretirane uzorke, a jasike za 54%. Povećanu dimenzionalnu stabilnost vrsta *Abies bornmuelleriana* Mattf. i *Pinus sylvestris* L., usled dejstva termičkih tretmana, ustanovili su i Korkut i Bektas (2008).

Kako termički tretmani utiču na fizička svojstva furnira, istraživali su Lovrić i Zdravković (2009a). Oni su bukov furnir termički tretirali na temperaturama od 180 do 220 °C, a vreme izlaganja uzoraka na svakoj od ovih temperatura je variralo od pola sata do tri sata. Istraživači su proučavali odnos između gubitka mase uzoraka tokom tretmana (posledica isparavanja nekih organskih komponenti) i smanjenja zapreminskog bubrenja. Cilj ovog istraživanja je bio da se pronade optimalni termički tretman bukovog furnira, kojim se dobija zadovoljavajući odnos između povećanja dimenzione stabilnosti (posmatrane preko promene zapreminskog bubrenja) i gubitka mase.

Rezultati su pokazali da se sa povišenjem temperature i sa produženjem trajanja tretmana, povećava gubitak mase tretiranog furnira. Posle tri sata tretmana, gubitak mase pri temperaturama od 180 i 190 °C ne prelazi 5%, dok na višim temperaturama (200, 210 i 220 °C) on iznosi 8,31%, 11,62% i 17,62%. Dobijeno je da modifikacija bukovog furnira na 180 °C nema značajan uticaj na smanjenje zapreminskog bubrenja (posle tri sata $\beta_V = 18,49\%$), dok je najveće smanjenje postignuto na temperaturi od 220 °C posle tri sata ($\beta_V = 7,18\%$). Prema rezultatima istraživanja optimalni termički tretmani bukovog furnira bili bi 190, 200 i 210 °C na dva sata, 220 °C u trajanju od jedan sat, a ako se želi dobiti veća dimenziona stabilnost, tretman od tri sata na 200 °C (β_V oko 12,5%) i 90 min na 220 °C ($\beta_V = 9,75\%$).

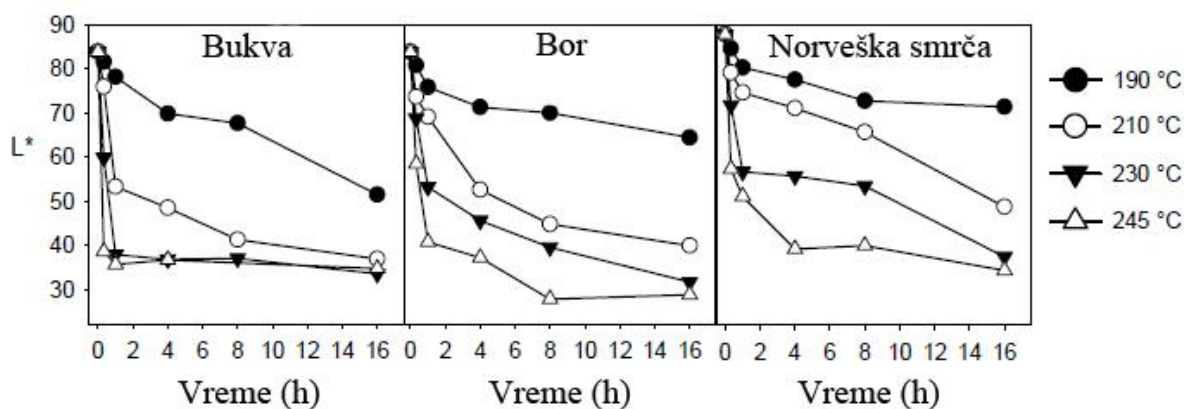
Svoja istraživanja Lovrić i Zdravković (2009b) su nastavili na topolovom furniru, koristeći iste termičke tretmane kao i kod prethodnog ogleda. Poredeći pozitivne i negativne uticaje termičkih tretmana, zaključeno je da najbolje rezultate daju tretmani: 150 min. na 180 °C (smanjenje zapreminskog bubrenja od 5% uz gubitak mase od 2,38%) i tretman od 90 min. na 200 °C (smanjenje bubrenja za 7,5% uz gubitak mase od 6,5%).

Termički tretmani uglavnom smanjuju apsorpciju tretiranog drveta, što su ustanovili Metsä-Kortelainen et al. (2006), na uzorcima srčike i beljike škotskog bora i norveške smrče. Prema rezultatima Rousset et al. (2004), termička modifikacija drveta smanjuje difuziju vlage, ali ne utiče na permeabilnost gasova. Oni su termički tretirali uzorke topole (*Populus robusta*) izrezane iz zone beljike, međuzone i zone srčike. Rezultati njihovog istraživanja su pokazali da je termički tretman smanjio difuziju vlage topolovog drveta za 60% (epruvete iz zone srca) odnosno 40% (epruvete iz beljike i međuzone). Nasuprot ovim rezultatima, analizom podataka o propusnosti gasova, dobijeno je da termički tretmani nisu uticali na ovo svojstvo.

Termički tretmani utiču na promenu boje i to tako što sa produženjem dužine tretmana, kao i sa povišenjem temperature, uzorci dobijaju tamniju boju. Ispitujući vezu između boje tretiranih uzoraka i savojne čvrstoće, Schnabel et al. (2007) su zaključili da se boja uzoraka može koristiti kao pokazatelj mehaničkih svojstava tretiranog drveta. Oni su uzorke jasena (*Fraxinus Excelsior*) i bukve (*Fagus Sylvalica*) termički tretirali koristeći

blage, srednje i oštre režime. Po završetku tretmana uzorcima je merena boja pomoću CIE $L^*a^*b^*$ sistema, a zatim je izračunata njihova savojna čvrstoća. Rezultati ispitivanja su pokazali da CIE $L^*a^*b^*$ sistem pouzdano razvrstava uzorke bukve i jasena prema korišćenim temperaturama tokom termičkog tretmana i da boja može biti parametar preko kojeg bi se uzorci razvrstavali u odgovajuće klase kvaliteta.

Predviđanjem mehaničkih svojstava na osnovu boje termički tretiranog drveta bavili su se i Gonzales-Pena et al. (2009). Prateći promenu boje pomoću CIE $L^*a^*b^*$ sistema, naučnici su zaključili da termički tretmani utiču na sve komponente, a naročito na komponentu L^* koja definiše potamnjenje boje tokom tretmana (Sl. 15).



Slika 15. Promena boje tretiranih uzoraka bukve, bora i norveške smrče u zavisnosti od dužine i temperature tretmana (Gonzales-Pena et al. 2009)

Ustanovljeno je i da se krive promene L^* komponente u velikoj meri poklapaju sa krivama promene gubitka mase tokom eksperimenta. Druge dve komponente, a^* i b^* , su se takođe menjale tokom eksperimenta i to tako što su u početku rasle, a zatim opadale sa produženjem tretmana. Na početku tretmana drvo je povećavalo učešće crvene i žute boje (postalo više narandžasto), da bi sa produžetkom tretmana postajalo tamnosivo. Totalna promena boje (ΔE^*), je bila slična promeni L^* komponente, odnosno smanjenju mase ispitivanih uzoraka. Istraživači su zaključili da se na osnovu promene boje i potamnjenja (ΔE^* i ΔL^*) mogu predvideti ispitivana mehanička svojstva, pri čemu je za većinu svojstava bolji pokazatelj ukupna promena boje - ΔE^* . Da je moguće predvideti mehanička svojstva termički tretiranog drveta na osnovu promene boje ustanovili su i Welzbacher et al. (2010) na drvetu bukve i smrče, kao i Todorović (2012) tretirajući drvo bukve iz zone lažne srčevine i beljike.

Promena boje drveta tokom termičkog tretmani nije ujednačena po celom poprečnom preseku uzorka. Rezultati su pokazali da promena boje nije uniformna po celom poprečnom preseku i da postoji razlika u boji spoljašnjeg i unutrašnjih slojeva. Razlika u boji je veća što je temperatura viša i trajanje tretmana duže. Takođe je ustanovljeno da do najveća promene boje dolazi u okviru prvog milimetra debljine tretiranih uzoraka (Pfriem et al. 2010).

Pored promene boje, termički tretmani utiču i na otpornost tretiranog materijala na UV zrake. Ayadi et al. (2003) istražuju promenu boje termički tretiranog materijala i zaključuju da termički tretmani povećavaju kratkotrajnu stabilnost drveta na dejstvo veštačkog osvetljenja. Lignin sa površine termički tretiranog materijala je malo manje podložan fotodegradaciji nego lignin iz netretiranog drveta. I pored ovih poboljšanja, boja termički tretiranog drveta će bledeti relativno brzo, ako se ovo drvo koristi u spoljašnjim uslovima (Evans 2009).

3.4.3.5 Trajnost termički modifikovanog drveta

Veću otpornost termički modifikovanog drveta na dejstvo lignikolnih gljiva konstatovali su mnogi istraživači: Ohnesorge et al. (2009), Pfriem et al. (2009), Rowell et al (2009), Stingl et al. (2009)... Prema Boonstra et al. (2007), glavni razlozi za povećanu otpornost termički tretiranog drveta prema napadu gljiva su sledeći:

- degradacija hemiceluloze u furfuralne polimere koji su manje higroskopni;
- hemijska transformacija minerala i vitamina koji su esencijalni za metabolizam gljiva;
- modifikacija ugljenohidrata i formiranje toksičnih jedinjenja;
- povećano umrežavanje unutar lignin-ugljenohidratnog kompleksa uz smanjenje higroskopnosti;
- smanjenje učešća hemiceluloza, najhidrofilnijeg i za lignikolne gljive lako svarljivog jedinjenja.

Modifikacija lignina i formiranje novih etarskih veza u materijalu može promeniti svojstva tretiranog drveta i onemogućiti enzimatski sistem gljiva da efikasno razlaže termički tretirano drvo (Weiland i Guyonnet 2003). Ovi istraživači su ispitivali ispravnost teorija da do povećanja otpornosti termički tretiranog drveta prema dejstvu lignikolnih gljiva dolazi usled umrežavanja ligninske mreže i modifikacije celuloze, zbog čega enzimski sistem gljiva više ne prepoznaje drvo i samim tim ga ne može rastvoriti, kao i usled eliminacije pentozana (hemiceluloza) koje predstavljaju osnovni hranjivi sastojak drveta što inhibira početnu kolonizaciju gljiva. Autori su zaključili da i pored velike degradacije hemiceluloza tokom termičkog tretmana dolazi do napada gljiva, tako da se početna hipoteza o zaustavljanju kolonizacije gljiva usled razlaganja pentozana čini pogrešnom.

3.4.3.6 Lepljenje termički modifikovanog drveta

Ispitujući kvalitet lepljene veze termički modifikovanog drveta pri proizvodnji lameliranog drveta, Šernek et al. (2008) su koristili tri različite vrste lepka, melamin-urea-formaldehid (MUF), fenol-rezorcinol-formaldehid (FRF) i poliuretan (PUR), sa kojima su lepili sledeće vrste drveta: smrču (*Picea abies Karst*), duglaziju (*Pseudotsuga menziessii Franco*), topolu (*Populus species, I-214*), brezu (*Betula pendula*) i crnu johu (*Alnus glutinosa Gaertn.*). Sve vrste su termički tretirane pomoću Plato procesa proizvodnje termički modifikovanog drveta na temperaturi od 180 °C u trajanju od 5 h.

Lepkovi su nanošeni ručno, pomoću četke, sa nanosom od 220 g/m², a tako pripremljene grede presovane su na sobnoj temperaturi u laboratorijskoj presi. Pritisak presovanja je iznosio 1 MPa sa vremenom presovanja od 90 min. Na ovako izrađenim uzorcima određena je smicajna čvrstoća u sloju lepka po standardu EN 392 (1995) i stepen raslojavanja po standardu EN 391 (2001). Smicajna čvrstoća je ispitivana na suvim uzorcima i na uzorcima tretiranim 6 h u ključaloj vodi, a zatim hlađenim 2 h u vodi temperature 20 °C.

U većini slučajeva najbolji rezultati ispitivanja dobijeni su pri korišćenju PUR lepka, slabiji rezultati postignuti su pri korišćenju MUF lepka, a kvalitet lepljene veze pomoću FRF lepaka je bio nezadovoljavajući. Analizirajući dobijene rezultate autori su zaključili da su slabi rezultati lepljenja FRF lepkom rezultat smanjenja pH vrednosti drveta tokom

termičkog tretmana (kao produkti tretmana nastaju mravlja i sirćetna kiselina), a za pravilan proces otvrdnjavanja FRF lepкова potrebna je bazna sredina.

Prednost PUR lepкова u odnosu na MUF i FRF lepkovе (pri lepljenju termički tretiranog drveta) je u tome što su MUF i FRF lepkovі vodorastvorljivi. Tokom termičkog tretmana površina tretiranog drveta postaje manje polarna, odbija vodu i postaje hidrofobna. Ovo onemogućava pravilno nanošenje vodorazredivih lepкова na tretiranu podlogu, smanjujući kvalitet lepljene veze. PUR lepkovі nemaju ovaj problem, pa autori zaključuju da je to najverovatniji uzrok postignutom boljem kvalitetu lepljene veze u odnosu na MUF lepak.

Kariž je u svojoj doktorskoj disertaciji (2011) ispitivao uticaj termičke modifikacije na očvršćavanje lepka i kvalitet lepljene veze. On je uzorke drveta smrče termički tretirao na temperaturama od 150 do 230 °C. Uzorke predviđene za lepljenje pomoću fenol-formaldehidnog (FF) lepka presovao je vrućim postupkom presovanja, dok je uzorke predviđene za lepljenje pomoću polivinilacetatnog (PVAc), poliuretanskog (PU) i melamin-urea-formaldehidnog (MUF) lepka, klimatizovao na različitim vlažnostima i potom ih presovao hladnim postupkom.

Na osnovu rezultata istraživanja ustanovio je da smicajna čvrstoća u sloju lepka, uzoraka lepljenih pomoću FF lepka, opada sa oštrinom termičkog tretmana, pri čemu je kod svih ispitivanih grupa procenat epruveta koje su pucale u zoni drveta bio veliki. Kada je druga grupa epruveta (držana u vodi 24 h) ispitivana, smicajna čvrstoća se smanjila za oko 50%, pri čemu je samo kod kontrolnih (netretiranih) epruveta ostao veliki broj epruveta koje su pucale u zoni drveta, dok se taj broj smanjivao sa jačinom tretmana modifikovanih uzoraka. Na osnovu toga, zaključeno je da smanjenju smicajne čvrstoće u sloju lepka ne doprinose samo lošija mehanička svojstva modifikovanog drveta, već i kvalitet lepljene veze pomoću FF lepka.

Kod uzoraka lepljenih pomoću PVAc lepila, smicajna čvrstoća je opadala sa oštrinom modifikacije. Pri tom nije konstatovan uticaj vlažnosti epruveta pre lepljenja na čvrstinu veze, dok je konstatovano da sa povećanjem temperature dolazi i do povećanja procenta uzoraka koje su pucale po sloju lepka. Kako je i kod uzoraka potopljenih 24 h u vodu pre

ispitivanja uočeno povećanje lomova u sloju lepka sa oštrinom tretmana, konstatovano je da PVAc lepak daje lošiji kvalitet lepljenja kod termički modifikovanog drveta.

I kod uzoraka lepljenih pomoću PU lepka, smicajna čvrstoća je opadala sa oštrinom tretmana, ali je zaključeno da uzrok tome ne leži u slabijem lepljenju, već u slabijim mehaničkim svojstvima modifikovanog drveta (ispitivani uzorci su uglavnom pucali u zoni drveta). MUF lepak je dao nešto slabiju čvrstoću lepljenog spoja u odnosu na PU lepak, ali značajno bolju od PVAc lepila. Kariž je na kraju zaključio da je za bolje rezultate lepljenja potrebno modifikovati (produžiti) preporučene postupke presovanja i da pri lepljenju sa PU lepkom treba koristiti vlažnije uzorke zbog načina očvršćavanja lepka.

Očigledno je da postoje brojni faktori koji mogu uticati na čvrstinu lepljenog spoja termički tretiranog drveta. Na osnovu analize prethodnih istraživanja Sahin Kol et al. (2009) navode da pad smicajne čvrstoće kod termički tretiranog drveta nastaje kombinacijom različitih faktora:

- posle termičkih tretmana opada mogućnost kvašenja drveta pomoću vode, uglavnom zato što drvo postaje hidrofobno, manje polarno i signifikantno odbojno prema vodi (Gerardin et al. 2007). Ovo može sprečiti vodorazredive lepkove da se adekvatno razliju po površini termički tretiranog drveta (Šernek et al. 2008);

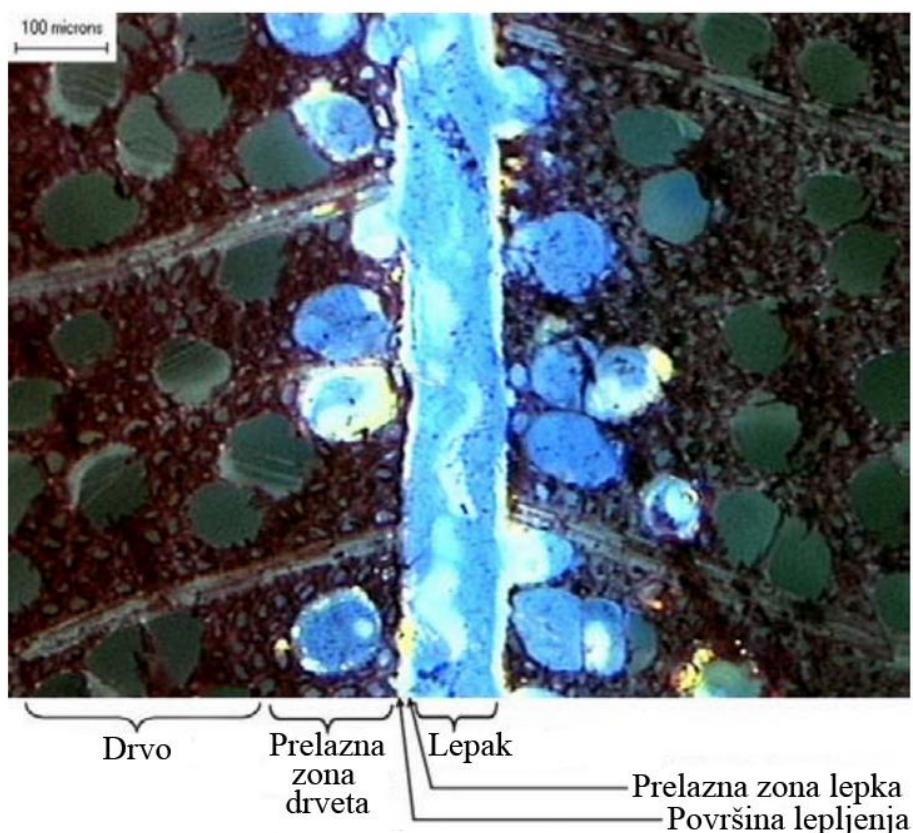
- termički tretmani smanjuju pH vrednost drveta, usled formiranja sirćetne kiseline tokom razgradnje hemiceluloza (Tjeerdsma et al. 1998), što može uticati na očvršćavanje nekih tipova lepkova;

- termički tretmani mogu uticati na distribuciju lepka po površini, kao i na penetraciju lepka u poroznu strukturu drveta, zato što generalna hidrofilna drvena supstanca, postaje hidrofobna posle termičkih tretmana (Paul et al. 2007).

Iako se mehaničke i hemijske teorije lepljenja ne mogu posmatrati odvojeno, teorija mehaničkog kačenja "*mechanical interlock*", mogla bi objasniti značaj dobrog prodiranja lepka u strukturu lepljenog materijala. Prema ovoj teoriji, jačina ostvarene veze će zavisiti od mogućnosti prodiranja lepka u pore lepljenog materijala. Frihart (2005a)

napominje da je za ostvarenje mehaničkog kačenja potrebno da lepak dovoljno dobro okvasi lepljenu površinu, pa je za to potrebno sadejstvo i hemijskih i mehaničkih sila. Autor smatra da je veza ostvarena mehaničkim kačenjem otpornija na dejstvo sila smicanja u odnosu na sile drugog pravca.

Značaj penetracije lepka u strukturu drveta, najlakše je objasniti na osnovu izgleda lepljene veze - Slika 16. Na ovoj fotografiji fluorescentnom bojom označen je lepak. Prema autoru (Frihart 2005b), zapanjujuće je koliko je velika međufazna zona između drveta i lepka (*wood interphase*) u odnosu na lepljenu površinu (*interface*), prelaznu zonu kod lepka (*adhesive interphase*) i zonu samog očvrslog lepka (*bulk adhesive*). Sa fotografije se može videti da bi i bez postojanja hemijskih veza, očvrslu lepak pružao otpor razdvajanju lepljenih površina, usled penetracije u poroznu strukturu drveta dok je bio u tečnoj fazi (teorija mehaničkog kačenja). Frihart (2005b) napominje da pored ispunjavanja lumena ćelija, lepak u međufaznoj zoni prodire i u ćelijske zidove, menjajući im na taj način mehanička svojstva i smanjujući im mogućnost bubrenja.



Slika 16. Slepljeni uzorci drveta pomoću epoksi lepka (Frihart 2005b)

Treba napomenuti da termička modifikacija drveta može u nekim slučajevima doprineti i poboljšanju kvaliteta lepljene veze. Pri lepljenju drveta pomoću termoplastičnih polimera (koji su često hidrofobne prirode), izrazito hidrofilni karakter drveta predstavlja problem pri lepljenju. Rezultatima ispitivanja Follrich et al. (2006), pokazali su da termička modifikacija može biti jedan od načina za poboljšanje adhezije između drveta i nepolarnih termoplastičnih polimera.

3.4.3.7 Ploče na bazi termički tretiranog drveta

Ispitivanje uticaja termičkih tretmana uglavnom je vršeno na masivnom drvetu. Malo je radova koji se bave mogućnošću upotrebe termički tretiranog drveta u proizvodnji ploča. Istraživanja u ovoj oblasti fokusirana su na ploče od usitnjenog materijala. Tako su Boonstra et al. (2006b) ispitivali mogućnost upotrebe iverja tretiranog pomoću pare na temperaturama ispod 200 °C u izradi ploča iverica i zaključili su da ovaj proces poboljšava dimenzionalnu stabilnost izrađenih ploča. Termičkim tretiranjem vlakana, može se smanjiti apsorpcija i debljinsko bubrenje i kod MDF ploča (Garcia et al. 2006).

Osim ispitivanja svojstava ploča izrađenih od termički tretiranog drveta, neka istraživanja su ispitivala i svojstva naknadno termički tretiranih ploča. Tako su Del Menezzi et al. (2009) termički tretirali izrađene OSB ploče izrađene od drveta *Pinus taeda* u vrućoj presi na temperaturi od 190 i 220 °C, u trajanju od 12, 16 i 20 min. Zaključeno je da su tretmani bitno uticali na smanjenje bubrenja i ravnotežni sadržaj vlage, dok se kod apsorpcije značajna razlika mogla uočiti uglavnom kod oštrijih tretmana. Od ispitivanih mehaničkih svojstava samo je najoštiji režim uticao na smanjenje savojne čvrstoće paralelno sa orijentacijom iverja. Interesantno je da su istraživači ustanovili da temperatura ima daleko veći uticaj na ispitivana svojstva od vremena, jer je od 25 ispitanih svojstava temperatura uticala na promenu 18, dok je vreme izlaganja uticalo na promenu samo 7. Autori na kraju zaključuju da bi bilo moguće pretpostaviti kakva će biti mehanička svojstva tretiranih ploča na osnovu promene boje i gubitka mase po završetku odgovarajućih tretmana.

U odnosu na predmet istraživanja ove disertacije, najbliža su istraživanja Nazerian et al. (2011), koji su ispitivali uticaj termičkih tretmana na hemijski sastav, fizička i mehanička svojstva LVL-a dobijenog od bukve, javora i topole. Za sve ispitivane vrste proizvedeni su plaštevci dimenzija 7x150x360 mm, koji su sortirani u tri grupe: juvenilno, prelazno i zrelo drvo, a zatim termički tretirani na temperaturama od 120 i 180 °C u trajanju od 4 h. Od tretiranih i netretiranih uzoraka proizveli su LVL ploče koristeći ureaformaldehini lepak (nanos oko 180 g/m²), pri pritisku od 12 kg/cm², temperatura 120 °C i vremenu presovanja od 8 min. Hemijskom analizom furnira pomoću gasne hromatografije utvrdili su da je termička modifikacija značajno uticala na sadržaj drvnih ugljenohidrata. Ustanovili su i da su ispitivana fizička i mehanička svojstva proizvedenih LVL-a ploča direktno povezana sa sadržajem hemiceluloza. Sa smanjenjem hemiceluloza smanjivalo se i bubrenje, apsorpcija vode, savojna čvrstoća i modul elastičnosti. Takođe su zaključili da LVL proizveden od juvenilnog drveta ima lošija ispitivana svojstva. U Tabeli (4) prikazani su svi dobijeni rezultati ovog istraživanja vezani za topolu (*P. Nigra*).

Tabela 4. Uticaj termičkih tretmana na svojstva topolovog LVL-a (Nazerian et al. 2011)

Topola	Juvenilno drvo			Prelazno drvo			Zrelo drvo		
	0 °C	120 °C	180 °C	0 °C	120 °C	180 °C	0 °C	120 °C	180 °C
Učešće ugljenohidrata u listovima furnira pre i posle tretmana (%)									
Glukoza	59.44	57.93	54.48	55.33	54.74	50.43	48.31	46.22	44.29
Ksiloza	19.06	18.45	15.04	14.18	12.82	11.84	14.86	14.15	12.49
Manoza	7.29	6.04	5.23	3.17	3.19	2.27	2.62	2.66	2.02
Galaktoza	5.96	6.14	4.88	4.32	3.94	2.61	1.2	1.11	0.88
Arabinoza	0.16	0.12	0.1	0.05	0.09	0.07	0.06	0.11	0.10
Fizička svojstva LVL-a: gustina – D, debljinsko bubrenje posle 2h – RS ₂ i 24h – RS ₂₄ , tangencijalno bubrenje – TS, aksijalno bubrenje – LS, apsorpcija vode posle 2h – WA ₂ i posle 24h – WA ₂₄									
D (g/cm ³)	0.36	0.35	0.32	0.36	0.37	0.36	0.37	0.37	0.36
RS ₂ (%)	13.0	11.4	9.0	11.2	10.4	8.35	9.1	8.2	6.6
RS ₂₄ (%)	21.2	19.6	13.0	19.5	19.4	10.8	18.2	17.2	10
TS (%)	10.2	8.7	7.2	9.7	6.1	6.1	7.5	5.9	3.6
LS (%)	0.98	0.85	0.6	0.81	0.77	0.53	0.63	0.62	0.34
WA ₂ (%)	17.83	15.67	12.50	15.00	14.50	11.17	11.5	11.6	8.50
WA ₂₄ (%)	34.17	31.00	23.00	29.50	28.33	21.67	21.50	21.50	16.50
Mehanička svojstva: savojna čvrstoća upravo – MOR _v i savojna čvrstoća paralelno sa vlakancima – MOR _p (MPa) ; modul elastičnosti upravo – MOE _v i modul elastičnosti paralelno sa vlakancima – MOE _p (MPa)									
MOR _v	39.1	29.7	22.8	50.5	39.3	25.0	65.0	55.0	25.7
MOR _p	30.7	24.1	17.3	42.5	34.7	18.8	59.0	48.1	10.8
MOE _v	4025	3076	2585	6424	5768	4112	6964	6967	3601
MOE _p	3759	2811	2191	6104	5446	2901	6700	6690	3153

4. PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Ispitivanje svojstava ploča od termički modifikovanog topolovog furnira obavljeno je u Laboratoriji za svojstva drveta Šumarskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na materijalu dobijenom preradom topolovih trupaca po predviđenom programu istraživanja (Slika 17).

Na stovarištu trupaca fabrike "Novi drveni kombinat" iz Sremske Mitrovice, odabrano je 15 topolovih F trupčića koji su zatim okorani i oljušteni u furnir debljine 3 mm. Po završetku faze ljuštenja (na mokrim makazama), izrađeni su formati dimenzija 100x100 cm. Ukupno je izrađen 801 format, koji su potom osušeni po standardnom tehnološkom procesu na vlažnost 6-8%.

Posle faze sušenja, formati su razvrstavani po udelu lažne srčevine na furnire iz zone beljike, međuzone i zone srčike, a zatim je od ovako razvrstanih formata formirana jedna kontrolna i četiri grupe za termičku modifikaciju. Svaka od ovih grupa sastojala se od 56 formata iz srčike, 16 iz međuzone i 16 formata iz zone beljike. Grupe su formirane na takav način da je učešće furnira iz pojedinih trupčića bilo što je moguće ravnomernije raspoređeno.

Termička modifikacija pripremljenog furnira urađena je u fabrici „Tarkett“ iz Bačke Palanke, u laboratorijskoj komori firme Baschild (model ATK), sa vodenom parom kao medijumom za zagrevanje. Furnirski formati su modifikovani na četiri različita tretmana i to: 190 °C, 200 °C, 210 °C i 215 °C u trajanju od 1 h.

Od dobijenih termički modifikovanih i od kontrolnih (nemodifikovanih) formata, pripremljene su grupe od po pet formata za formiranje ploča. Pored ploča koje su se sastojale samo od netretiranih (5N) i samo od tretiranih (5T) formata, formirane su i ploče nastale kombinovanjem ova dva tipa formata furnira. Tako su pripremljene T3NT ploče - ploče sa spoljašnjim listovima od modifikovanog furnira i srednjicom od nemodifikovanog, kao i TNTNT ploče – ploče nastale naizmeničnim ukrštanjem modifikovanog i nemodifikovanog furnira.

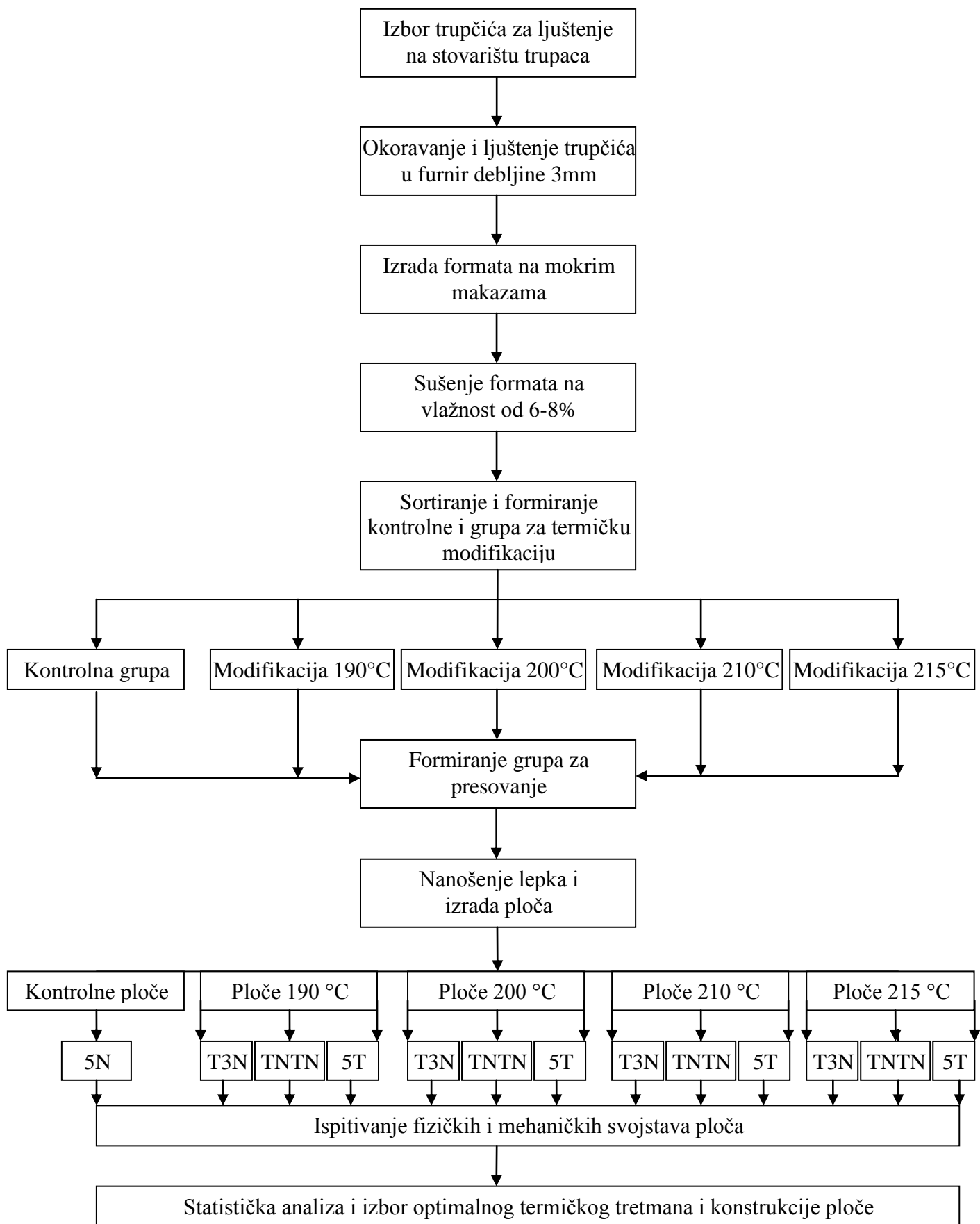
Presovanje petoslojnih ploča obavljeno je u fabrici “Novi drveni kombinat”, a kao vezivno sredstvo korišćen je MUF (melamin-ureaformaldehidni) lepak firme Sanelco. Ukupno je izrađeno 13 različitih tipova ploča, a od svakog tipa ispresovano je po 6 ploča - ukupno 78 komada.

Ploče su prema planiranoj šemi krojenja izrezane u Laboratoriji za mašine i alate Šumarskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava urađeno je u Laboratoriji za svojstva drveta na Šumarskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Ukupno je ispitano:

- 390 epruveta dimenzija 50x50 cm – promena vlažnosti i debljine;
- 1170 epruveta dimenzija 50x50 cm – tvrdoća ploča;
- 936 epruveta dimenzija 350x50 cm – savojna čvrstoća i modul elastičnosti;
- 936 epruveta dimenzija 120x25 cm – smicajna čvrstoća u sloju lepka;

Svi podaci su statistički obrađeni i analizirani pomoću SPSS programa, na osnovu čega su doneti zaključci o optimalnim režimima i konstrukcijama ploča.



Slika 17. Program istraživanja

5. MATERIJAL I METOD RADA

5.1 Izbor materijala

Izbor materijala za potrebe ovog eksperimenta obavljen je na stovarištu trupaca u fabrici „Novi drvni kombinat“ iz Sremske Mitrovice - gde je izvršeno i ljuštenje trupaca i priprema furnira za termičku modifikaciju. Na stovarištu trupaca (Slika 18) bila je uskladištena sirovina iz Šumskih uprava Višnjićevo i Kupinovo (ŠG „Sremska Mitrovica“), u kojima se skoro isključivo (oko 99%) uzgaja klon topole *Populus x euramericana* 'I-214'.



Slika 18. Stovarište trupaca u fabrici „Novi drvni kombinat“ iz S. Mitrovice

Pre operacije ljuštenja trupci su skraćeni na dužine od 1 m i okorani (Slika 19 - levo). Za potrebe eksperimenta ukupno je oljušteno 15 topolovih F trupčića dužine 1 m u furnir nominalne debljine 3,2 mm na mehaničkoj ljuštilici firme Cremona (Slika 19 - desno). Ova debljina je izabrana da bi se posle operacije sušenja dobio furnir debljine 3 mm. Iz namotanog furnirskog platna, na mokrim makazama, odsecani su formati dimenzija 100x100 cm. Na mokrim makazama su odsecani samo puni formati bez krupnijih grešaka. Po standardnom tehnološkom procesu se (zbog uštede materijala), isecaju svi delovi furnirskog platna iz kojih se kasnijom obradom na spajalnicama mogu dobiti odgovarajući formati. Ovde je ova operacija namerno preskočena, kako bi se izbegao uticaj lepka i grešaka tokom spajanja na rezultate eksperimenta. Ukupno je na mokrim makazama izrađen 801 format dimenzija 1000x1000x3,2 mm.



Slika 19. Okoravanje trupčica pre operacije ljuštenja (levo), lagerovanje furnirskog platna na rolne (desno)

Pored odgovarajućih formata, iz svakog trupčica uzimani su i uzorci furnira (ukupno 84 kom.), koji su kasnije poslužili za određivanje vlažnosti furnira pre i posle operacije sušenja (Slika 20). Ovi uzorci su razvrstavani po boji na furnire iz beljike, međuzone i zone srčevine u zavisnosti u kojoj meri je na njima bila prisutna lažna srčevina. Razvrstavanje po boji uzoraka je urađeno iz razloga što se pretpostavljalo da vlažnost furnira nastalog iz zone lažne (mokre) srčevine i iz zone beljike nije ista. Po završetku rada na mokrim makazama, izrađeni formati i uzorci su zatim osušeni standardnim tehnološkim postupkom u fabričkoj sušari za furnir firme BSH Babcock (Slika 21), kako bi se dobio furnir vlažnosti 6-8%.



Slika 20. Obeležavanje (levo) i merenje (desno) uzoraka furnira za određivanje vlažnosti

Da bi se mogla odrediti vlažnost furnira, uzorcima je izmerena masa pre i posle operacije sušenja. Problem je predstavljalo to što je za određivanje vlažnosti potrebno znati i masu uzoraka u apsolutno suvom stanju, a uzorke je (zbog prevelike dužine – 1 m), bilo nemoguće osušiti u laboratorijskoj sušnici. Zato su po završetku operacije sušenja iz svakog uzorka uzimani manji komadi, kojima je izmerena masa i koji su kasnije sušeni do apsolutno suvog stanja u laboratorijskoj sušnici.



Slika 21. Ubacivanje izrađenih formata i uzoraka u sušaru

Na ovaj način je bilo moguće izračunati kolika je bila vlažnost komada furnira po završetku sušenja:

$$v_{kp} = \frac{M_{kp} - M_{k0}}{M_{k0}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

gde je:

v_{kp} – vlažnost komada furnira po završetku operacije sušenja (%);

M_{kp} – masa komada furnira po završetku operacije sušenja (g);

M_{k0} – masa komada furnira u apsolutno suvom stanju (g).

Kada se ti podaci primene na uzorke, moguće je izračunati i kolika bi bila masa uzoraka u apsolutno suvom stanju, odnosno kolika je bila vlažnost furnira pre sušenja:

$$M_{u0} = \frac{M_{up}}{\frac{v_{kp}}{100} + 1} (g) \quad (2)$$

$$v_{us} = \frac{M_{up} - M_{u0}}{M_{u0}} \times 100(\%) \quad (3)$$

gde je:

M_{u0} – masa uzorka furnira u apsolutno suvom stanju (g);

M_{up} – masa uzorka furnira po završetku operacije sušenja (g);

v_{kp} – vlažnost komada furnira po završetku operacije sušenja (%);

v_{us} – vlažnost uzoraka furnira pre operacije sušenja (%).

Po završetku operacije sušenja, formati su skraćeni po dužini za 20 cm, tako da su dobijeni formati dimenzija 800x1000x3 mm. Ovo skraćivanje je izvršeno iz tehničkih razloga tj. da bi formati mogli stati u laboratorijsku komoru za termičku modifikaciju. Pored tehničkih razloga, skraćivanjem su uklonjene i pukotine nastale tokom procesa sušenja, a koje bi se mogle proširiti tokom termičke modifikacije.

Posle ove operacije formati su razvrstavani po boji i to tako što je dozvoljeno učešće lažne srčevine na formatima iz beljike bilo do 25%, na formatima iz međuzone od 25 do 75%, a na formatima iz srčike preko 75%. Klasifikovanje je vršeno vizuelnim putem, a prilikom klasiranja odstranjeni su formati na kojima su se pojavile netolerantne greške nastale tokom procesa sušenja ili prilikom skraćivanja.

Po završetku klasiranja ostao je 341 format iz zone srčike i po 165 formata iz međuzone i zone beljike. Od ovih formata formirano je 5 grupa. Prema prethodnim proračunima ustanovljeno je da se u jednom ciklusu termičke modifikacije može tretirati oko 90 formata, pa se zato svaka grupa sastojala od 56 formata iz zone srčike, 16 formata iz međuzone i 16 formata iz zone beljike. Grupe su formirane na takav način da je učešće furnira iz pojedinih trupčića bilo što je moguće ravnomernije raspoređeno. Ovim je izbegnuto da formati nastali iz nekoliko trupčića čine pojedinu grupu, odnosno, izbegnut je uticaj građe pojedinog trupca (trupčića) na rezultate eksperimenta. Od formiranih grupa jedna je izdvojena kao kontrolna, dok su ostale četiri transportovane u fabriku „Tarkett“ iz Bačke Palanke na termičku modifikaciju.

5.2 Termička modifikacija

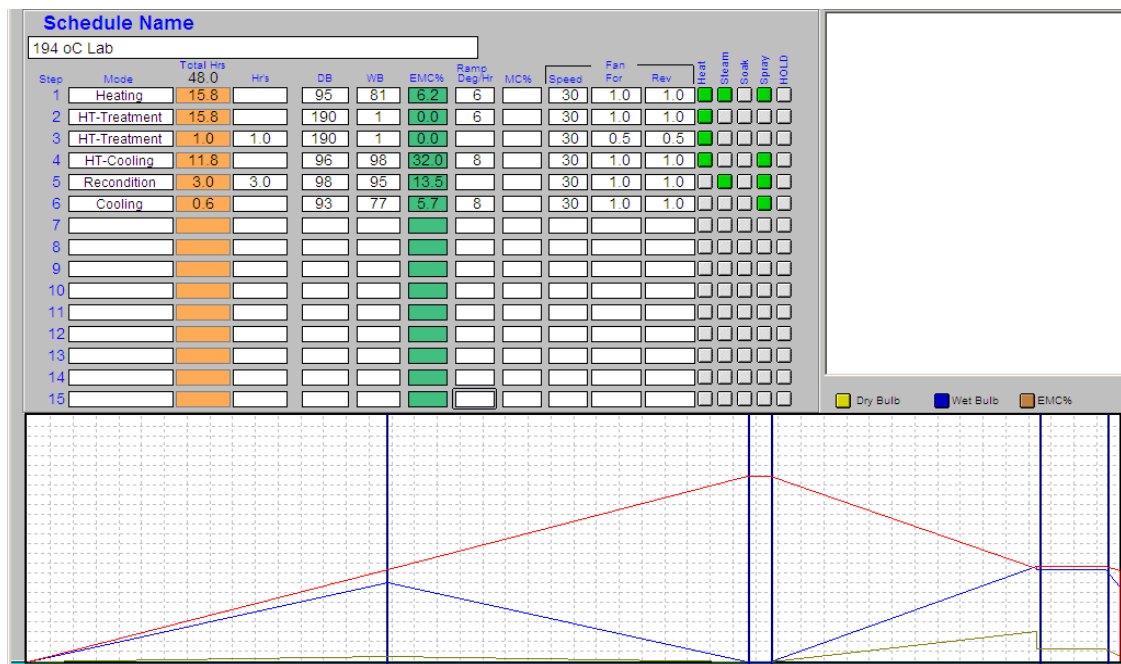
Prema programu istraživanja predviđeno je da se topolovi formati termički modifikuju primenom četiri različita termička tretmana i to na 190 °C, 200 °C, 210 °C i 215 °C u trajanju od 1 h. Ovi režimi su izabrani na osnovu prethodnih istraživanja (Lovrić i Zdravković 2009), prema kojem tretmani na 180 °C (kraći od 2 h), malo doprinose promeni fizičkih svojstava, dok tretmani na temperaturama od 210 °C i 220 °C (duži od 2 h), značajno povećavaju gubitak mase topolovog furnira.

Umesto tretmana od 220 °C urađen je tretman od 215 °C, zato što je postojala opasnost da bi pri višoj temperaturi došlo do ozbiljnog oštećenja korišćene opreme. Termička modifikacija pripremljenog furnira urađena je u fabrici „Tarkett“ iz Bačke Palanke u laboratorijskoj komori firme Baschild (model ATK) - Slika 22, sa vodenom parom kao medijumom za zagrevanjem.



Slika 22. Priprema topolovog furnira za termičku modifikaciju (levo) i ubacivanje pripremljenog furnira u laboratorijsku komoru (desno)

Sam proces termičke modifikacije odvijao se u šest faza i biće objašnjen na primeru najblažeg režima – 190 °C (Slika 23). Tokom faze zagrevanja povećavana je temperatura za po šest stepeni svakog sata, sve dok nije dostignuta temperatura od 95 °C. U ovoj fazi povećanje temperature vrši se uz prisustvo vodene pare i raspršivanja vode iz dizni (zeleni kvadrati na slici).



Slika 23. Prikaz termičkog tretmana na 190 °C

Po postizanju temperature od 95 °C, prelazi se u fazu početne termičke modifikacije u kojoj se temperatura povećava za po 6 °C svakog sata, sve do zadate temperature termičke modifikacije od 190 °C. Tokom ove faze ne vrši se dodatno ubacivanje vodene pare ili raspršavanje vode, tako da se temperatura u komori povećava (crvena linija) uz istovremeno snižavanje temperature mokrog termomotra (plava linija).

Po postizanju temperature od 190 °C, u narednih sat vremena uslovi u komori nisu se menjali u skladu sa predviđenim režimom termičke modifikacije. Po isteku predviđenih sat vremena, prelazi se u četvrtu fazu – fazu visokotemperaturnog hlađenja. Tokom ove faze grejanje se ne isključuje, ali se smanjenje temperature postiže raspršavanjem vode iz dizni. Ova faza je trajala sve dok se temperatura nije spustila sa 190 °C na 96 °C i to tako što se svakog sata temperatura spuštala za po 8 °C.

Faza kondicioniranja trajala je 3 h i tokom ove faze, pored raspršivanje vode, ubacivana je u komoru i vodena para. Trajanje ove faze (bitne za smanjenje naprezanja u tretiranom materijalu), određeno je na osnovu iskustva osoblja zaduženog za sušare i komore za termičku modifikaciju fabrike „Tarkett“. Na osnovu njihovih saveta, ova faza je produžavana za po sat vremena za svakih 10 °C povišenja temperature, tako da je za tretman na 215 °C iznosila 5,5 h (Prilog 1 Slika 3).

Tokom završne faze hlađenja, nastavlja se sa raspršavanjem vode u komori za termičku modifikaciju, dok su sve ostale operacije zaustavljene. Ukupno vreme termičke modifikacije za temperaturu od 190 °C iznosilo je 48 h, dok je za modifikaciju na 215 °C bilo potrebno utrošiti 58,7 h (Prilog 1 Slika 3). Po zavšetku termičke modifikacije svim formatima izmerena je boja, a zatim su upakovani i transportovani natrag u Sremsku Mitrovicu, na dalju obradu. Takođe, iz svake šarže uzimani su uzorci furnira kojima je merana masa i koji su kasnije sušeni do apsolutno suvog stanja da bi se izračunala vlažnost furnira posle termičke modifikacije. Izgled topolovih formata posle termičke modifikacije prikazan je na Slici 24.



Slika 24. Izgled topolovog furnira posle termičke modifikacije. Tretman na 190 °C (gore levo); Tretman na 200 °C (gore desno); Tretman na 210 °C (dole levo); Tretman na 215 °C (dole desno)

5.3 Merenje boje

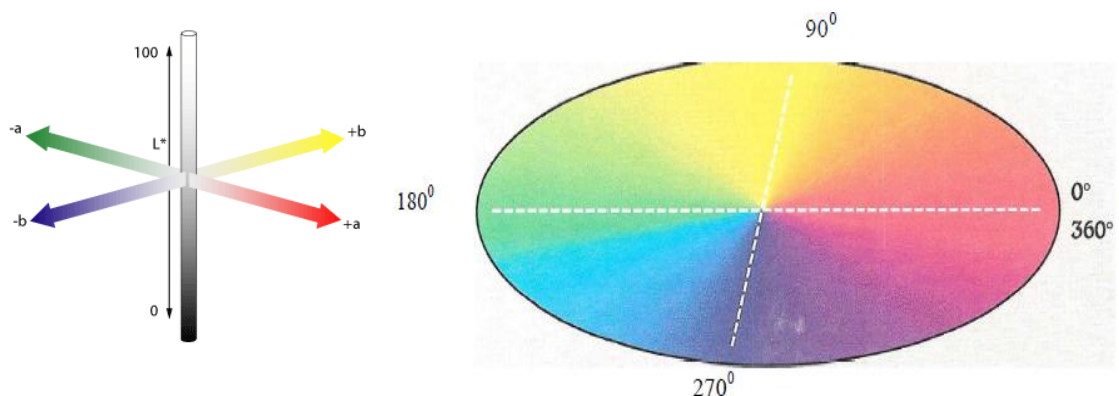
Da bi se odredio uticaj termičke modifikacije na promenu boje topolovog furnira, na svim formatima je merena boja pre i posle termičke modifikacije. Merenje je obavljeno pomoću BYK kolorimetra (BYK Gardner GmbH). Kolorimetar je bio podešen tako da je korišćeno D65 osvetljenje i ugao posmatrača od 10° . Opseg merenih talasnih dužina je iznosio od 400 do 700 nm, a prečnik senzora kolorimetra je bio 11 mm.

Svaki format je meren na 5 mernih mesta (Slika 25), a za rezultat je uzimana srednja vrednost ovih pet merenja. Merna mesta su bila sredina formata i četiri ugla (udaljena za 10 cm od svake ivice). U slučaju da se na predviđenom mernom mestu nalazila greška građe ili pukotina, merenje je vršeno na najbližoj površini bez ovakvih nedostataka.



Slika 25. Formati furnira pre (levo) i posle termičke modifikacije (desno). Sa X su označena merna mesta za merenje boje furnira

Rezultati merenja pomoću BYK kolorimetra iskazani su pomoću CIELAB sistema boja. U ovom koordinatnom sistemu (Slika 26) vrednost koordinate L^* se kreće od 100 za svetlo do 0 za tamno, vrednost a^* se kreće od crvene ($+a^*$) do zelene ($-a^*$), a vrednost b^* se kreće od žute ($+b^*$) do plave ($-b^*$).



Slika 26. CIELAB koordinatni sistem boja (internet baza podataka)

Na osnovu izmerenih vrednosti koordinata L^* , a^* i b^* (pre i posle termičkih tretmana), izračunat je uticaj termičke modifikacije na promenu boje preko sledećih parametara:

$$\Delta L = L^*_m - L^*_0 \quad (4)$$

$$\Delta a = a^*_m - a^*_0 \quad (5)$$

$$\Delta b = b^*_m - b^*_0 \quad (6)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (7)$$

gde je:

- ΔL - promena koordinate L^* posle termičke modifikacije;
- L^*_0 - vrednost koordinate L^* pre termičke modifikacije;
- L^*_m - vrednost koordinate L^* posle termičke modifikacije;
- Δa - promena koordinate a^* posle termičke modifikacije;
- a^*_0 - vrednost koordinate a^* pre termičke modifikacije;
- a^*_m - vrednost koordinate a^* posle termičke modifikacije;
- Δb - promena koordinate b^* posle termičke modifikacije;
- b^*_0 - vrednost koordinate b^* pre termičke modifikacije;
- b^*_m - vrednost koordinate b^* posle termičke modifikacije;
- ΔE – promena boje.

Da bi se ustanovilo da li su termički tretmani doveli do smanjenja razlike u boji između formata iz zone srčevine, međuzone i zone beljike, korišćena je Tabela 5.

Tabela 5. Klasifikacija razlike u boji preko ΔE (Allegretti 2009)

r.b.	Promena boje - ΔE	Opis
1.	$\Delta E < 0,2$	Nema vidljive razlike
2.	$0,2 \leq \Delta E < 2$	Mala razlika
3.	$2 \leq \Delta E < 3$	Razlika u boji vidljiva na ekranu visokog kvaliteta
4.	$3 \leq \Delta E < 6$	Razlika u boji vidljiva na ekranu srednjeg kvaliteta
5.	$6 \leq \Delta E < 12$	Velika razlika u boji
6.	$\Delta E \geq 12$	Različite boje

5.4 Izrada furnirskih ploča

Prva faza pri izradi ploča od termički modifikovanog topolovog furnira, bila je skraćivanje formata na dimenzije 80x80 cm. Ova operacija je izvršana na paketnim makazama, a vođeno je računa da se odstrani onaj deo formata koji je pretrpeo veća oštećenja tokom termičke modifikacije i transporta. Tokom ove operacije je ujedno vršena i selekcija formata. Iz svake grupe (kontrolne i četiri termički modifikovane), odabrani su formati sa manje grešaka za lice i naličje, kao i formati koji su zadovoljavali kriterijume za postavljanje u srednjicu ploče.

Od izabranih formata formirane su grupe predviđene za presovanje, od kojih je ukupno proizvedeno 78 ploča (Tabela 6). Svaka grupa se sastojala od pet formata, koji su mogli biti netretirani (kontrolni), mešavina tretiranih i netretiranih ili sastavljena samo od termički modifikovanog furnira. Ovakvim kombinovanjem formata dobijena su četiri različita tipa petoslojnih furnirskih ploča:

- 5N – ploče sastavljene samo od netretiranog topolovog furnira (kontrolne);
- T3NT – ploče sa spoljnim listovima od tretiranog furnira i srednjicom od netretiranog furnira;
- TNTNT – ploče sastavljene naizmeničnim slaganjem tretiranog i netretiranog furnira;
- 5T – ploče sastavljene samo od termički tretiranog furnira.

Tabela 6. Tipovi izrađenih ploča

Režim \ Tip ploče	5N	T3NT	TNTNT	5T	Ukupno:
Kontrolna	6 kom.	-	-	-	6 kom.
190°C	-	6 kom.	6 kom.	6 kom.	18 kom.
200°C	-	6 kom.	6 kom.	6 kom.	18 kom.
210°C	-	6 kom.	6 kom.	6 kom.	18 kom.
215°C	-	6 kom.	6 kom.	6 kom.	18 kom.
Ukupno:	6 kom.	24 kom.	24 kom.	24 kom.	78 kom.

Pre operacije presovanja izvršene su još operacije nanošenja lepka i formiranja sendviča za presovanje. Lepak je nanošen kontaktnom metodom pomoću nanosačice sa valjcima sa ručnim ulaganjem listova furnira. Kako se na ovoj mašini lepak istovremeno nanosi na obe površine tretiranog lista, lepak je nanošen samo na 2. i 4. list svake ploče, čime je obezbeđeno da se između svake dve površine buduće ploče nalazi sloj lepka. Pri izradi ploča korišćen je MUF (melamin-ureaformaldehidni) lepak firme Sanelco, karakteristika prikazanih u Tabeli 7. Predviđeni nanos lepka bio je 200 g/m^2 , a uzorkovanja su pokazala da je prosečni nanos iznosio 204 g/m^2 .

Tabela 7. Sastav, fizičke i hemijske karakteristike lepka korišćenog u eksperimentu

Supstanca	Procenat
MUF smola	62,0-66,0%
Sadržaj melamina u smoli	15%
Formaldehid	0,1-0,2%
Voda	34,0-38,0%
Agregatno stanje na 20°C i 1013 hPa:	viskozna tečnost
Boja:	Bela
Miris:	blagi miris formaldehida
pH vrednost:	8,0-10,0 na 25 °C
Specifična težina:	1,285-1,295 g/ml
Rastvorljivost u vodi:	Mešljivo
Viskozitet:	200-400 cP

Prilikom formiranja “sendviča” za presovanje posebno se obraćala pažnja ne sledeće stvari:

- da se sa spoljašnjih strana (lice i naličje) postave bolji listovi furnira;
- da su listovi furnira u budućoj ploči postavljeni tako da su im pukotine (slobodna strana pri ljuštenju) okrenute ka srednjici ploče;
- da je pravac prostiranja vlakana upravan između dva susedna formata, tj. 1., 3. i 5. format su imali upravne pravce u odnosu na 2. i 4. format (Slika 27).



Slika 27. Formiranje “sendviča” za presovanje

Presovanje je obavljeno u devetoetažnoj presi firme “Pagnoni”, po sledećem režimu presovanja:

Temperatura – 100 °C

Pritisak – 1 MPa

Vreme presovanja – 15 min.

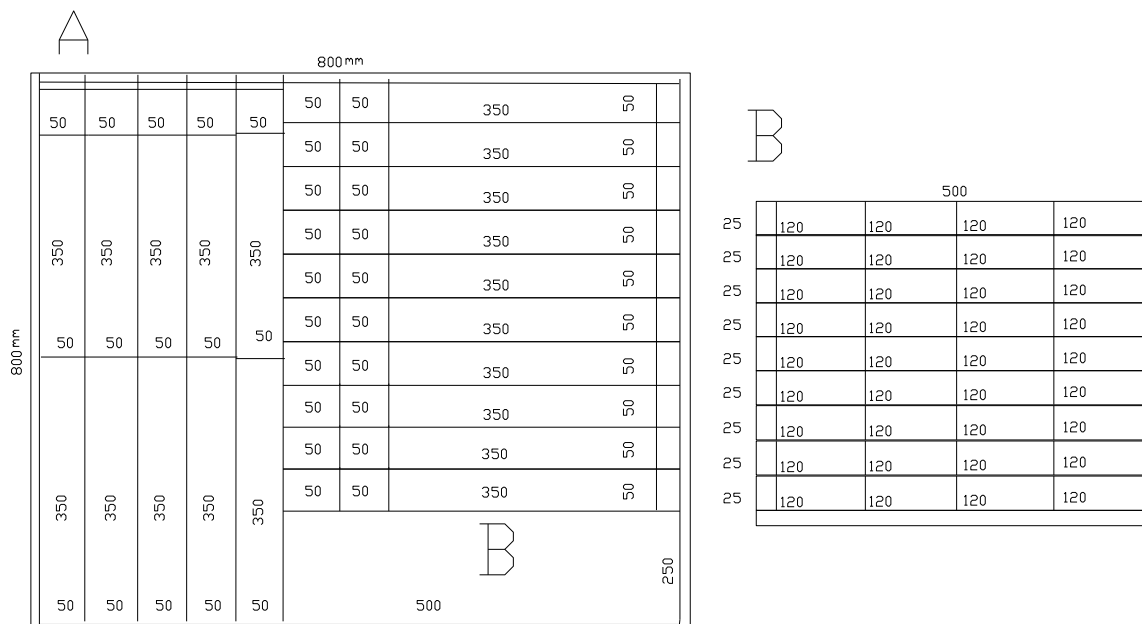
Prema dimenzijama etaža prese, bilo je moguće presovati po tri ploče u jednoj etaži, odnosno svih 78 ploča su izradene za tri ciklusa presovanja (Slika 28).



Slika 28. Priprema za presovanje (levo) i presovanje ploča (desno)

5.5 Izrada epruveta i ispitivanje

Nakon završenog ciklusa presovanja, gotove ploče su transportovane do Šumarskog fakulteta, gde su odležale nekoliko nedelja radi kondicioniranja u klimi vazduha približnoj sobnim uslovima ($\phi=65\%$ i $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$), a zatim je pristupljeno izradi uzoraka za ispitivanje. Svaka ploča je razrezivana prema priloženoj šemi (Slika 29). Pre izrade epruveta, svakoj ploči je sa svih strana odstranjen deo radi ravnjanja i radi uklanjanja dela koji nije slepljen (preklopi formata furnira).



Slika 29. Šema krojenja ploča pri izradi epruveta

Na ovaj način je iz svake ploče dobijeno:

- 10 epruveta dimenzija 350x50 mm \perp na vlakna spoljnog sloja ploče;
- 10 epruveta dimenzija 350x50 mm \parallel sa vlaknima spoljnog sloja ploče;
- 25 epruveta dimenzija 50x50 mm;
- 36 epruveta dimenzija 120x25 mm \parallel sa vlaknima spoljnog sloja ploče.

Po izrezivanju epruveta izvršeno je njihovo obeležavanje i odvajanje za ispitivanje odgovarajućih fizičkih i mehaničkih svojstava (Slika 30).



Slika 30. Izradene epruvete za ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstava

5.5.1 Promena vlažnosti i debljine nad vodom

Iz svake ploče izdvojeno je 5 epruveta (po tretmanu 30 kom. - 6x5) dimenzija 50x50 mm, kojima su izmerene dimenzije i masa. Ove epruvete su zatim stavljene u laboratorijsku sušnicu i osušene su do apsolutno suvog stanja na temperaturi 103 °C. Po završetku sušenja, epruvetama su ponovo merene dimenzije i masa. Na osnovu ovih podataka bio je moguće izračunati kolika je bila vlažnost kondicioniranih ploča (v_k), kolika je bila gustina kondicioniranih ploča (ρ_k) i kolika je gustina ploča u apsolutno suvom stanju (ρ_0):

$$v_k = \frac{M_{iz} - M_0}{M_0} \times 100 (\%) \quad (8)$$

$$\rho_k = \frac{M_{iz}}{V_{iz}} \left(\frac{g}{cm^3} \right); \quad \rho_0 = \frac{M_0}{V_0} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (9)$$

gde je:

- v_k - vlažnost kondicionirane ploče (%);
- M_{iz} - masa epruvete po izrezivanju (g);
- M_0 - masa epruvete u apsolutno suvom stanju (g);
- V_{iz} - zapremina epruvete po izrezivanju (cm³);
- V_0 - zapremina epruvete u apsolutno suvom stanju (cm³);
- ρ_k - gustina kondicionirane ploče (g/cm³);
- ρ_0 - gustina ploča u apsolutno suvom stanju (g/cm³).

Nakon merenja masa i dimenzija, epruvete su postavljene u zatvorene kontejnere nad destilovanom vodom. Prvih nedelju dana svaki dan su im merene masa i debljina, a zatim je ovo rađeno na svakih nedelju dana dok se merene veličine nisu ustalile. Devete nedelje masa i debljina epruveta su prestale da se značajno menjaju, pa su epruvete potopljene u vodu na još dve nedelje kako bi se postiglo napojeno stanje vlažnosti.

Na osnovu izmerenih veličina, izračunato je kako se tokom vremena menjala vlažnost epruveta od apsolutno suvog do napojenog stanja u zavisnosti od tipa ploče i primenjenog termičkog tretmana (formula 8), odnosno koliko je bilo njihovo bubrenje:

$$\beta_{sx} = \frac{s_x - s_0}{s_0} \times 100 (\%) \quad (10)$$

gde je:

- β_{sx} - bubrenje po debljini (%);
- s_x - debljina epruvete određenog dana (mm);
- s_0 - debljina apsolutno suve epruvete (mm).

Pored promene vlažnosti i bubrenja, ove epruvete su upotrebljene i za određivanje uticaja termičkih tretmana i konstrukcija ploča na povećanje dimenzionalne stabilnosti. Ovo je urađeno preko ASE indikatora (anti swelling efficiency), na osnovu izračunatih ukupnih debljinskih bubrenja:

$$ASE = \frac{\beta_{u_{NT}} - \beta_{u_x}}{\beta_{u_{NT}}} \times 100 (\%) \quad (11)$$

gde je:

ASE - mera efikasnosti tretmana u odnosu na kontrolnu ploču (%);

$\beta_{u_{NT}}$ - ukupno debljinsko bubrenje kontrolnih ploča (%);

β_{u_x} - ukupno debljinsko bubrenje upoređivanog tipa ploče (%).

5.5.2 Kondicioniranje epruveta

Iz svake ploče izdvojene su tri grupe epruveta u kojoj su se nalazile: 5 epruveta 50x50 mm, 2 epruvete dimezija 350x50 mm upravne na vlakna spoljnog sloja ploče i 2 epruvete dimezija 350x50 mm paralelne sa vlaknima spoljnog sloja ploče. Na ovaj način je za svaki tip ploče (12 ispitivanih + kontrolna), izdvojeno tri puta po: 30 epruveta 50x50 mm, 12 epruveta 350x50 mm upravnih i 12 epruveta 350x50 mm paralelnih sa spoljnim slojem ploče.

Prva grupa je osušena do apsolutno suvog stanja i zatim su im ispitivane savojna čvrstoća, modul elastičnosti pri savijanju i tvrdoća. Ovim postupkom anuliran je uticaj vlažnosti na ispitivana mehanička svojstva, odnosno mogao se odrediti uticaj konstrukcije ploče i termičkog tretmana na ispitivana svojstva.

Druge dve grupe transportovane su u fabriku "Tarkett" gde su kondicionirane u njihovoj industrijskoj klima komori (Slika 31) na temperaturi od 22 °C i relativnoj vlažnosti vazduha od 30 odnosno 60%. Kondicioniranje je trajalo četiri nedelje, a po isteku ovog perioda epruvete su složene u kontejnere koji su zavijani u streč traku. Tako upakovani uzorci su vraćeni na Šumarski fakultet. Svakoj grupi su ispitivana ista svojstva kao i prvoj, a po završetku ispitivanja, epruvete 50x50 mm su osušene do apsolutno suvog stanja, kako bi se mogla odrediti vlažnost kondicioniranih epruveta (formula 8).



Slika 31. Kondicioniranje epruveta u klima komori firme “Tarkett”

5.5.3 Ispitivanje tvrdoće ploča

Tvrdoća je ispitivana po metodi Brinela na epruvetama dimenzija 50x50 mm. Utiskivanje kuglice prečnika 10 mm vršeno je silom od 500 N na sredini svake epruvete. Ova sila je izabrana jer je prosečna gustina u apsolutno suvom stanju svih konstrukcija ispitivanih ploča prelazila 350 kg/m³. Tvrdoća je određena preko formule:

$$H = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ (MPa)} \quad (12)$$

gde je:

H – tvrdoća po Brinelu (MPa);

F – sila utiskivanja kuglice (500 N);

D – prečnik kuglice (10 mm);

d – prečnik otiska kuglice (srednja vrednost dva unakrsna merenja mm).

Tvrdoća je ispitivana na epruvetama osušenim do apsolutno suvog stanja i epruvetama kondicioniranim na 30 i 60% relativne vlažnosti vazduha. Iz svake ploče je za svaku vlažnost ispitivano po 5 epruveta, odnosno po 30 epruveta za svaki tip ploče. Tvrdoća je ispitivana na mašini Wood tester WT4 koja se nalazi u Laboratoriji za svojstva drveta na Šumarskom fakultetu u Beogradu.

5.5.4 Ispitivanje savojne čvrstoće i modula elastičnosti

Savojna čvrstoća i modul elastičnosti određeni su prema standardu EN 310 na epruvetama dimenzija 350x50 mm. Dimezije su uzete u skladu sa standardom koji propisuje da širina epruveta iznosi 50 mm, a dužina zavisi od debljine ispitivane ploče odnosno:

$$L = 20 \times t_p + 50 \text{ (mm)} \quad (13)$$

gde je:

L – dužina epruvete za ispitivanje savojne čvrstoće (mm);

t_p – debljina ploče (15 mm).

Ispitivanje je vršeno na mašini Wood tester WT4, sa mogućnošću automatskog merenja primenjene sile i ugiba epruvete tokom ispitivanja. Rastojanje oslonaca iznosilo je 300 mm, a prirast sile je tako izabran da do loma epruvete dođe u vremenskom intervalu od 60 ± 30 s.

Za ispitivanje su iz svake ploče uzete po 2 epruvete paralelne i 2 epruvete upravne na tok vlakana spoljnog sloja ploče. Ukupan broj epruveta po tipu ploče iznosio je po 12 za svaki pravac. Ispitivanje je kao i kod ispitivanje tvrdoće vršeno na epruvetama osušenim do apsolutno suvog stanja i kondicioniranim na 30 i 60% relativne vlažnosti vazduha. Savojna čvrstoća (paralelna i upravna na tok vlakana gornjeg sloja) je izračunata preko formule:

$$\sigma_{sav} = \frac{3 \times F_{max} \times l}{2 \times b \times t^2} \text{ (MPa)} \quad (14)$$

gde je:

σ_{sav} - savojna čvrstoća u ispitivanom pravcu (MPa);

F_{max} – izmerena sila u trenutku loma epruvete (N);

l – rastojanje između oslonaca (300 mm);

b – širina epruvete (mm);

t – debljina epruvete (mm).

Modul elastičnosti je takođe izmeren za oba pravca preko formule:

$$E_m = \frac{l^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t^3 \times (a_2 - a_1)} \quad (\text{MPa}) \quad (15)$$

gde je:

E_m – modul elastičnosti u ispitivanom pravcu (MPa);

F_2 – 40% od ukupne sile loma epruvete (N);

F_1 – 10% od ukupne sile loma epruvete (N);

a_2 – izmerena vrednost ugiba pri sili F_2 (mm);

a_1 – izmerena vrednost ugiba pri sili F_1 (mm).

Na osnovu izračunatih srednjih vrednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti, bilo je moguće izvršiti i klasifikaciju ploča prema standardu EN 636. U skladu sa odredbama ovog standarda, poređenje se ne vrši preko dobijenih srednjih vrednosti, već preko izračunatih donjih pet posto (*lower 5 percentile values* - $L_{5\%}$), koji se računaju kao što je prikazano u formuli:

$$L_{5\%} = \bar{x} - t \times SD(\delta_{n-1}) \quad (16)$$

gde je:

$L_{5\%}$ - donjih pet posto (MPa);

\bar{x} - srednja vrednost (MPa);

t - tablična vrednost koeficijenta koja zavisi od broja uzoraka;

$SD(\sigma_{n-1})$ - standardna devijacija ispitivanog svojstva (MPa).

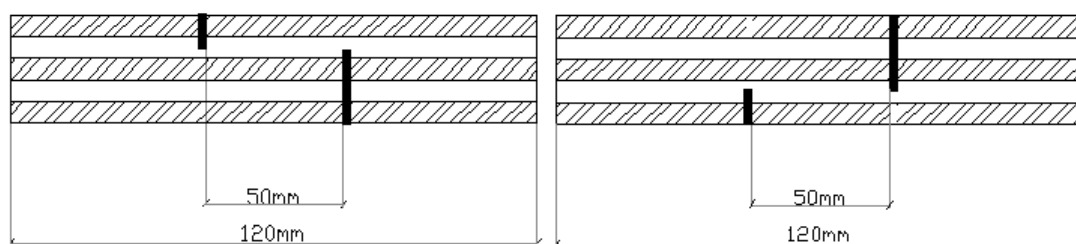
Uključivanjem standardne devijacije u gornju formulu, može se desiti da se neke ploče (iako imaju veću srednju vrednost od drugih), svrstaju u nižu kategoriju zbog veće standardne devijacije. Na ovaj način se kupac čuva od prevelikog osciliranja kvaliteta pojedinih šarži proizvoda.

5.5.5 Ispitivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka

Smicajna čvrstoća u sloju lepka ispitivana je prema zahtevima standarda EN 314-1 i EN 314-2. Za ispitivanje su korišćene epruvete dimenzija 120x25 mm, sa pravcem prostiranja vlakana paralelnim sa spoljnim slojem ploče (u smeru dužine epruvete).

U skladu sa odredbama ovih standarda, na epruvetama su urezivani zaseci na rastojanju od 50 mm sa suprotnih strana epruvete. Zaseci su napravljeni tako da se istovremeno ispituje smicajna čvrstoća u sloju lepka dve susedne lepljene površine. U slučaju petoslojnih ploča, postoje četiri linije lepljenja, odnosno potrebno je napraviti dva tipa epruveta – Slika 32.

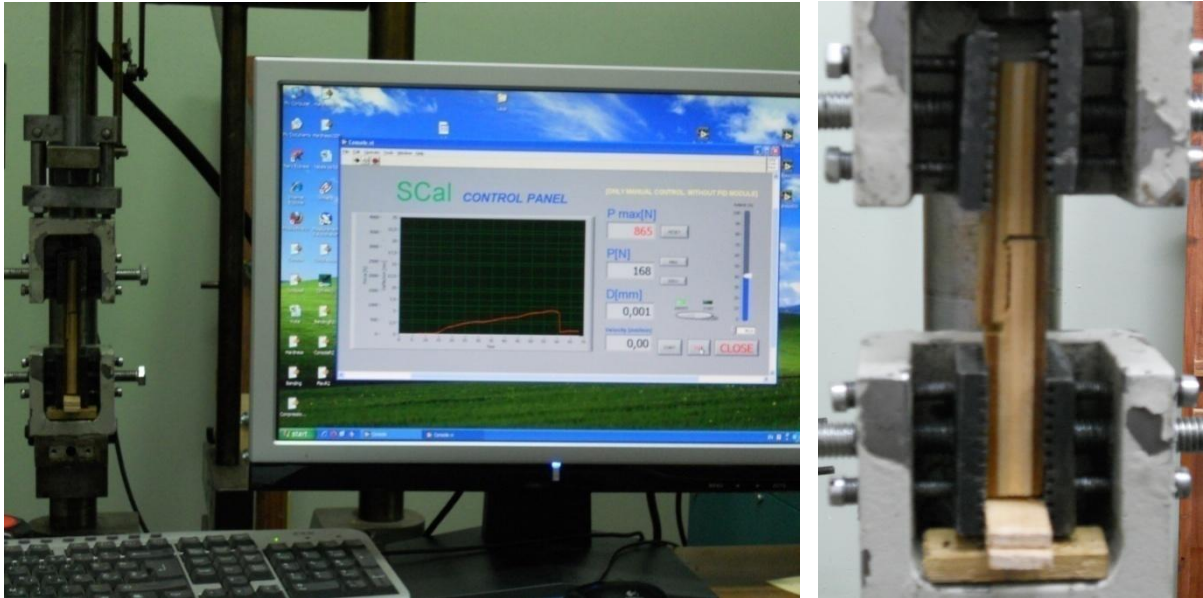
Ispitivanja su vršena za tri tipa vodootpornosti ploča tj. za ploče koje se koriste u suvim uslovima, za ploče koje se koriste u vlažnim uslovima i za ploče koje se koriste u eksterijeru (standard EN 636).



Slika 32. Izgled epruveta za ispitivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka

Pre nego što je ispitana smicajna čvrstoća na mašini WT4 (Slika 33), bilo je potrebno izvršiti različite predtretmane za svaku klasu vodootpornosti:

- **Za suve uslove** epruvete su potopljenene 24 h u vodu temperature 20 °C;
- **Za vlažne uslove** epruvete su pre ispitivanja potopljenene 6 h u ključalu vodu, a zatim 1 h u vodu temperature 20 °C;
- **Za spoljašnje uslove** epruvete su potopljenene 4 h u ključalu vodu, potom su sušene 20 h u laboratorijskoj sušnici na temperaturi od 60 °C. Po završetku ove faze ponovo su potopljenene 4 h u ključalu vodu i na kraju 1 h u vodu temperature 20 °C.



Slika 33. Ispitivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka na mašini “WT4”

Iz svake ploče izdvojene su po dve epruvete za svaki par linija lepljenja (4 kom.), odnosno po tipu ploče 24 komada. Ukupno je za određivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka ispitano 24 x 13 (tip ploče) x 3 (klase vodootpornosti) 936 epruveta.

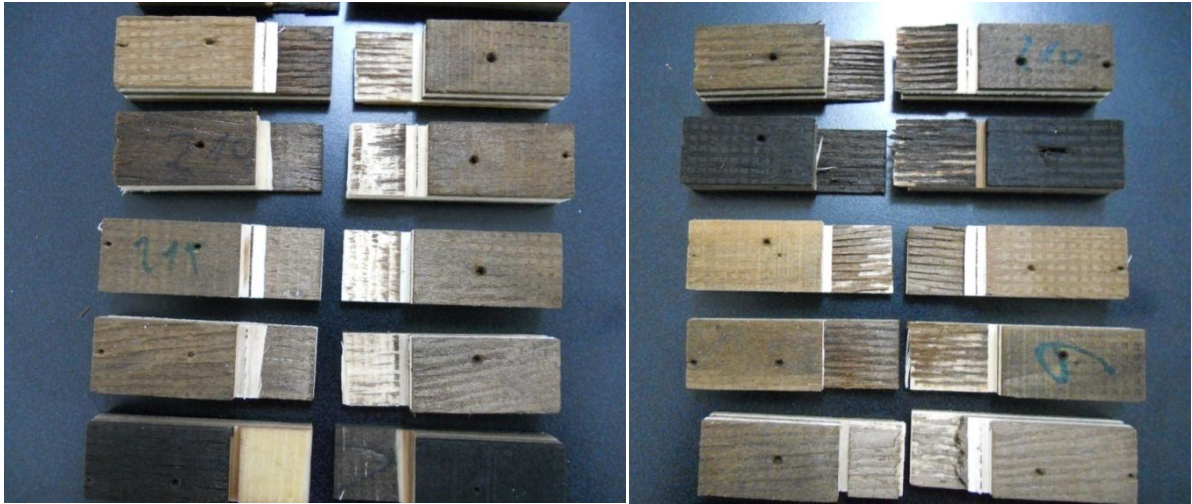
Smicajna čvrstoća u sloju lepka određena je preko formule:

$$\sigma_{sm} = \frac{F_{max}}{l_l \times b_l} \text{ (MPa)} \quad (17)$$

gde je:

- σ_{sm} – smicajna čvrstoća u sloju lepka (MPa);
- F_{max} – dostignuta sila u trenutku loma epruvete (N);
- l_l – dužina ispitivane linije lepljenja (50 mm);
- b_l – širina ispitivane linije lepljenja (25 mm).

Da bi došli do zaključka da li neka ploča ispunjava minimalne zahteve standarda za određenu klasu vodootpornosti, pored izračunate smicajne čvrstoće, potrebno je bilo ustanoviti i koliko je učešće loma epruvete u zoni drveta, odnosno u zoni lepka. U skladu sa odredbama standarda EN 314-1, vizuelnim putem je određivano učešće loma u zoni drveta, a gradacija je vršena na po 10%. Primeri loma epruveta od 0 do 100% u zoni drveta su prikazani na Slici 34.



Slika 34. Izgled epruveta sa različitim učešćem loma u zoni drveta i lepka

Kada je za svaki tip ploča određena prosečna smicajna čvrstoća i prosečno učešće loma po zoni drveta, zaključivanje da li su ispunjeni uslovi za prolaz testa vršeno je prema Tabeli 8.

Tabela 8. Opšti uslovi za prolaz testa vodootpornosti

Ako je	$0,2 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{sm}} < 0,4 \text{ MPa}$	$w \geq 80\%$
Ako je	$0,4 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{sm}} < 0,6 \text{ MPa}$	$w \geq 60\%$
Ako je	$0,6 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{sm}} < 1 \text{ MPa}$	$w \geq 40\%$
Ako je	$1 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{sm}}$	w - nebitno

gde je:

σ_{sm} - smicajna čvrstoća u sloju lepka u MPa;

w - lom epruveta po zoni drveta u %.

U skladu sa zahtevima standarda EN 314-1, sve epruvete koje su pukle van ispitivane zone (Slika 35), izbacivane su iz daljeg proračuna.



Slika 35. Primeri epruveta koje su pukle van ispitivane zone

5.5.6 Statistička obrada podataka

Za crtanje grafika i određivanja osnovnih statističkih pokazatelja (srednja vrednost, max., min., standardna devijacija, koef. varijacije, standardna greška ispitivanja), korišćen je Microsoft Excel 2007 kompjuterski program.

Određivanje značajnosti razlika dobijenih srednjih vrednosti rađeno je pomoću SPSS programa (verzija 20). Kako je poređenje rađeno za 13 tipova ploča istovremeno, značajnost razlike je utvrđivana preko jednosmerne ANOVE. U slučaju kada su ispitivani uzorci imali jednaku varijansu korišćen je Tukey post hoc test (Del Menezzi et al. 2009, Skyba et al. 2009), a kada bi ispitivanje pomoću Levene testa pokazalo da je varijansa uzoraka nejednaka, korišćen je Bonferroni post hoc test (Rathke et al. 2012a, Rathke et al. 2012b). Kod oba post hoc testa korišćen je nivo značajnosti od 95%.

6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I ANALIZA

6.1 Uticaj termičkih tretmana na svojstva furnira topole

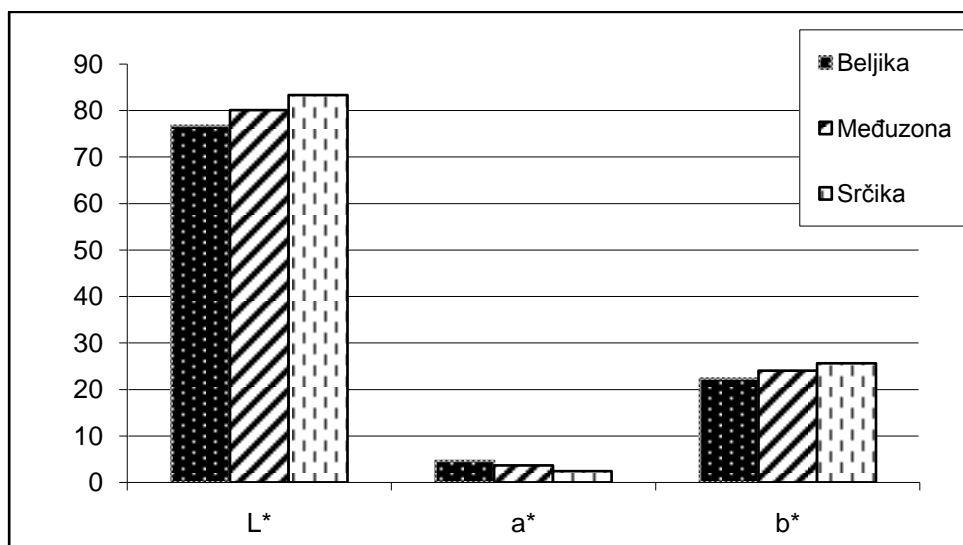
6.1.1 Boja furnira topole pre termičke modifikacije

Ljuštenjem trupaca topole dobija se furnir različite boje. Furnir nastao iz zone beljike svetliji je od furnira dobijenog iz zone lažne (mokre) srčevine (Slika 36). Ovo može prouzrokovati probleme, pogotovo pri izradi formata furnira za lice i naličje gde (u zavisnosti od namene proizvoda) ova razlika nije tolerantna, odnosno može smanjiti klasu kvaliteta gotovog proizvoda. Razlika u boji može se smanjiti koršćenjem izbeljivača poput vodonik peroksida, sredstava na bazi hlora i sredstava na bazi oksalne kiseline. Nasuprot izbeljivačima, termička modifikacija doprinosi potamnjenju boje tretiranog drveta, a veličina promene će zavisiti od primenjene temperature i dužine tretmana.



Slika 36. Komadi furnira dobijeni iz različiti zona. Slovom B su označeni komadi izrađeni iz beljike, a slovom T iz lažne srčevine

Razultati meranja boje furnira dobijenih iz beljike, međuzone i zone srčike prikazani su na Slici 37 i u Tabeli 9. Ovi rezultati se odnose na sve izrađene formate furnira topole, bez obzira da li su raspoređeni u kontrolnu ili neku od grupa predviđenih za termičku modifikaciju.



Slika 37. Prosečne vrednosti parametara boje netretiranog topolovog furnira u CIELAB koordinatnom sistemu boja

Tabela 9. Osnovni statistički pokazatelji izmerene boje topolovog netretiranog furnira u CIELAB koordinatnom sistemu boja

STATISTIČKI POKAZATELJI	SRČIKA			MEĐUZONA			BELJIKA		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
N	224	224	224	64	64	64	64	64	64
\bar{x}	76,71	4,63	22,34	80,06	3,68	24,01	83,33	2,42	25,59
SD (σ_{n-1})	2,24	0,83	1,19	2,03	0,77	1,35	1,44	0,75	1,02
KOV (v)	2,92	18,01	5,32	2,54	20,85	5,63	1,72	31,15	3,97
SG ($\phi_{\bar{x}}$)	0,15	0,06	0,08	0,25	0,10	0,17	0,18	0,09	0,13

Posmatrajući izračunate vrednosti standardnih devijacija (SD) uočava se da parametar L* najviše varira u odnosu na srednju vrednost. Ovo je posledica načina merenja, gde su merna mesta unapred definisana, bez obzira da li ona zahvataju deo nastao iz srčike ili beljike. Kako se razlika u boji furnira iz srčike i beljike pre može okarakterisati kao tamnija ili svetlija (a ne kao žuća ili plavljia, odnosno crvenija ili zelenija), tako su i ove varijacije najviše uticale na parametar L*. Zbog značajno većeg broja formata (N) iz zone srčike, standardna greška merenja (SG) kod ovih formata je najmanja.

Kada se uporede parametri boje, primetno je da vrednosti koordinata L* i b* rastu od srčike ka beljici, dok se vrednost koordinate a* smanjuje. Pri tome su ove promene

između posmatranih grupa vrlo ravnomerne, tako da vrednost koordinate L* raste približno za po 3,3; koordinata a* opada za oko 1; a koordinata b* raste za oko 1,6 jedinica. Da postoji razlika u boji između furnira iz zone beljike, međuzone i zone srčike, potvrđeno je preko parametra ΔE (Tabela 10). U tabeli je prikazana razlika u boji između svih izrađenih formata furnira topole.

Tabela 10. Prosečna razlika u boji (ΔE) između furnira iz zone beljike, međuzone i zone srčike

Poređenje	ΔE	Opis
Srčika – Međuzona	3,86	Razlika u boji vidljiva na ekranu srednjeg kvaliteta
Međuzona – Beljika	3,84	Razlika u boji vidljiva na ekranu srednjeg kvaliteta
Srčika – Beljika	7,69	Velika razlika u boji

Na skali od 1-6, izračunate vrednosti razlike u boji se nalaze u kategoriji 4 (pri poređenju furnira iz srčike i međuzone i međuzone i beljike), odnosno u kategoriji 5 kad se uporede formati furnira iz zone srčike i zone beljike. Na osnovu ovih rezultata, može se zaključiti da postoji značajna razlika u boji furnira nastalog iz različitih zona drveta topole pre termičke modifikacije.

6.1.2 Boja furnira topole posle termičke modifikacije

U Tabelama 11-14 prikazani su rezultati merenja boje topolovog furnira posle termičkih tretmana. Vrednosti iz tabela pokazuju da je u odnosu na netretirani furnir (Tabela 9), došlo do promene, tako da se posle termičkih tretmana vrednosti komponenata boje L* i b* smanjuju od srčevine ka beljici (izuzetak b* na 210 °C), dok je komponenta a* poprilično ujednačena kod svih tretmana. Manji broj uzoraka po pojedinom tretmanu, doprineo je povećanju SG kod svih tretmana za sve tri komponente boje.

Tabela 11. Boja toplovih furnira posle termičkog tretmana na 190 °C

STATISTIČKI POKAZATELJI	TRETMAN - 190 °C								
	SRČIKA			MEĐUZONA			BELJIKA		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
N	56	56	56	16	16	16	16	16	16
\bar{x}	45,19	11,90	24,50	39,36	12,53	22,74	37,82	12,61	22,06
SD (σ_{n-1})	4,60	0,69	1,95	3,19	0,65	2,30	1,66	0,72	1,85
KOV (v)	10,17	5,82	7,98	8,11	5,20	10,13	4,40	5,70	8,37
SG (ϕ_x)	0,61	0,09	0,26	0,80	0,16	0,58	0,42	0,18	0,46

Tabela 12. Boja toplovih furnira posle termičkog tretmana na 200 °C

STATISTIČKI POKAZATELJI	TRETMAN - 200 °C								
	SRČIKA			MEĐUZONA			BELJIKA		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
N	56	56	56	16	16	16	16	16	16
\bar{x}	36,09	10,83	19,77	30,94	9,85	16,10	29,73	10,16	15,93
SD (σ_{n-1})	2,28	0,76	2,01	1,48	0,89	1,70	1,12	0,82	1,53
KOV (v)	6,32	7,06	10,15	4,78	9,02	10,58	3,76	8,10	9,62
SG (ϕ_x)	0,30	0,10	0,27	0,37	0,22	0,43	0,28	0,21	0,38

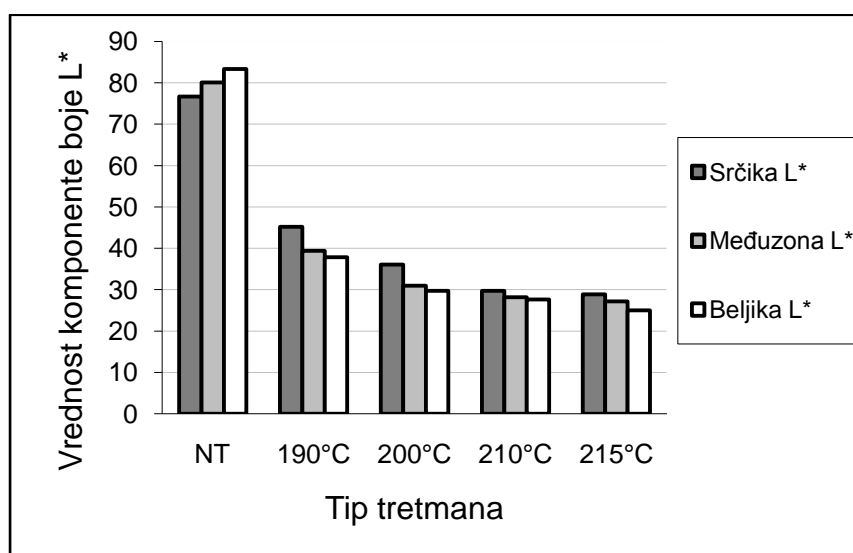
Tabela 13. Boja toplovih furnira posle termičkog tretmana na 210 °C

STATISTIČKI POKAZATELJI	TRETMAN - 210 °C								
	SRČIKA			MEĐUZONA			BELJIKA		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
N	56	56	56	16	16	16	16	16	16
\bar{x}	29,74	8,71	14,73	28,19	8,61	13,72	27,62	8,90	14,14
SD (σ_{n-1})	2,18	1,01	2,05	2,44	1,42	2,80	2,01	1,26	2,26
KOV (v)	7,35	11,62	13,89	8,67	16,44	20,40	7,27	14,16	15,98
SG (ϕ_x)	0,29	0,14	0,27	0,61	0,35	0,70	0,50	0,31	0,56

Tabela 14. Boja toplovnih furnira posle termičkog tretmana na 215 °C

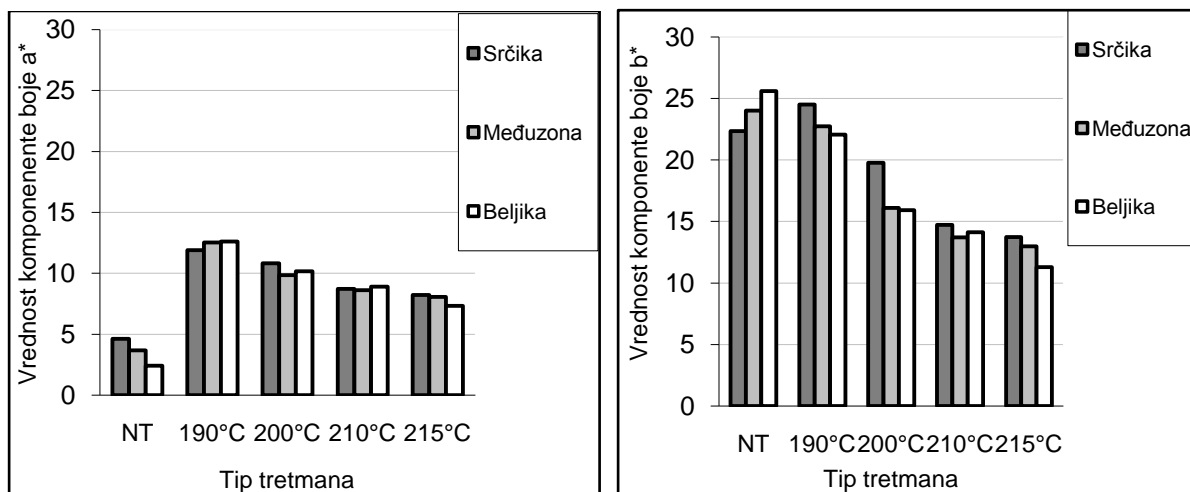
STATISTIČKI POKAZATELJI	TRETMAN - 215 °C								
	SRČIKA			MEĐUZONA			BELJIKA		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
N	56	56	56	16	16	16	16	16	16
\bar{x}	28,87	8,22	13,75	27,20	8,07	12,98	24,98	7,34	11,29
SD (σ_{n-1})	1,71	0,79	1,70	1,43	0,85	1,70	1,13	0,80	1,46
KOV (v)	5,94	9,66	12,36	5,26	10,55	13,07	4,50	10,86	12,92
SG (ϕ_x)	0,23	0,11	0,23	0,36	0,21	0,42	0,28	0,20	0,36

Ako se izdvojeno posmatra komponenta boje L* (Slika 38), rezultati pokazuju da su formati tretirani na višoj temperaturi tamniji od istog tipa formata tretiranog na nižoj temperaturi, kao i od netretiranih formata. Ovo je bilo očekivano i u skladu sa prethodnim istraživanjima (Schnabel et al. 2007, Gonzales-Pena et al. 2009...), po kojima tretirani uzorci dobijaju tamniju boju sa povišenjem temperature termičkih tretmana. Sa grafika se može videti i da su posle svakog ispitivanog tretmana najtamniji formati bili formati iz zone beljike, a najsvetliji iz zone srčike - što je suprotno u odnosu na netretirani furnir kod koga su najsvetliji bili furniri iz zone beljike, a najtamniji iz zone srčike.



Slika 38. Prosečne vrednosti komponente boje L* furnira topole iz različitih zona, pre i posle termičkih tretmana

Slično komponenti L* ponašala se i komponenta boje b* (Slika 39 - desno), uz tu razliku da su vrednosti ove komponente posle najslabijeg tretmana bile približno iste kao kod netretiranog furnira. Nasuprot komponentama L* i b*, posle svih ispitivanih tretmana, vrednosti komponente boje a* su bile veće u odnosu na netretirani furnir za sve tri kategorije furnira (Slika 39 - levo). Kada se međusobno porede samo termički tretirani formati, komponenta boje a* opada sa povišenjem temperature tretmana. Ovi rezultati se skoro u potpunosti podudaraju sa rezultatima istraživanja Gonzales-Pena et al. (2009), po kojem tokom termičkih tretmana samo komponenta L* konstantno opada, dok udeo crvene i žute boje u početku raste i tek kasnije počinje da se smanjuje.



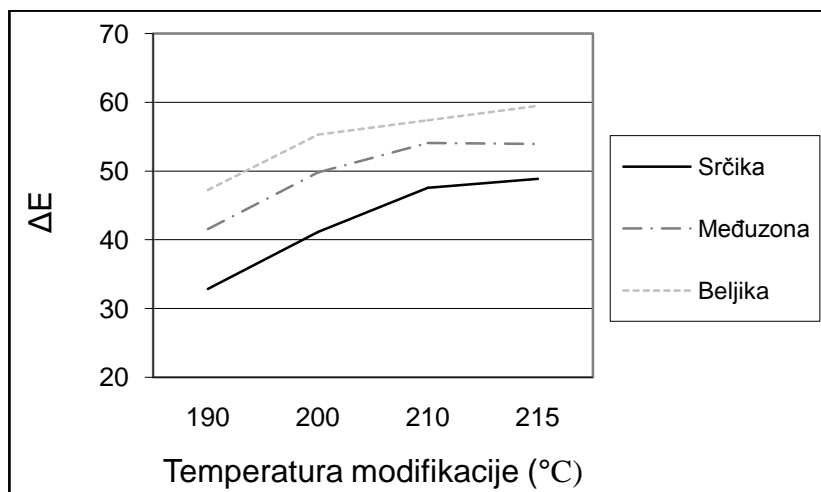
Slika 39. Prosečne vrednosti komponente boje a* (levo) i b* (desno) furnira topole iz različitih zona, pre i posle termičkih tretmana

Najveću razliku u vrednosti pre i posle termičkih tretmana pravi komponenta L*, usled čega je ova komponenta najodgovornija za ukupnu promenu boje (ΔE). Ukupna razlika u boji između pojedinih grupa furnira pre i posle termičke modifikacije prikazana je na Slici 40. Kod svih tretmana najveću promenu boje su pokazali formati izrađeni iz zone beljike, zatim iz međuzone, a najmanju iz srčike. Statistička analiza pokazala je da postoji značajna razlika u promeni boje (na nivou od 95%) kod svih tretmana za sve posmatrane parove (srčika-međuzona, međuzona-beljika i beljika-srčika):

190 °C - $F(2,85)=68.03$, $p<.05$; 200 °C - $F(2,85)=144.79$, $p<.05$;
 210 °C - $F(2,85)=57.42$, $p<.05$; 215 °C - $F(2,85)=77.96$, $p<.05$.

Analiza razlika srednjih vrednosti urađena je preko Bonferroni post hoc testa, pošto je Levene test pokazao da furniri modifikovani na 210 °C i 215 °C nemaju homogenu varijansu:

210 °C - $F(2,85)= 3.99, p<.05$; 215 °C - $F(2,85)=3.67, p<.05$.



Slika 40. Ukupna promena boje tamnih, mešanih i belih formata usled termičke modifikacije

Statistički značajne razlike u promeni boje modifikovanog furnira pokazuju da su istraživani termički tretmani različito uticali na furnir nastao iz zone beljike i lažne srčevine. Potencijalno objašnjenje ovih rezultata je da je usled razlika u građi drveta topole iz lažne srčevine i iz beljike (Fang i Yang 2003), odnosno zbog većeg učešća celuloze i hemiceluloze u beljici (Xiaomei et al. 1993) i lignina u srčici (Sykes et al. 2008), furnir nastao iz zone beljike „osetljiviji“ na termičku modifikaciju od furnira iz zone srčike. Kako su hemiceluloze i celuloza podložnije razgradnji tokom termičkih tretmana od lignina (Sundqvist 2004, Bergman 2005), upravo veći sadržaj ovih jedinjenja u perifernim delovima može biti razlog većoj promeni boje listova furnira iz zone beljike.

6.1.3 Poređenje boje furnira topole pre i posle termičke modifikacije

Rečeno je da su furniri sa većim učešćem beljike intenzivnije menjali boju od furnira sa pretežnim učešćem srčike (Slika 40). Ostalo je da se ustanovi da li je ovo različito reagovanje na termičke tretmane doprinelo smanjenju razlike u boji. Rezultati merenja razlike u boji (ΔE), između formata iz zone srčike, međuzone i zone beljike (pre (NT) i posle termičkih tretmana), prikazani su u Tabeli 15.

Tabela 15. Razlika u boji (ΔE) između formata furnira iz zone srčike, međuzone i zone beljike, pre i posle termičkih tretmana

Poređenje (ΔE)	NT	190°C	200°C	210°C	215°C
Srčika – Međuzona	3,86	6,13	6,40	1,84	1,84
Međuzona – Beljika	3,84	1,68	1,26	0,77	2,88
Srčika – Beljika	7,69	7,80	7,46	2,21	4,68

Tretmani od 190 °C i 200 °C uticali su na smanjenja razlike u boji između formata iz međuzone i zone beljike, ali se zato povećala razlika u boji između formata iz zone srčike i međuzone. Ovi tretmani nisu bitnije uticali na razliku između formata iz zone srčike i beljike (Tabela 15). Ako se uporede vrednosti parametara boje za netretirani (Tabela 9) i modifikovani furnir na 190 °C i 200 °C (Tabele 11 i 12), vidi se da je kod sve tri vrste furnira vrednost komponente L^* i b^* opala (izuzetak b^* za srčiku na 190 °C), a vrednost komponenti a^* porasla posle termičke modifikacije. Međutim, za razliku od netretiranog furnira (gde su vrednosti parametara boje furnira iz međuzone bile približno između vrednosti za srčiku i beljiku), posle ovih termičkih tretmana, vrednosti boje furnira iz međuzone su se mnogo više približile parametrima boje furnira iz beljike. Usled toga je i došlo do smanjenja razlike u boji između furnira iz beljike i međuzone, dok se povećala razlika između furnira iz zone srčike i međuzone.

Termička modifikacija furnira topole na 210 °C, dovela je do bitnog smanjenja razlike u boji posmatranih kategorija furnira. Posle ovog tretmana, razlika u boji između furnira iz zone srčike i međuzone, kao i između furnira iz međuzone i zone beljike, pala je iz kategorije 4 (razlika u boji vidljiva na ekranu srednjeg kvaliteta) u kategoriju 2 (mala razlika u boji). Najveća promena zabeležena je pri poređenju razlike u boji između furnira iz zone beljike i zone srčike. Pri poređenju ove dve kategorije furnira, razlika u boji (posle tretmana na 210 °C), smanjila se sa 7,69 (velika razlika u boji) na 2,21 (razlika u boji vidljiva na ekranu visokog kvaliteta), pa se sa stanovišta izjednačavanje boje ovaj tretman može prihvatiti kao zadovoljavajući.

Najoštrij tretman - 215 °C, doprineo je ponovnom povećanju razlike u boji pri poređenju furnira iz zone beljike i međuzone, kao i furnira iz zone srčike i beljike. Nasuprot tretmanima na 190 °C i 200 °C (gde su vrednosti parametara boje furnira iz beljike i

međuzone bile slične), posle ovog tretmana boja furnira iz srčike i međuzone je bila približno ista, a kod furnira iz zone beljike zabeležen je povećan pad parametara boje (Tabela 14). Ovo je doprinelo tome da se povećala razlika u boji između furnira iz zone srčike i beljike, odnosno međuzone i beljike, dok je razlika između furnira iz zone srčike i međuzone ostala ista kao i kod tretmana na 210 °C – 1,84 (Tabela 15).

Može se zaključiti da su najbolji rezultati ostvareni pomoću tretmana na 210 °C, odnosno posle ovog tretmana značajno se smanjila razlika u boji između svih upoređivanih tipova formata furnira. Nešto lošije rezultate dao je tretman na 215 °C, dok se tretmani na 190 i 200 °C nisu pokazali kao zadovoljavajući sa stanovišta izjednačavanja boje.

6.1.4 Vlažnost furnira topole pre i posle termičke modifikacije

U Tabeli 16 prikazane su prosečne vrednosti vlažnosti furnira pre i posle sušenja po standardnom tehnološkom procesu fabrike „Novi drvni kombinat“. Iz tabele se vidi da u zavisnosti od kategorije (srčika, međuzona, beljika) postoji razlika u vlažnosti furnira pre i posle procesa sušenja.

Tabela 16. Vlažnost uzoraka furnira pre i posle sušenja u fabričkoj sušari

Vrsta furnira	Vlažnost furnira pre sušenja (%)	Vlažnost furnira posle sušenja (%)
Beljika	125,50	2,73
Međuzona	147,92	5,86
Srčika	181,25	5,33

U odnosu na dostupnu literaturu, dobijene vrednosti za vlažnost sirovog furnira topole iz različitih zona, dobro se poklapaju sa rezultatima Wallina (1954) - po kome je prosečan sadržaj vlage u mokroj srčevini topole 186%, a u beljici oko 122%. Prosečna vlažnost furnira posle procesa sušenja bila je niža od predviđenih 6-8%, pogotovo za furnir iz zone beljike, što ukazuje na to da treba izvršiti korekcija parametara režima sušenja u fabrici "Novi drvni kombinat".

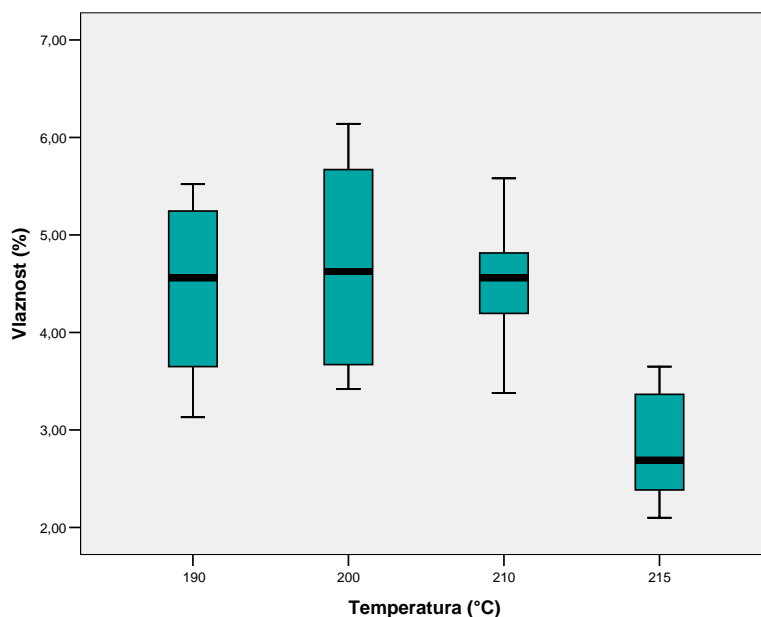
Mora se napomenuti da zbog posrednog načina merenja vlažnosti (opisanog u poglavlju Materijal i metod rada), ove vrednosti treba uzeti sa rezervom. Problem pri određivanju

vlažnosti je bio u tome što su za svaku kategoriju furnira uzimani manji uzorci kako bi se mogli osušiti u laboratorijskoj sušari. Kako topolov furnir ima veliku varijaciju vlage pre ulaska u sušaru (Zdravković et al. 1989), pitanje je koliko su ovi uzorci bili reprezentativni za pojedine listove odnosno kategorije. I pored ovih ograničenja, podaci iz Tabele 16 ukazuju da pre procesa sušenja treba izvršiti razvrstavanje furnira na one koje sadrže lažnu (mokru) srčevinu i one bez nje, te da ovako razvrstane furnire treba sušiti po dva različita režima, ukoliko se želi dobiti ujednačeni sadržaj vlage.

Rezultati merenja vlažnosti topolovog furnira po završetku termičke modifikacije, prikazani su u Tabeli 17 i na Slici 41. Rezultati se odnose na prosečne vrednosti za sve tri kategorije furnira. Kao i kod određivanja vlažnosti furnira pre i posle sušenja i ovde su uzimani uzorci manjih dimenzija. Pošto sam proces termičke modifikacije podrazumeva visoko-temperaturno sušenje (kako bi se vlažnost tretiranog materijala pre narednih faza ujednačila i svela na približno 0%), može se pretpostaviti da je razlika vlažnosti unutar svakog formata termički modifikovanog furnira daleko manja nego kod standardnog procesa sušenja. Samim tim su i uzorci uzimani po završetku termičke modifikacije reprezentativniji od uzoraka uzimanih posle procesa sušenja.

Tabela 17. Osnovni statistički pokazatelji vlažnosti furnira posle termičke modifikacije (prosečne vrednosti za sve tri kategorije furnira)

Režimi	190 °C (1 h)	200 °C (1 h)	210 °C (1 h)	215 °C (1 h)
N	15	14	15	15
\bar{x}	4,40	4,70	4,49	2,84
Max.	5,52	6,14	5,58	3,65
Min.	3,13	3,42	3,38	2,10
SD (σ_{n-1})	0,90	1,07	0,53	0,54
KOV (v)	0,81	1,15	0,28	0,29
SG (ϕ_x^-)	0,23	0,29	0,13	0,14



Slika 41. Raspodela vlažnosti topolovog furnira posle termičke modifikacije

Prikazani rezultati pokazuju da je postignuta konačna vlažnost za prva tri režima ujednačena i da iznosi oko 4,5%. Samo je kod najoštrijeg režima (215 °C), konačna vlažnost manja i iznosi 2,8%. Statistička analiza pomoću jednosmerne ANOVE i Bonferroni post hoc testa (Levene test $F(3,55)=10.99$, $p<.05$), potvrdila je da postoji značajna razlika pri upoređenju režima od 215 °C sa svim drugim režimima $F(3,55)=17,33$, $p<.05$.

Na osnovu statističke analize, može se reći da je produženjem faze kondicioniranja (za po sat vremena na svakih 10 °C povećavanja oštine tretmana), kod režima na 200 °C i 210 °C postignut predviđen cilj, odnosno da je konačna vlažnost tretiranog materijala bila približno jednaka sa materijalom tretiranim na 190 °C. Ovaj postupak nije dao zadovoljavajuće rezultate kod režima na 215 °C, posle kojeg je konačna vlaga tretiranog materijala bila značajno manja u odnosu na ostale tretmane.

Jedan od razloga zašto produženje kondicioniranja nije dovelo do očekivanog povećanja konačne vlažnosti, mogao bi biti taj da je režim na 215 °C (u trajanju od 1 h), preoštara za tretiranje topolovog furnira. Rezultati laboratorijskih istraživanja (Lovrić i Zdravković 2009) su pokazali da se tretiranjem topolovog furnira na temperaturama od 210 °C i 220 °C u trajanju od sat vremena, postiže značajno veći gubitak mase u odnosu na tretmane

od 190 °C i 200 °C. Kako je ovaj laboratorijski eksperiment rađen bez prisustva vodene pare kao zaštitnog sredstva, moguće je da se u manje agresivnom postupku termičke modifikacije pomerila granica drastičnijeg narušavanja strukture tretiranog materijala sa 210 °C na 215 °C.

Interesantno je da je i kod ostalih termičkih tretmana konačna vlažnost (iako približno jednaka), nešto manja od programom predviđenih 5-6% (Slika 41). Na osnovu ovog može se zaključiti da pri tretiranju topolovog furnira treba produžiti fazu kondicioniranja, u odnosu na standardni režim termičke modifikacije fabrike „Tarkett“ za modifikaciju friza tvrdih lišćara (hrasta, jasena i bukve).

Sa stanovišta rada na ovom eksperimentu, konačna vlažnost tretiranog materijala je imala mali uticaj na dalji tok eksperimenta (osim u smislu otklanjanja naprežanja u tretiranom materijalu), pošto je iz organizacionih razloga bilo nemoguće izvršiti presovanje po završetku svakog ciklusa termičke modifikacije. Posle svakog tretmana, odrađeni materijal se skladištio u klimatizovanoj prostoriji (na 6% ravnotežne vlažnosti), dok nisu završeni svi tretmani.

Ovi rezultati mogli bi biti značajni u slučaju da se nanošenje lepka i presovanje termički modifikovanog furnira vršilo odmah po završetku termičke modifikacije. Isuviše mala vlažnost furnira pre ovih operacija mogla bi dovesti do grešaka prilikom presovanja, tj. mogle bi se pojaviti zone koje nisu dovoljno dobro slepljene (Nikolić 1988).

6.2 Svojstva ploča od termički modifikovanog furnira topole

6.2.1 Ravnotežna vlažnost i gustina

Za ispitivanje vlažnosti i gustine korišćene su tri grupe epruveta. Jedna grupa je osušena do apsolutno suvog stanja, dok su druge dve grupe kondicionirane na temperaturi od 22 °C i relativnim vlažnostima vazduha od 30 odnosno 60% u trajanju od četiri nedelje. Rezultati merenja dostignute ravnotežne vlažnosti prikazani su u Tabeli 18.

Tabela 18. Vlažnost ploča posle četiri nedelje pri $\varphi=30\%$ i 60% i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	30%	7,90 %			
T3NT		7,77 %	7,60 %	7,57 %	7,27 %
TNTNT		7,02 %	7,01 %	7,26 %	6,64 %
5T		6,75 %	6,61 %	6,01 %	5,68 %
Kontrolna	60%	9,01 %			
T3NT		8,82 %	8,37 %	8,31 %	8,12 %
TNTNT		8,16 %	7,79 %	8,05 %	7,41 %
5T		7,72 %	7,32 %	6,54 %	6,31 %

Dostignuta vlažnost kontrolnih ploča posle četiri nedelje pri 60% relativne vlažnosti vazduha i pri temperaturi od 22 °C, niža je od očekivanja 10,9% prema psihrometerskim tablicama. Kako se vrednosti u ovim tablicama odnose na ravnotežnu vlagu drveta, nešto niže vrednosti mogu se objasniti uticajem lepka u konstrukciji ploče. Pored toga što ispunjavanja lumena ćelija, lepak u međufaznoj zoni prodire i u ćelijske zidove menjajući im strukturu (Frihart 2005b). Da furnirske ploče imaju nižu ravnotežnu vlažnost od masivnog drveta, ustanovili su Lee i Biblis (2007). Prema njihovim istraživanjima, furnirske ploče izrađene od vrste *Pinus taeda* (u uslovima relativne vlažnosti vazduha od 20 do 90%), imaju ravnotežnu vlažnost u proseku manju za 1% u odnosu na masivno drvo iste vrste.

Nasuprot ovim rezultatima, dostignuta vlažnost kontrolnih ploča kondicioniranih pri 30% relativne vlažnosti vazduha i pri temperaturi od 22 °C, bila je veća od očekivanih 6,1%. Ovo je najverovatnije posledica toga što ovi uzorci nisu dostigli konačnu ravnotežnu vlagu tokom četiri nedelje kondicioniranja. Razlog zašto su uzorci kondicionirani na 60% relativne vlažnosti vazduha dostigli vrednosti približne očekivanim (a na 30% ne), mogao bi biti taj što su pre kondicioniranja pripremljeni uzorci duže vreme proveli u prostoriji gde su uslovi vlažnosti vazduha bili približni $\varphi=60\%$ i $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovim uzorcima bilo je potrebno manje vremena da ujednače svoju vlažnost u sličnim uslovima klime vazduha, u odnosu na uzorke kondicionirane pri $\varphi=30\%$ i $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, kojima četiri nedelje nisu bile dovoljne da završe proces desorpcije.

Vrednosti dostignute vlažnosti ostalih tipova ploča (Tabela 18), pokazuju da su ploče konstruisane od listova tretiranih na višoj temperaturi, kao i ploče sa većim učešćem termički modifikovanog furnira u konstrukciji, zabeležile niže vrednosti dostignute vlažnosti. Izuzetak je bila TNTNT ploča na 210 °C, koja je imala veću vrednost dostignute vlažnosti od istog tipa ploče na temperaturama od 190 i 200 °C.

Smanjivanje ravnotežne vlage sa porastom temperature je očekivano jer se tokom termičkog tretmana smanjuje broj slobodnih OH grupa i samim tim smanjuje mogućnost za apsorpciju vlage iz spoljašnje sredine (Boonstra i Tjeerdsma 2006, Windeisen et al. 2007, Rowell et al. 2009...). Iz istog razloga je logično i da se sa povećanjem učešća termički tretiranih listova furnira u konstrukciji ploče, smanjuje ravnotežna vlažnost ploče.

Statistička analiza značajnosti razlika dostignute vlažnosti urađena je samo za ploče kondicionirane na 60% relativne vlažnosti vazduha. Ovo je urađeno kako bi se otklonio uticaj povećane varijacije podataka nedovoljno dugo kondicioniranih epruveta (Levene test za uzorke kondicionirani na $\phi=30\%$ je pokazao da uzorci nemaju homogenu varijansu $F(12,377)=2.637$, $p<.05$, dok su uzorci kondicionirani na $\phi=60\%$ pokazali homogenu varijansu $F(12,377)=1.543$, $p>.05$). Provera statističke značajnosti razlika dostignute vlažnosti ploča urađena je preko jednosmerne ANOVE - $F(12,377)=213,166$, $p<.05$. Rezultati Tukey post hoc testa (Prilog 2 - Tabela 1), pokazali su da postoji značajna razlika u dostignutoj vlažnosti između većine upoređivanih parova.

Kod ploča konstruisanih samo od termički modifikovanog furnira (5T), najlakše je bilo ustanoviti uticaj termičkih tretmana na ispitivano svojstvo. Rezultati pokazuju da se povišenjem temperature tretmana dostignuta vlažnost (u odnosu na kontrolnu ploču), smanjila za 4,42%; 8,76%; 27,41% i 29,97% respektivno. Velika razlika od skoro 20% smanjenja vlažnosti (između tretmana na 200 i 210 °C), potencijalno ukazuje na drastičnije narušavanje stukture tretiranog furnira topole na temperaturama od oko 210 °C. Izostanak značajnosti razlika između tretmana na 210 i 215 °C, kako kod 5T tako i kod T3NT tipa ploča, navodi na zaključak da su zbog male razlike u temperaturi, ovi tretmani slično delovali na tretirani furnir.

Vlažnost kontrolnih (5N) ploča je bila značajno viša u odnosu na sve druge ploče osim T3NT ploče na 190 °C, sa kojom je imala vrlo slične vrednosti (9,01% i 8,82%). Pri međusobnom poređenju ostalih tipova ploča, značajnosti razlika nije bilo u pojedinačnim slučajevima i to uglavnom pri upoređenju istog tipa ploče tretiranih na sličnim režima (npr. T3NT ploča na 200 °C sa T3NT pločom na 210 °C), ili pri upoređenju ploča sa većim učešćem termički modifikovanim furnirom na nižoj temperaturi, sa pločama sa manje termički modifikovanog furnira, ali na višoj temperaturi (npr. TNTNT ploča na 210 °C sa T3NT pločom na 215 °C). I pored pojedinačnih slučajeva u kojima se značajnost razlike nije pojavila (na nivou od 95%), može se konstatovati da su ispitivane ploče različito reagovala u istim uslovima relativne vlažnosti vazduha, odnosno da su i konstrukcija ploče i primenjeni režim imali uticaja na ravnotežnu vlažnost ploča.

Za razliku od dostignute vlažnosti, podaci o izračunatim gustinama ploča (Tabela 19) ne pokazuju jasan trend u odnosu na konstrukcije ploča i primenjeni režim. Vrednost gustine kontrolne ploče od 436 kg/m³ (kondicionirane pri $\varphi=60\%$ i T=22 °C), približna je vrednosti od 441 kg/m³, koliko su Bal i Bektas (2014) dobili pri ispitivanju petoslojne furnirske ploče napravljene od iste vrste, iste nominalne debljine, slepljene pomoću MUF lepka nanosa od 200 g/m² i kondicionirane u sobnim uslovima klime vazduha. Na osnovu ovog poklapanja, kao i zbog pretpostavljeno nedovoljno dugog kondicioniranja pri $\varphi=30\%$ i T=22 °C, detaljnija statistička analiza urađena je samo za uzorke kondicionirane pri $\varphi=60\%$ i T=22 °C. Podaci o izračunatim fizičkim i mehaničkim svojstvima ploča kondicioniranim četiri nedelje pri $\varphi=30\%$ i T=22 °C, nalaze se u Prilogu 3.

Tabela 19. Gustina ploča u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i T=22 °C (g/cm³)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	0%	0,410			
T3NT		0,385	0,392	0,393	0,368
TNTNT		0,390	0,398	0,370	0,376
5T		0,379	0,383	0,363	0,357
Kontrolna	60%	0,436			
T3NT		0,414	0,420	0,421	0,393
TNTNT		0,425	0,424	0,400	0,394
5T		0,404	0,411	0,389	0,378

Rezultati analize (Prilog 2 - Tabela 2), pokazali su da postoji značajna razlika u gustinama upoređivanih ploča - ANOVA $F(12,377)=13.564$, $p<.05$. Na osnovu Bonferroni post hoc testa (Levene - $F(12,377)=7.919$, $p<.05$), zaključeno je da do značajnog smanjenja gustine dolazi skoro isključivo kod ploča konstruisanih od listova tretiranih na temperaturama iznad 200 °C. Ovo se prvenstveno odnosi na režim od 215 °C, kod koga je i zabeležen najveći broj značajnih razlika. Jedino je kod kontrolne ploče ustanovljena značajno veća gustina u odnosu na ploče konstruisane samo od termički modifikovanog furnira na svim temperaturama. Konstrukcija ploče (u okviru istog režima), skoro da nije uticala na promenu gustine, pošto se od 12 upoređivanih parova (uokvirena polja u Tabeli 2 - Prilog 2), samo u jednom slučaju pokazala signifikantna razlika.

Ako se izdvojeno posmatraju 5T ploče, značajna razlika se pojavljuje samo između najoštrijeg (215 °C) i dva najblaža režima (190 i 200 °C). Na osnovu prethodnih istraživanja (Lovrić i Zdravković 2009b), ustanovljeno je da sa povišenjem temperature tretmana dolazi do smanjivanja gustine topolovog furnira. Očigledno je da gustina ploča ne zavisi samo od gustine upotrebljenog furnira, inače bi gustina kod ovog tipa ploče konstantno opadala od najblažeg ka najoštrijem režimu.

Na gustinu ploče može uticati i različito upresovanje tokom procesa presovanja. Moglo bi se očekivati da će se pri istom režimu presovanja više upresovati ploče izrađene od termički modifikovanog furnira - usled smanjenih mehaničkih svojstava prouzrokovanih urušavanjem ćelija (Awoyemi and Jones 2010). Povećano upresovanje za posledicu treba da ima povećanje gustine ploča, što potvrđuju rezultati Fioravanti et al. (2013). Oni su presovanjem termički modifikovanih listova furnira topole dobili ploču za oko 14% tanju i za 1,2% gušću, u odnosu na kontrolne ploče. Ove rezultate objasnili su nepovratnim deformacijama tokom presovanja, prouzrokovane smanjenjem čvrstine termički modifikovanog furnira.

Takođe, treba uzeti u obzir da na gustinu ploča može uticati i smanjenje elastičnosti termički modifikovanog drveta, koju su na vrstama sličnim ispitivanoj (trepetljici i jasicu) zabeležili Shi et al. (2007) i Kocaefe et al. (2008a). Ovo za posledicu može imati manju povratnu deformaciju tj. smanjenje „spring back“ efekta (efekta opruge). Kako smanjenje

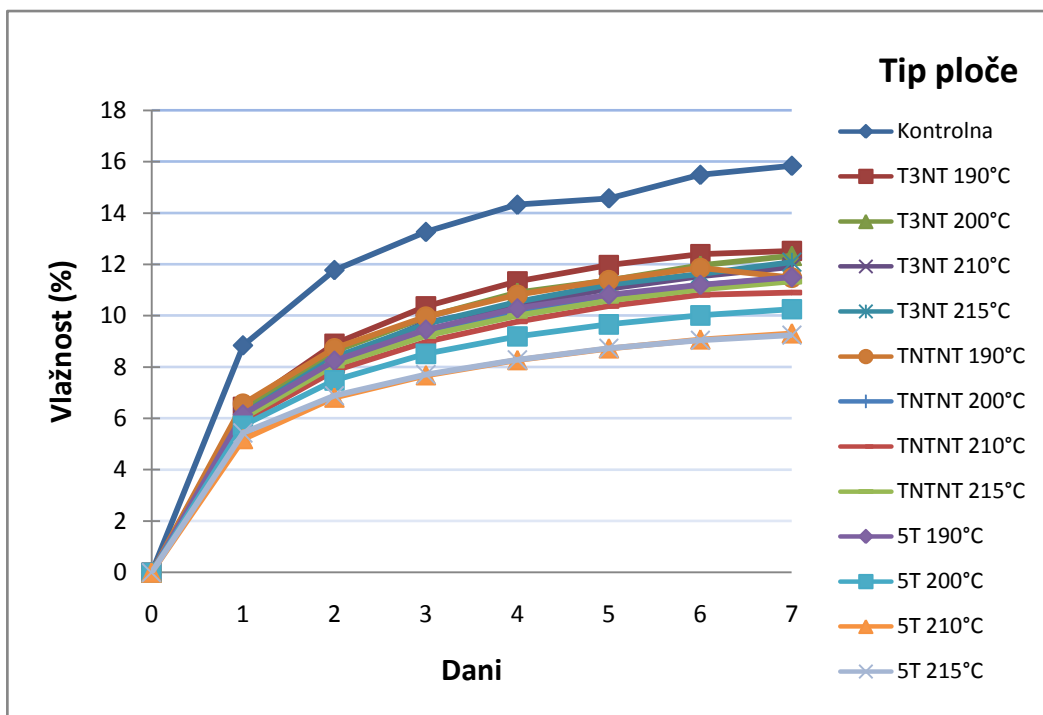
gustine listova furnira tokom termičke modifikacije utiče na smanjenje gustine ploče, a povećano upresovanje i smanjenje povratne deformacije povećavaju gustinu ploče, teško je ustanoviti koji faktor ima veći uticaj. Ako se iz razmatranja izuzmu svi drugi tipovi ploča osim 5N i 5T ploča, rezultati ovog istraživanja pokazuju da sa primenom termičkih tretmana dolazi do značajnog smanjenja gustine ploča konstruisanih samo od tretiranog furnira, pri čemu je najmanje smanjenje od 5,73% zabeleženo za tretman od 200 °C, a najveće od 13,30% kod tretmana od 215 °C.

6.2.2 Promena vlažnosti i bubrenje

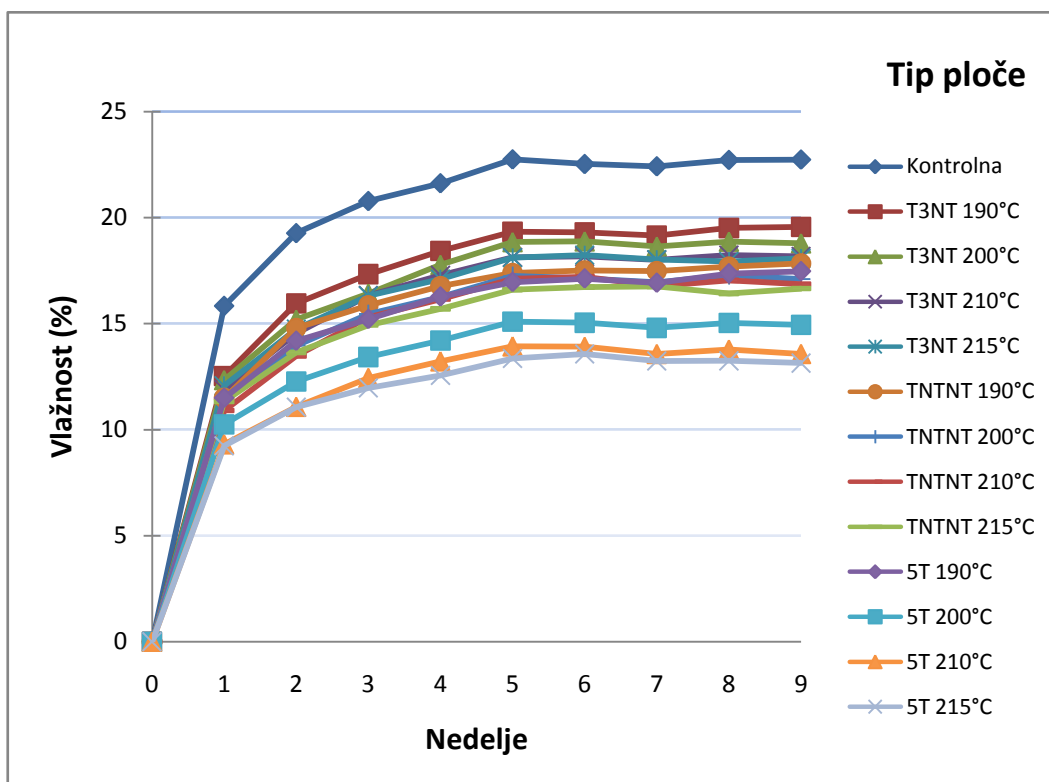
Da bi se odredilo kako ispitivane ploče reaguju u uslovima povećane vlažnosti vazduha, uzorci ploča su postavljeni iznad vode u zatvorenim kontejnerima. U toku prve nedelje došlo je do naglog povećanja vlažnosti i debljine (Slike 42 i 44), da bi se vlažnost ustalila posle 5 nedelja (Slika 43), dok je za ustaljenje dimenzija bilo potrebno oko 9 nedelja (Slika 45).

Kada se analizira promena vlažnosti (Slika 43), može se primetiti da su na izmerene vrednosti uticali i režimi i konstrukcije ploča. Uočljivo je da je unutar svakog tipa ploča promena vlažnosti bila manja sa porastom temperature režima, kao i da je ova promena manja za ploče konstruisane sa većim udelom termički modifikovanog furnira. Tako je za kontrolnu ploču (5N) posle 9 nedelja zabeležena najveća ravnotežna vlaga od 22,74%, dok je najmanju promenu vlažnosti imala ploča konstruisana samo od termički modifikovanih listova (5T) na temperaturi od 215 °C - 13,14%.

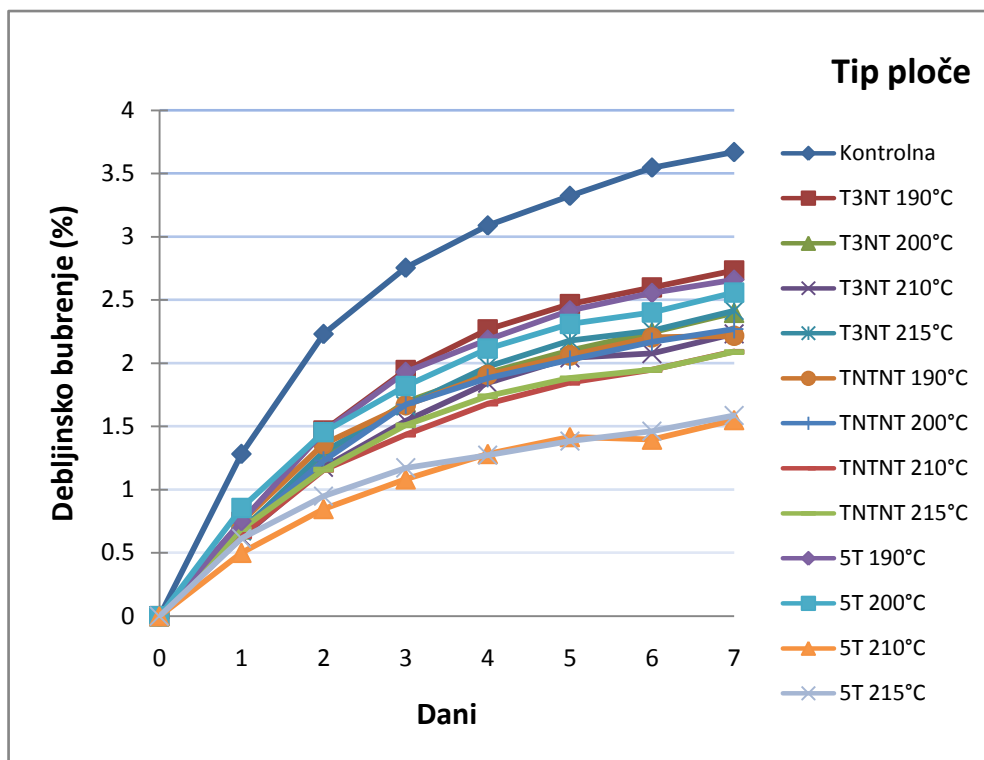
Kao polazni podaci za statističu analizu korišćene su vrednosti izmerene posle devete nedelje od početka merenja. Na osnovu statističke analize zaključeno je da postoje značajne razlike u dostignutim vlažnostima između pojedinih ploča - $F(12,377)=153.508$, $p<.05$, a pomoću Bonferroni post hoc testa (Levene $F(12,377)=9.278$, $p<.05$) utvrđeno je koje ploče se značajno razlikuju (Prilog 2 Tabela 3). Rezultati analize su pokazali da kontrolne ploče (5N) ima značajno veću vlažnost u odnosu na sve druge ploče, dok se od 66 drugih posmatranih parova značajna razlika pojavila u 47 slučajeva.



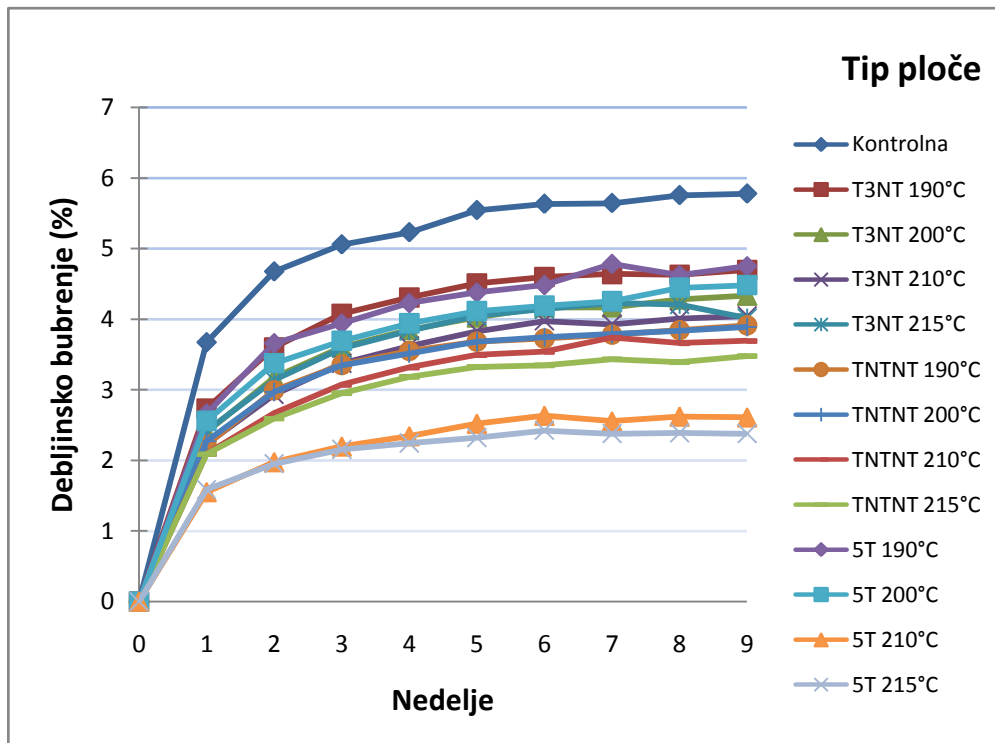
Slika 42. Promena vlažnosti uzorka nad vodom u toku prve nedelje eksperimenta



Slika 43. Ukupna promena vlažnosti uzorka nad vodom



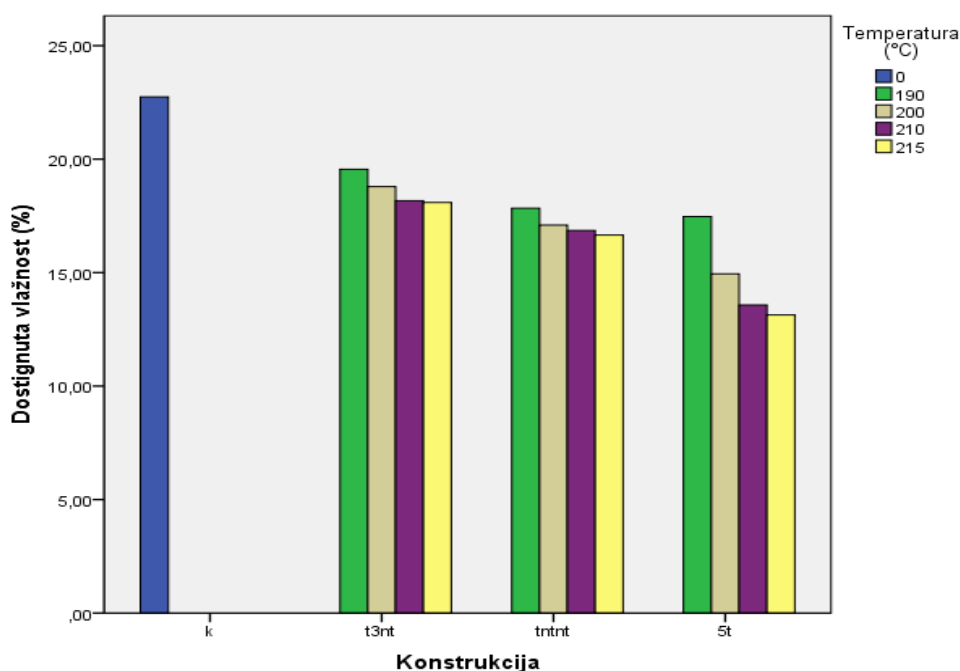
Slika 44. Promena debljinskog bubrenja uzoraka nad vodom u toku prve nedelje eksperimenta



Slika 45. Ukupna promena debljinskog bubrenja uzoraka nad vodom

U odnosu na kontrolne ploče, dostignuta vlažnost ploča konstruisanih samo od termički tretiranih furnira bila je manja za 23,18; 34,26; 40,29 i 42,22%, posmatrajući od najblažeg ka najoštrijem tretmanu. I kod ovog svojstva nije zabeležena značajna razlika između 5T ploča konstruisanih od furnira tretiranih na 210 i 215 °C, dok je kod ostalih parova 5T ploča značajna razlika ustanovljena. Nasuprot 5T pločama, kod kojih je od 6 posmatranih parova na različitim temperaturama modifikacije u 5 slučajeva zabeležena signifikantna razlika, kod T3NT i TNTNT ploča signifikantno smanjenje dostignute vlažnosti zabeleženo je u 2 odnosno u 1-om slučaju. Ovo ukazuje na to da su netretirani listovi furnira u konstrukciji pojedinih ploča, značajno smanjili pozitivan uticaj termičke modifikacije na apsorpciju vlage.

Interesantno je da je na smanjenje ravnotežne vlažnosti veći uticaj imala konstrukcija ploče od temperature modifikacije (Slika 46). Tako je T3NT ploča na 215 °C više promenila svoju vlažnost od npr. TNTNT ili 5T ploče na 190 °C. Jedino odstupanje od primećenog pravila izračunato je kod 5T ploče na 190 °C, koja je menjala vlažnost vrlo slično kao ploča TNTNT na 190 °C, odnosno konstantno je imala veću vlažnost od TNTNT ploča na višim temperaturama.

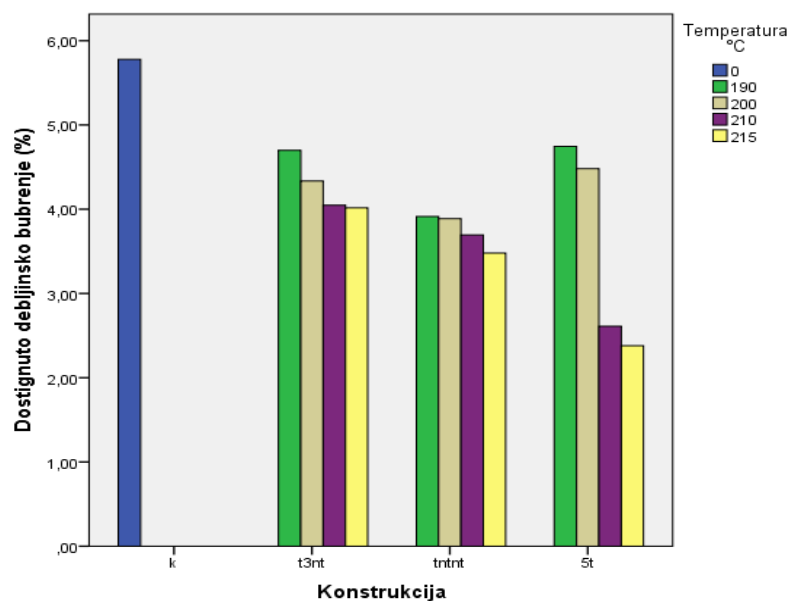


Slika 46. Uticaj konstrukcije ploča i temperature modifikacije na dostignutu vlažnost

Ovo odstupanje ploče 5T na 190 °C može ukazati na postojanje nekog problema u procesu izrade ploča, najverovatnije tokom faze presovanja ili nanošenja lepka. U slučaju da se propust desio tokom termičke modifikacije, onda bi i druge ploče koje sadrže listove furnira modifikovane na 190° C, takođe pokazale značajno različito ponašanje. Ovo bi isto važilo i da je dostignuta vlažnost ploče 5T na 190 °C, samo posledica isuviše blage promene hemijskog sastava tretiranog materijala na ovoj temperaturi (nasuprot istraživanjima Sundqvista 2004 i Bergmana 2005)

Ako se kontrolne ploče izuzmu iz razmatranja, onda rezultati statističke analize pokazuje da je od 48 parova (pri poređenju ploča različite konstrukcije), kod njih 39 zabeležena signifikantna razlika (81,25%). Isto tako, od 18 parova (pri poređenju ploča iste konstrukcije), signifikantna razlika se pojavila u 8 slučajeva (44,44%). Pri tome od zabeleženih 8 slučajeva, 5 se odnosi na međusobno poređenje 5T ploča na različitim režimima (27,78%). Ovim je potvrđeno zapažanje da na dostignutu vlažnost više utiče konstrukcija u odnosu na primenjeni termički režim. Ovo zapažanje može biti interesantno sa stanovišta upotrebe ovih ploča. Ako se uzme u obzir činjenica da sa povećanjem temperature termičke modifikacije dolazi do smanjenja većine mehaničkih svojstava tretiranog materijala (Poncsak et al. 2006, Poncsak et al. 2010, Kocafe et al. 2008b...), onda je značajno da se do pozitivnih efekata može doći i primenom nižih temperatura, ali korišćenjem druge konstrukcije - npr. ploča TNTNT na 190 °C umesto ploče T3NT na 215 °C.

Detaljnija analiza promena debljine ploče (Slika 47), takođe nam ukazuje da je došlo do nekog poremećaja tokom procesa presovanja. Za razliku od prethodno analizirane dostignute vlažnosti, na slici 47 se vidi da je (pored 5T ploča na 190 °C) i kod 5T ploča na 200 °C, zabeleženo preveliko odstupanja u odnosu na ostale tipove ploča. Ako se pogleda promena debljina ploča tokom vremena, uočljivo je da je kod ova dva tipa, do neočekivano velike promene debljine došlo u toku prve nedelje ispitivanja (Slika 44), a da su kasnije promene dimenzija slične promenama ostalih ploča (Slika 45).



Slika 47. Uticaj konstrukcije ploča i temperature modifikacije na dostignuto debljinsko bubrenje

Da je kod ovih ploča došlo do poremećaja tokom procesa presovanja može se videti i iz Tabele 20. Vrednosti iz tabele pokazuju da je kod ovih ploča postignuto mnogo veće upresovanja u odnosu na sve druge ploče.

Tabela 20. Izračunate vrednosti upresovanja za pojedine tipove ploča (%)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	Upresovanje (%)	9,46			
T3NT		9,71	8,52	9,18	9,17
TNTNT		9,09	8,89	8,89	7,40
5T		13,31	15,42	9,51	8,19

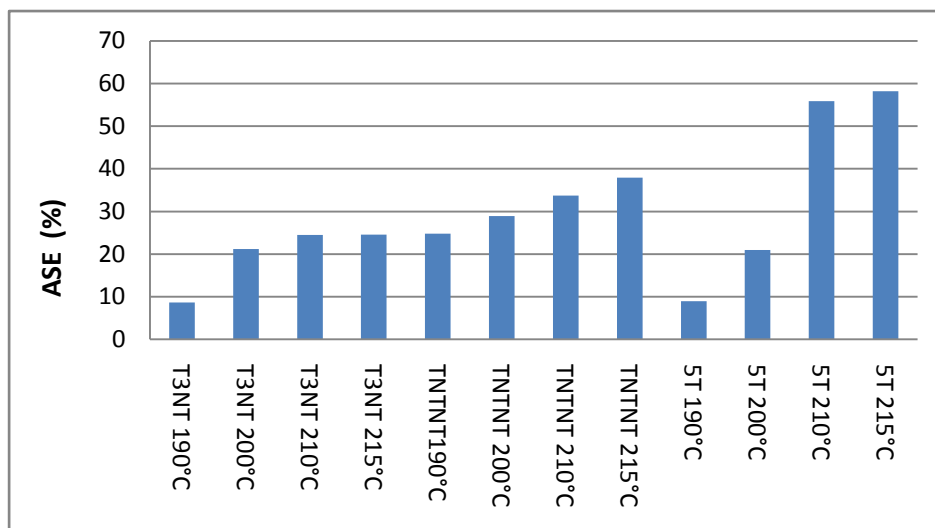
Povećano upresovanje ovih ploča ne može biti posledica slabijih svojstava termički modifikovanog drveta, zato što bi se onda i kod 5T ploča na 210 °C i 215 °C moralo pojaviti povećano upresovanje (i to u većoj meri nego na nižim temperaturama). Kako to nije slučaj, ovaj poremećaj je najverovatnije nastao usled variranja veličine pritiska u pojedinim etažama prese, a naročito u donjim etažama prese koje se prve zatvaraju. Na ove etaže se pri zatvaranju prenosi težina gornjih etaža, sve dok se sve etaže ne zatvore, kada se pritisak u presi podiže do režimom predviđenog.

Ako se izuzmu 5T ploča na 190 °C i 200 °C, sa Slike 47 se vidi da je i kod ovog ispitivanog svojstva veći uticaj imala konstrukcija ploče od temperature tretmana. Tako su sve T3NT ploče imale veće debljinsko bubrenje od svih TNTNT ploča, nezavisno od temperature termičke modifikacije. U odnosu na netretirane ploče, kod ploča konstruisanih samo od termički modifikovanog furnira, sa povišenjem temperature termičke modifikacije dostignuto debljinsko bubrenje smanjivalo se za 12; 22,49; 54,84 odnosno 58,82%. Prve dve vrednosti (za 5T ploča na 190 °C i 200 °C), treba uzeti sa rezervom, ali i pored toga jasno se vidi pozitivan uticaj termičke modifikacije na smanjenje debljinskog bubrenja (što su ustanovili i Nazerian et al. (2011) na LVL-u napravljenom od termički modifikovanih drveta crne topole).

Interesantno je da se vrednost smanjenja debljinskog bubrenja od 54,84% (5T ploča na 210 °C), poklapa sa vrednošću smanjenja debljinskog bubrenja od 54% za termički modifikovano drvo jasike - posle tretmana od 4 h na 220 °C (Kocaeffe et al. 2008b). Iako nisu iste vrste u pitanju, ovo ukazuje na potencijalne prednosti koje može imati furnirska ploča konstruisana od termički modifikovanog furnira u odnosu na termički modifikovano masivno drvo, pošto se do istih pozitivnih rezultata došlo na nižoj temperaturi i za kraće vreme.

Podaci o promeni debljine uzoraka nad vodom mogli bi biti korisni pri upotrebi ovih ploča u uslovima sa povećanom vlažnošću vazduha, međutim mnogo bolji uvid u povećanje dimenzionalne stabilnosti daje ASE (anti-swelling efficiency) pokazatelj (Slika 48). Pri proračunu ovog pokazatelja, korišćene su vrednosti debljine uzoraka izmerene nakon potapanja u vodu (uzorci su prvo devet nedelja stajali nad vodom, a potom su potopljeni u vodu na još dve nedelje).

Kao i kod poređenja debljine uzoraka nad vodom i kod prikazanih vrednosti ASE pokazatelja vidi se da vrednosti 5T ploča na 190 °C i 5T ploča na 200 °C odstupaju od ostalih vrednosti. U skladu sa trendom povećanja dimenzionalne stabilnosti sa povećanjem temperature tretmana i sa povećanjem udela termički modifikovanog drveta u konstrukciji ploče, vrednosti ASE pokazatelja za ove ploče trebalo bi da iznose između 37,93% (TNTNT ploča na 215 °C) i 55,86% (5T ploča na 210 °C).



Slika 48. Povećanje dimenzione stabilnosti ploča preko ASE pokazatelja (%)

Osim ove anomalije, sa Slike 48 se vidi da je očekivano najmanje povećanje dimenzione stabilnosti zabeleženo kod T3NT ploče na 190 °C (8,64%), a najveće kod 5T ploče na 215 °C (58,23%). Kod TNTNT tipa ploča, sa povećanjem temperature režima zabeležen je i rast dimenzionalne stabilnosti za oko 4% između svaka dva režima. Vrlo približne vrednosti povećanja dimenzionalne stabilnosti zabeležene su kod T3NT ploča na 200, 210 i 215 °C i kod TNTNT ploče na 190 °C. Kod ovih ploča vrednosti ASE pokazatelja kretale su se od 21,21 do 24,79%, tako da bi u odnosu na ovaj pokazatelj, zbog manjeg narušavanja mehaničkih svojstava, logičnija bila upotreba ploča T3NT na 200 °C i TNTNT ploča na 190 °C od T3NT ploča na 210 i 215 °C.

6.2.3 *Tvrdoća ploča*

U Tabelama 21 i 22 prikazane su izračunate vrednosti tvrdoće ispitivanih ploča, zajedno sa osnovnim statističkim parametrima. Vrednosti su dobijene pri ispitivanju uzoraka u apsolutno suvom stanju (Tabela 21), kao i posle četiri nedelje kondicioniranja uzoraka u klima komori na 60% relativne vlažnosti vazduha, pri temperaturi od 22 °C (Tabele 22). Najveća vrednost tvrdoće po Brinelu od 13,17 MPa, izračunata je kod kontrolne ploče (K) u apsolutno suvom stanju, dok je najmanja vrednost zabeležena kod TNTNT ploče pri 60% relativne vlažnosti vazduha za režim od 215 °C - 7,41 MPa. Radi bolje preglednosti i zbog lakšeg upoređivanja, izračunate srednje vrednosti iz Tabela 21-22, zasebno su prikazane u Tabeli 23.

Tabela 21. Tvrdoća ploča u apsolutno suvom stanju (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
\bar{x}	13,17	9,82	9,82	10,77	8,57	9,36	8,79	9,46	8,18	8,06	8,77	8,39	7,99
SD (σ_{n-1})	2,43	2,10	1,54	2,11	1,22	1,67	1,52	2,60	1,36	1,45	3,26	2,05	1,93
KOV (v)	18,47	21,39	15,67	19,63	14,21	17,87	17,30	27,46	16,61	17,98	37,25	24,41	24,18
SG (ϕ_x)	0,44	0,38	0,28	0,39	0,22	0,31	0,28	0,47	0,25	0,26	0,60	0,37	0,35

Tabela 22. Tvrdoća ploča posle četiri nedelje kondicioniranja na $\phi=60\%$ i $T=22$ °C (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
\bar{x}	11,71	8,73	9,21	9,41	8,15	8,44	8,66	8,24	7,56	7,55	8,14	7,41	7,86
SD (σ_{n-1})	2,50	1,48	1,03	1,76	0,89	0,59	1,16	1,84	1,20	1,01	1,84	1,24	1,15
KOV (v)	21,36	16,94	11,23	18,67	10,88	6,94	13,38	22,31	15,85	13,38	22,67	16,77	14,67
SG (ϕ_x)	0,46	0,27	0,19	0,32	0,16	0,11	0,21	0,34	0,22	0,18	0,34	0,23	0,21

Tabela 23. Tvrdoća ploča u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	0%	13,17			
T3NT		9,82	8,57	9,46	8,77
TNTNT		9,82	9,36	8,18	8,39
5T		10,77	8,79	8,06	7,99
Kontrolna	60%	11,71			
T3NT		8,73	8,15	8,24	8,14
TNTNT		9,21	8,44	7,56	7,41
5T		9,41	8,66	7,55	7,86

Za statističku analizu odabrani su uzorci koji su kondicionirani pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Testiranje pomoću jednosmerne ANOVE pokazalo je da postoji značajna razlika u tvrdoći ispitivanih ploča $F(12,377)=18.379$, $p<.05$, a između kojih ploča postoji značajna razlika (Prilog 2 Tabela 4), ustanovljeno je pomoću Bonferroni post hoc testa (Levene - $F(12,377)=6.76$, $p<.05$).

Statističkom analizom je ustanovljeno da kontrolne ploče (5N) imaju značajno veću tvrdoću u odnosu na sve druge tipove ploča, odnosno, može se zaključiti da je termička modifikacije furnira topole smanjila tvdoću ploča konstruisanih od tako tretiranih listova. U odnosu na kontrolne ploče, tvrdoća 5T ploča (kondicioniranih pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$), smanjila se za 19,64; 26,05; 35,53 i 32,88%, posmatrano od najblažeg ka najoštrijem tretmanu. Iako su ovde ispitivane furnirske ploče, ovi rezultati su saglasni sa rezultatima Shi et al. (2007), koji su zaključili da termička modifikacija masivnog drveta trepetljike (vrste sličnih svojstava u odnosu na ispitivanu vstu u ovom radu), dovodi do smanjenja tvrdoće ispitivane vrste.

Pri poređenju različitih režima, razlika u tvrdoći postoji, ali samo se režim na 190 °C razlikuje od režima na 210 i 215 °C. Ovi rezultati bi se mogli objasniti time da je režim na 190 °C bio dovoljno blag, tako da nije previše narušio kompaktnost tretiranih listova. Tvrdoća ploča se kod režima na 200 °C smanjila (Tabela 24), ali ne dovoljno da bi se

pojaviła značajna razlika. Dalje smanjenje tvrdoće kod oštrijih režima, doprinelo je pojavi signifikantne razlike u odnosu na tretman na 190 °C.

Ako se izuzmu kontrolne ploče, ni kod jednog režima (uokvirene vrednosti u Tabeli 4 Prilog 2), nije zabeležena značajna razlika u tvrdoći ploča sa povećavanjem učešća termički modifikovanog furnira. Ovo navodi na zaključak da konstrukcija ploča u okviru istog režima ne utiče na tvrdoću. Međutim, kako su se značajne razlike (pri poređenju različitih režima), pojavile samo u odnosu na TNTNT i 5T ploče, očigledno je da povećano učešće netretiranog furnira (kao kod T3NT ploča), može doprineti umanjenju negativnog delovanja termičkih modifikacija na čvrstoću ploča.

Da bi se ustanovilo da li se tvrdoća ploča smanjuje sa povećanjem vlažnosti, izvršeno je testiranje pomoću Tukey post hoc testa (varijansa upoređivanih srednjih vrednosti je bila jednaka). Ukupno je testirano 13 parova, a postojanje značajne razlike u tvrdoći zabeleženo je kod 5 parova (5N aps. - 60%, T3NT na 190 °C aps. - 60%, 5T na 190 °C aps. - 60%, TNTNT na 200 °C aps. - 60% i TNTNT na 215 °C aps. - 60%). Sve uočene razlike su bile na nivou značajnosti od 95%.

Iz gore navedenog se vidi da kod većine upoređivanih parova nije uočena značajna razlika. Poznato je da sa povećanjem vlažnosti dolazi do pada tvrdoće u hirokopskom području vlažnosti (Kollmann i Cote 1984). Kondiciranje epruveta pri relativnoj vlažnosti vazduha od 60% najviše je uticalo na promenu vlažnosti kontrolnih epruveta, epruveta izrađenih od listova furnira tretiranih na nižim temperaturama, kao i epruveta konstruisanih sa većim učešćem netretiranih listova (Tabela 18). Zato je i postojanje razlike u tvrdoći upravo zabeleženo pri poređenju ovih epruveta. Suprotno tome, manja promena vlažnosti epruveta izrađenih iz 5T ploča, ili iz ploča konstruisanih od furnira tretiranih na 210 i 215 °C, doprinela je da se kod poređenja tvrdoća ovih ploča značajna razlika ne pojavi.

6.2.4 Savojna čvrstoća i modul elastičnosti pri savijanju

6.2.4.1 Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća je ispitivana na dva tipa epruveta, na epruvetama kod kojih je tok vlakana spoljnih slojeva ploče bio paralelan sa dužom stranom epruvete i na epruvetama kod kojih je tok vlakana spoljnih slojeva ploče bio upravan na dužu stranu epruvete. Kako su sve ispitivane ploče bile petoslojne i kako su pri formiranju ploče (pre presovanja) susedni listovi ukrštani pod uglom od 90° (u odnosu na tok prostiranja vlakana), srednji list svake ploče je imao istu orijentaciju kao i spoljašnji slojevi ploče.

Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom i upravnih na dužu stranu epruvete, prikazani su u Tabelama 24-27. U daljoj analizi, savojna čvrstoća će se označavati kao savojna čvrstoća uzdužnih odnosno poprečnih epruveta. Kao i kod ispitivanja tvrdoće, prikazane vrednosti su dobijene pri ispitivanju epruveta u apsolutno suvom stanju (Tabele 24 i 26) i posle kondicioniranja epruveta četiri nedelje u klima komori na 60% relativne vlažnosti vazduha pri temperaturi od 22°C (Tabele 25 i 27).

Kod uzdužnih epruveta, najveća vrednost savojne čvrstoće zabeležena je kod kontrolnih ploča pri 60% relativne vlažnosti vazduha (58,07 MPa), a najmanju vrednost su imale 5T ploče na 215°C u apsolutno suvom stanju vlažnosti (24,29 MPa). Kod poprečnih epruveta, najveća vrednost savojne čvrstoće zabeležena je kod TNTNT ploča na 200°C , pri 60% relativne vlažnosti vazduha (29,46 MPa), a najmanju vrednost su imale 5T ploče na 215°C , u apsolutno suvom stanju (12,19 MPa). Rezultati pokazuju da su u većini slučajeva izračunate veće vrednosti savojne čvrstoće kod epruveta kondicioniranih na 60% relativne vlažnosti vazduha u odnosu na isti tip epruveta u apsolutno suvom stanju vlažnosti. Ovo je najverovatnije posledica narušavanja lepljene veze tokom procesa sušenja do aps. stanja vlažnosti. Prema istraživanju Claus et al. (2011), na temperaturama od oko 100°C dolazi do blagog pada kvaliteta lepljene veze pri primeni MUF lepka.

Tabela 24. Savojsna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete u aps. stanju vlažnosti (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	56,52	34,86	39,23	37,06	33,52	31,72	37,56	35,25	31,69	28,08	24,73	28,06	24,29
SD (σ_{n-1})	9,13	7,02	7,66	9,27	9,23	6,34	10,47	5,87	6,64	7,77	6,36	7,32	4,94
KOV (ν)	16,15	20,14	19,53	25,02	27,52	19,99	27,87	16,65	20,94	27,67	25,70	26,10	20,36
SG (ϕ_x)	2,63	2,03	2,21	2,68	2,66	1,83	3,02	1,69	1,92	2,24	1,83	2,11	1,43

Tabela 25. Savojsna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete pri 60% ϕ (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	58,07	33,87	38,26	34,77	32,28	33,54	41,89	36,51	29,46	33,31	31,50	29,50	25,44
SD (σ_{n-1})	4,27	6,03	5,71	7,07	8,46	5,76	4,72	9,45	7,36	5,38	12,50	9,22	5,19
KOV (ν)	7,35	17,81	14,93	20,35	26,21	17,19	11,28	25,87	24,98	16,16	39,69	31,25	20,41
SG (ϕ_x)	1,23	1,74	1,65	2,04	2,44	1,66	1,36	2,73	2,12	1,55	3,61	2,66	1,50

Tabela 26. Savojna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete u aps. stanju vlažnosti (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	27,59	26,84	22,84	19,97	25,48	28,30	17,10	25,47	19,59	13,70	24,21	17,01	12,19
SD (σ_{n-1})	6,77	6,18	5,29	4,16	6,84	5,28	3,63	2,87	3,34	4,68	4,73	3,46	3,23
KOV (ν)	24,55	23,02	23,18	20,85	26,85	18,66	21,25	11,27	17,06	34,14	19,55	20,37	26,48
SG (ϕ_x^-)	1,96	1,78	1,53	1,20	1,98	1,52	1,05	0,83	0,96	1,35	1,37	1,00	0,93

Tabela 27. Savojna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete pri 60% ϕ (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	28,40	26,38	27,92	22,74	26,96	29,46	17,88	24,37	24,62	17,18	24,59	21,23	14,82
SD (σ_{n-1})	5,60	4,38	3,33	3,55	3,92	4,39	3,15	3,10	3,53	5,24	4,61	2,17	4,87
KOV (ν)	19,72	16,62	11,92	15,59	14,55	14,90	17,60	12,70	14,35	30,52	18,76	10,21	32,84
SG (ϕ_x^-)	1,62	1,27	0,96	1,02	1,13	1,27	0,91	0,89	1,02	1,51	1,33	0,63	1,41

Izmerene vrednosti savojne čvrstoće kontrolnih (5N) epruveta, kondicioniranih pri 60% relativne vlažnosti, dobro se poklapaju sa vrednostima koje su dobili Bal et al. (2014) pri sličnim uslovima klime vazduha. Oni su za isti tip ploče dobili vrednosti od 56,3 MPa (za udužne epruvete) i 27,3 MPa (za poprečne epruvete), naspram 58,07 i 28,40 MPa koliko je dobijeno u ovom istraživanju. Vrednosti SD i KOV su kod uzdužnog tipa epruveta vrlo slične između ova dva istraživanja. Tako su Bal et al. (2014) dobili da SD kod uzdužnog tipa epruveta iznosi 4,7 MPa, a KOV 8,3 - naspram 4,27 MPa i 7,75 koliko je ovde izračunato. Kod poprečnog tipa vrednosti SD i KOV se ne poklapaju, odnosno izračunate vrednosti u ovom istraživanju su veće (5,6 MPa i 19,72 naspram 3,2 MPa i 11,7). Ovome su najverovatnije doprinele nešto veće pukotine (nastale pri ljuštenju na zateznoj strani), koje više utiču na rezultate pri ispitivanju poprečnih u odnosu na uzdužni tip epruveta. Ove pukotine su najverovatnije odgovorne za veliku SD i KOV izračunate kod većine epruveta, a pogotovo kod oštrijih režima koji su dodatno uticali na proširenje pukotina i smanjivanje mehaničkih svojstava tretiranih furnira.

Prema rezultatima istraživanja Fioravanti et al. (2013), savojna čvrstoća ovog tipa ploče (za uzdužni tip epruveta) je nešto niža 51 MPa, dok je kod poprečnog tipa nešto viša 30 MPa. Interesantno je da su ovi istraživači dobili da savojna čvrstoća ploča konstruisanih samo od termički modifikovanog topolovog furnira na temperaturi od 180 °C iznosi 38 i 19 MPa. Ove vrednosti su negde između vrednosti za 5T ploče za režime od 190 i 200 °C u ovom istraživanju. Razlika je prvenstveno posledica duže termičke modifikacije, koja je kod upoređivanog istraživanja trajala dok tretirani furnir nije izgubio 5% u odnosu na masu u apsolutno suvom stanju. Radi lakše dalje analize, izračunate srednje vrednosti iz Tabela 24-27, zasebno su prikazane u Tabelama 28 i 29.

Upoređivanjem vrednosti uzdužnih i poprečnih epruveta iz Tabela 28 i 29, može se videti da uzdužne epruvete imaju veću savojnu čvrstoću od poprečnih, pri čemu je ova razlika kod kontrolnih (5N) i ploča sastavljenih samo od termički modifikovanih listova (5T) skoro dvostruka, dok je kod T3NT i TNTNT ploča razlika primetna, ali varira u zavisnosti od primenjenog režima. Ova razlika je prvenstveno posledica različite orijentacije slojeva kod poprečnih i uzdužnih epruveta. Pri ispitivanju savojne čvrstoće, gornji slojevi ploče su izloženi naponu na pritisak, dok su donji slojevi (ispod ose

neutralnosti) izloženi naponu na zatezanje (Kollmann i Cote 1984). Orijentacija spoljašnjih slojeva uzdužnih epruveta je takva da je donji sloj ovih epruveta izložen naponu na zatezanje paralelno sa vlakancima, dok kod poprečnih epruveta donji sloj izložen naponu na zatezanje upravno na vlakanca. Kako je zatezna čvrstoća upravno na vlakanca značajno manja od naponu na zatezanje paralelno sa vlakancima (Popović i Šoškić 2002), potrebno je primeniti manje sile da bi se došlo do loma donjeg sloja poprečnih epruveta, a zatim i do loma ostalih slojeva ovako oslabljene epruvete.

Tabela 28. Savojna čvrstoća paralelnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	0%	56,52			
T3NT		34,86	33,52	35,25	24,73
TNTNT		39,23	31,72	31,69	28,06
5T		37,06	37,56	28,08	24,29
Kontrolna	60%	58,07			
T3NT		33,87	32,28	36,51	31,50
TNTNT		38,26	33,54	29,46	29,50
5T		34,77	41,89	33,31	25,44

Tabela 29. Savojna čvrstoća poprečnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	0%	27,59			
T3NT		26,84	25,48	25,47	24,21
TNTNT		22,84	28,30	19,59	17,01
5T		19,97	17,10	13,70	12,19
Kontrolna	60%	28,40			
T3NT		26,38	26,96	24,37	24,59
TNTNT		27,92	29,46	24,62	21,23
5T		22,74	17,88	17,18	14,82

Na smanjenje savojne čvrstoće poprečnih epruveta, dodatno su uticale i pukotine nastale tokom procesa ljuštenja trupaca. Kada se pri ispitivanju savojne čvrstoće u donjem sloju epruvete pojave sile zatezanja, onda kod poprečnog tipa epruveta pukotine nastale pri ljuštenju predstavljaju oslabljeno mesto na kome se koncentrišu naponi koji nastoje da otvore ove pukotine. Što su pukotine nastale tokom ljuštenja dublje, to je zatezna čvrstoća furnira manja. Slična pojava se dešava i u srednjem listu furnira kod poprečnih epruveta, gde deluju smičuće sile pri ispitivanju savojne čvrstoće, koje takođe otvaraju pukotine. Uopšteno posmatrano, kod poprečnog tipa epruveta postoje tri, a kod uzdužnih dva oslabljena sloja, što u kombinaciji sa prirodno manjom zateznom čvrstoćom popreko na vlakanca, rezultuje manjom savojnom čvrstoćom poprečnog tipa epruveta.

I kod uzdužnih i kod poprečnih epruveta postoji tendencija opadanja savojne čvrstoće sa povećanjem oštine režima. Kod uzdužnih epruveta je primetno da netretirane (5N) epruvete imaju značajno veće vrednosti savojne čvrstoće u odnosu na sve druge tipove epruveta, kao i da je savojna čvrstoća režima od 215°C primetno manja u odnosu na ostale režime.

Testiranje značajnosti razlika savojne čvrstoće kod uzdužnog tipa epruveta, urađeno je za uzorke koji su kondicionirani pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rezultati jednosmerne ANOVE ($F(12,143)=14.206$, $p<.05$), pokazali su da postoji značajna razlika u savojnoj čvrstoći, a pomoću Tukey post hoc test (Levene - $F(12,143)=2.280$, $p>.05$), ustanovljeno je između kojih upoređivanih parova se pojavila značajna razlika (Tabela 5 Prilog 2).

Testiranje je pokazalo da se značajna razlika pojavljuje pri poređenju kontrolnih sa svim drugim pločama. Ovi rezultati navode na zaključak da termička modifikacija dovodi do smanjenja savojne čvrstoće kod uzdužnog tipa epruveta. U odnosu na kontrolne ploče, savojna čvrstoća uzdužnog tipa epruveta smanjila se kod 5T ploča za 40,13; 27,87; 42,64 i 56,19%, posmatrano od najblažeg ka najoštrijem termičkom tretmanu. Neočekivano velika vrednost od 41,89 MPa (zabeležena kod 5T ploče na 200 °C), prouzrokovala je odstupanje u uočenom padu savojne čvrstoće sa porastom temperature tretmana.

Kod međusobnog poređenja različitih tretmana, značajna razlika je ustanovljena samo u pet slučajeva i to pri poređenju 5T ploča na 215 °C sa drugim pločama (tri puta) i po jednom za TNTNT ploče na 210 °C i 215 °C. Značajno manja savojna čvrstoća kod 5T ploča na 215 °C, izgleda da je posledica prevelikog narušavanja strukture topolovog furnira na ovoj temperaturi. Kod većine drugih ispitivanih ploča, negativni uticaj termičkih tretmana na savojnu čvrstoću ublažen je ubacivanjem netretiranih listova u konstrukcije ploča, usled čega je došlo do ujednačavanja ovog svojstva.

Kada se porede ploče u okviru istog režima (uokvirene vrednosti u Tabela 5 Prilog 2), ni za jedan režim nije primećena pojava značajnog smanjenja savojne čvrstoće (za uzdužni tip epruveta), sa povećanjem učešća termički modifikovanog furnira u konstrukciji ploče. Značajnost razlike je izostala i kod poređenja istog tipa ploče pri različitim vlažnostima. Od ukupno testiranih 13 parova značajna razlika se nije pojavila ni kod jednog testiranog para.

I kod poprečnog tipa epruveta statistička analiza je pokazala da postoje značajne razlike u savojnoj čvrstoći (ANOVA $F(12,143)=15.203$, $p<.05$), ali je pomoću Bonferroni post hoc test (Levene - $F(12,143)=1.319$, $p<.05$), ustanovljeno mnogo više značajnih razlika u poređenju sa uzdužnim tipom epruveta (Tabela 6 Prilog 2).

Savojna čvrstoća poprečnih kontrolnih (5N) epruveta, značajno se razlikuje samo pri poređenju sa četiri tipa ploče, dok je kod uzdužnog tipa epruveta značajnost bila prisutna pri poređenju sa svim drugim tipovima ploče (12 kom.). Kontrolne ploče su se razlikovale samo od 5T ploča na 200, 210 i 215 °C i od TNTNT ploče na 215 °C. Kod ovih ploča su izračunate najmanje vrednosti savojne čvrstoće (Tabela 32), tako da su se i ostale značajne razlike pojavile pri poređenju drugih ploča sa ovim pločama.

Ako se pogledaju vrednosti iz Tabele 29, može se videti da su izračunate vrednosti savojne čvrstoće poprečnih epruveta za T3NT tip ploče vrlo slične kontrolnim, odnosno one uglavnom blago opadaju sa porastom oštine režima. Očigledno je da donji list kod ovog tipa epruveta malo doprinosi ukupnoj savojnoj čvrstoći (iz razloga koji su već objašnjeni), tako da je ona u najvećoj meri zavisila od centralnog dela epruveta, koji je kod ovih ploča

sačinjen od netretiranih listova furnira. Zato je i razlika između kontrolne (5N) i T3NT ploče na najoštrijem režimu (215 °C), premala da bi se pojavila značajna razlika. Kod TNTNT tipa ploče, netretirani listovi u konstrukciji su doprineli smanjenju negativnog uticaja termički modificovanih listova na ukupnu vrednost savojne čvrstoće. Ova konstatacija se odnosi na blaže režime, ali je kod najoštrijeg režima pad bio preveliki da bi se mogli umanjiti negativni efekti.

Kod 5T ploča, nema netretiranih listova u konstrukciji koji bi mogli smanjiti negativni uticaj termičke modifikacije. Zato je kod ovog tipa ploča primetan pad savojne čvrstoće sa porastom oštine režima i on je u odnosu na kontrolnu ploču iznosio 19,03; 37,04; 39,51 i 47,82% respektivno. Jedino se kod najblažeg režima (190 °C), nije pojavila značajna razlika, dok su 5T ploče na višim temperaturama zabeležile značajno manju savojnu čvrstoću pri poređenju sa skoro svim ostalim tipovima ploča. Ovo je doprinelo i tome da se pojave značajne razlike u savojnoj čvrstoći ploča unutar istog režima (uokvirene vrednosti u Tabeli 6 - Prilog 2). Iz ovog se može zaključiti da su termički tretmani uticali na smanjenje savojne čvrstoće kod poprečnog tipa epruveta, ali skoro isključivo za 5T tip ploče.

Kada se isti tip ploča poredi pri različitim vlažnostima (u apsolutno suvom stanju i posle kondicioniranja na $\phi=60\%$ pri $T=22$ °C), statističkom obradom je utvrđeno da se značajna razlika pojavljuje samo kod TNTNT ploča za režime na 190 °C, 210 °C i 215 °C.

6.2.4.2 Modul elastičnosti pri savijanju

Kao i savojna čvrstoća i modul elastičnosti je ispitivan na dva tipa epruveta: Uzdužnim - kod kojih je tok vlakana gornjih slojeva ploče bio paralelan sa dužom stranom epruvete i Poprečnim - kod kojih je tok vlakana gornjih slojeva ploče bio upravisan sa dužom stranom epruvete. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti prikazani su u Tabelama 30-33. U Tabelama 30 i 31, prikazane su dobijene vrednosti modula elastičnosti podužnih epruveta u apsolutno suvom stanju i posle četiri nedelje kondicioniranja epruveta u klima komori na 60% relativne vlažnosti vazduha pri temperaturi od 22 °C. U Tabelama 32 i 33 nalaze se rezultati za poprečne epruvete pri istim uslovima ispitivanja.

Tabela 30. Modul elastičnosti u aps. stanju vlažnosti, epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	6241,09	5202,44	5496,06	5034,14	4866,04	5215,56	5692,60	5553,63	5088,88	4787,38	4444,61	4765,54	4245,03
SD (σ_{n-1})	482,34	666,14	723,12	701,75	925,41	564,72	657,76	685,12	672,01	737,55	1114,29	752,84	729,66
KOV (v)	7,73	12,80	13,16	13,94	19,02	10,83	11,55	12,34	13,21	15,41	25,07	15,80	17,19
SG (φ_x)	139,24	192,30	208,75	202,58	267,14	163,02	189,88	197,78	193,99	212,91	321,67	217,33	210,64

Tabela 31. Modul elastičnosti pri 60% φ , epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	6077,70	4652,16	5295,29	4969,55	4407,86	4565,80	5436,41	5233,54	4560,62	4852,84	4504,96	4831,91	4283,76
SD (σ_{n-1})	329,42	479,25	522,55	502,09	536,28	492,30	843,41	779,32	735,38	741,03	1298,21	888,33	567,16
KOV (v)	5,42	10,30	9,87	10,10	12,17	10,78	15,51	14,89	16,12	15,27	28,82	18,38	13,24
SG (φ_x)	95,10	138,35	150,85	144,94	154,81	142,12	243,47	224,97	212,29	213,92	374,76	256,44	163,72

Tabela 32. Modul elastičnosti u aps. stanju vlažnosti, epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravni na dužu stranu epruvete (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	2109,38	1894,05	1865,21	1548,80	1968,56	2066,43	1579,43	1825,01	1840,73	1510,70	1715,16	1675,55	1448,82
SD (σ_{n-1})	409,91	287,07	174,45	193,31	277,58	254,00	196,55	83,89	250,46	332,78	242,11	320,55	200,06
KOV (ν)	19,43	15,16	9,35	12,48	14,10	12,29	12,44	4,60	13,61	22,03	14,12	19,13	13,81
SG (φ_x)	118,33	82,87	50,36	55,80	80,13	73,32	56,74	24,22	72,30	96,07	69,89	92,53	57,75

Tabela 33. Modul elastičnosti pri 60% φ , epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravni na dužu stranu epruvete (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	2027,01	1757,49	1991,37	1604,30	1924,37	2000,90	1485,14	1731,32	1846,76	1547,48	1731,93	1742,03	1424,84
SD (σ_{n-1})	472,78	263,64	171,17	191,09	272,79	274,10	128,83	216,57	332,16	274,12	253,77	279,78	341,54
KOV (ν)	23,32	15,00	8,60	11,91	14,18	13,70	8,67	12,51	17,99	17,71	14,65	16,06	23,97
SG (φ_x)	136,48	76,11	49,41	55,16	78,75	79,13	37,19	62,52	95,89	79,13	73,26	80,77	98,59

Kod uzdužnih epruveta, najveća vrednost modula elastičnosti zabeležena je kod kontrolnih ploča u apsolutno suvom stanju (6241,09 MPa), a najmanju vrednost su imale 5T ploče na 215 °C, kondicioniranih na 60% relativne vlažnosti vazduha (4245,03 MPa). Kod poprečnih epruveta, najveća vrednost modula elastičnosti zabeležena je kod kontrolnih ploča u apsolutno suvom stanju (2109,38 MPa), a najmanju vrednost su imale 5T ploče na 215 °C, kondicioniranih na 60% relativne vlažnosti vazduha (1424,84 MPa).

U odnosu na rezultate istraživanja Bal et al. (2014), kod kontrolnih epruveta (pri 60% relativne vlažnosti), izračunate su značajno manje vrednosti za oba ispitivana pravca. Prema rezultatima njihovog istraživanja, modul elastičnosti kod uzdužnog tipa epruveta iznosi 6634 MPa, a kod poprečnog 2104 MPa, naspram 6077 MPa i 2027 MPa - koliko je izračunato u ovom istraživanju. Kao i kod ispitivanja savojne čvrstoće, varijacija podataka kod uzdužnog tipa epruveta bila je slična (KOV 5,42 naspram 8), dok je kod poprečnog tipa epruveta KOV u ovom istraživanju bio daleko veći - 23,32 naspram 8,2.

Pored toga što je KOV kod kontrolnih ploča značajno veći za poprečni tip epruveta, iz Tabela 30-33 može se videti da kod uzdužnog tipa epruveta vrednosti KOV-a uglavnom rastu sa oštrinom tretmana, dok je kod poprečnog tipa epruveta KOV najveći upravo kod kontrolnih epruveta. Porast KOV-a kod uzdužnog tipa epruveta najverovatnije je posledica toga što pri termičkoj modifikaciji nisu svojstva svih tretiranih listova podjednako promenjena (u zavisnosti od strukture pojedinih listova). Ovo se moglo odraziti na module elastičnosti ispitivanih epruveta, odnosno epruvete koje su sadržale termički modifikovani furnir su imale značajno veći opseg ugibanja (pre pojave loma) u odnosu na kontrolne - kod kojih je ovo svojstvo malo variralo. Što je temperatura modifikacije bila veća, povećavala se i varijacija ispitivanog svojstva.

Razlog zašto je KOV (kod poprečnog tipa epruveta) najveći kod kontrolnih ploča, je to što se većina poprečnih epruveta (sa sadržajem termički modifikovanog furnira), usled narušavanja strukture drveta tokom termičke modifikacije, lomila pri malim silama i ugibima epruveta, tako da se i nije mogla registrovati značajnija varijacija ispitivanog svojstva. Nešto veća varijacija kod kontrolnih epruveta je najverovatnije u vezi sa

dubinom pukotina u donjem sloju (kritična tačka pri ispitivanju), pa je u zavisnosti da li su ove pukotine bile dublje ili ne, zavisila i postignuta vrednosti ugiba, odnosno modula elastičnosti pri savijanju.

Radi lakše dalje analize, vrednosti iz Tabela 30-33, zasebno su prikazane u Tabelama 34 i 35. Kod oba tipa epruveta može se primetiti da su termički tretmani najviše uticali na smanjenje modula elastičnosti kod 5T ploča (izuzetak 5T uzdužna na 200 °C), kao i kod svih ploča na 215 °C.

Tabela 34. Modul elastičnosti uzdužnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ °C}$ (MPa)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	0%	6241,09			
T3NT		5202,44	4866,04	5553,63	4444,61
TNTNT		5496,06	5215,56	5088,88	4765,54
5T		5034,14	5692,60	4787,38	4245,03
Kontrolna	60%	6077,70			
T3NT		4652,16	4407,86	5233,54	4504,96
TNTNT		5295,29	4565,80	4560,62	4831,91
5T		4969,55	5436,41	4852,84	4283,76

Tabela 35. Modul elastičnosti poprečnih epruveta u apsolutno suvom stanju i pri $\varphi = 60\%$ i $T=22\text{ °C}$ (MPa)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	0%	2109,38			
T3NT		1894,05	1968,56	1825,01	1715,16
TNTNT		1865,21	2066,43	1840,73	1675,55
5T		1548,80	1579,43	1510,70	1448,82
Kontrolna	60%	2027,01			
T3NT		1757,49	1924,37	1731,32	1731,93
TNTNT		1991,37	2000,90	1846,76	1742,03
5T		1604,30	1485,14	1547,48	1424,84

Testiranje značajnosti razlika i uzdužnih i poprečnih epruveta urađeno je za epruvete kondicionirane pri 60% relativne vlažnosti vazduha, pomoću jednosmerne ANOVE i Bonferroni post hoc test:

Uzdužne Levene - $F(12,143)=2.389$, $p<.05$; ANOVA $F(12,143)=5.951$, $p<.05$

Poprečne Levene - $F(12,143)=1.888$, $p<.05$; ANOVA $F(12,143)=6.049$, $p<.05$

Rezultati testiranja (Tabele 7 i 8 - Prilog 2) pokazali su manje značajnih razlika u odnosu na savojnu čvrstoću, ali su se značajne razlike uglavnom pojavile na istim mestima gde i pri ispitivanju savojne čvrstoće. Iz ovog bi se moglo zaključiti da su isti uzroci uticali na pojavu značajnih razlika i pri ispitivanju savojne čvrstoće i modula elastičnosti, ali da je modul elastičnosti manje osetljiv od savojne čvrstoće na uticaj termičke modifikacije.

Kod uzdužnog tipa epruveta značajno smanjenje modula elastičnosti pojavilo se skoro isključivo pri poređenju kontrolnih sa većinom drugih ploča. Smanjenje modula elastičnosti 5T ploča u odnosu na netretirane iznosilo je 19,23; 27,48; 13,89 i 25,88%, posmatrajući od najblažeg ka najoštrijem tretmanu. Kada se ove vrednosti uporede sa smanjenjem savojne čvrstoće kod istog tipa epruveta (40,13; 27,87; 42,64 i 56,19%), vidi se koliko je manji uticaj termičkih tretmana na modul elastičnosti (jedino je kod režima na 200 °C zabeleženo skoro identično smanjenje upoređivanih svojstava).

Kod poprečnog tipa epruveta, značajne razlike su se pojavile isključivo pri poređenju 5T ploča sa kontrolnim kao i sa drugim pločama na blažim režimima (190 i 200 °C). Ovo znači da je ubacivanje netretiranih listova u konstrukcije ploča doprinelo ublažavanju negativnog uticaja termičke modifikacije na modul elastičnosti kod poprečnog tipa epruveta. Pri tome, zabeleženo smanjenje modula elastičnosti kod 5T ploča (u odnosu na kontrolne) je vrlo ujednačeno: 20,85; 26,73; 23,66 i 29,71%. Kada se ovi rezultati uporede sa smanjenjem savojne čvrstoće kod istog tipa epruveta (19,03; 37,04; 39,51 i 47,82%), vidi se da termički tretmani i kod ovog tipa epruveta manje utiču na modul elastičnosti nego na savojnu čvrstoću. Izuzetak je najblaži tretman od 190 °C, kod kojeg su zabeležene skoro iste vrednosti smanjenja modula elastičnosti i savojne čvrstoće - 20,85% naspram 19,03%.

U odnosu na povećanje učešća termički modifikovanog furnira u konstrukciji ploče (uokvirene vrednosti u Tabelama 7 i 8 - Prilog 2), samo je u 4 slučaja od upoređivanih 24 primećeno postojanje signifikantne razlike u modulu elastičnosti. I pri poređenju različitih vlažnosti od ukupno testiranih 26 parova, značajna razlika je zabeležena samo kod jednog para - kod uzdužnih epruveta TNTNT ploča na 200 °C.

Iz gore prikazanog, može se zaključiti da su termički tretmani manje uticali na smanjenje modula elastičnosti nego na smanjenje savojne čvrstoće, kao i da nije konstatovan značajniji uticaj konstrukcije ploča, kao i promene vlažnosti, na izračunate vrednosti modula elastičnosti. Iako je zaključeno da termički tretmani manje utiču na modul elastičnosti nego na savojnu čvrstoću, ovi rezultati su u suprotnosti sa rezultatima istraživanja Fioravanti et al. (2013), po kojima nema značajnog uticaja termičke modifikacije furnira na modul elastičnosti furnirske ploče konstruisane od tako tretiranog materijala. Različiti zaključci su najverovatnije posledica različitih termičkih tretmana korišćenih u ovim istraživanjima. Ako se ovi rezultati uporede sa istraživanjima urađenim na masivnom drvetu, onda se ovi rezultati najviše poklapaju sa istraživanjima Kubojima et al. (2000 i 2001), prema kojima se modul elastičnosti smanjuje posle termičkih tretmana, a suprotna su u odnosu na istraživanja Shi et al. (2007) i Kocaefe et al. (2008a), prema kojima modul elastičnosti raste posle termičkih tretmana. Ova poređenja se moraju uzeti sa velikom rezervom, pošto su upoređivana istraživanja urađena na različitom materijalu i vrstama drveta.

Interesantno je da se pri ispitivanju savojne čvrstoće i modula elastičnosti kod TNTNT tipa ploča, često dešavalo da početni lom nastane po sredini ispitivane epruvete, razdvajanjem dva susedna lista furnira (Slika 49). Već je rečeno da su pri ispitivanju savojne čvrstoće delovi ispod neutralne ose izloženi naponu na zatezanje, a delovi iznad ose neutralnosti naponu na pritisak. U delu oko same ose neutralnosti, prisutan je napon na smicanje. Kod TNTNT ploča, ovaj napon je mogao biti prisutan između dva različita susedna sloja, odnosno između sloja termički modifikovanog i sloja netretiranog topolovog furnira. Očigledno da veza između ova dva raznorodna sloja (kod većeg boja epruveta), nije bila dovoljno jaka da izdrži napone koje su proizvodile sile smicanja.



Slika 49. Izgled loma pojedinih epruveta TNTNT ploča, pri ispitivanju savojne čvrstoće

6.2.4.3 Upotrebna klasifikacija

Pored statističke analize rezultata, od praktične koristi je da se dobijene vrednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti uporede sa upotrebnim vrednostima propisanim standardima. Poređenje je izvršeno prema važećem evropskom standardu EN 636, u kojem su definisane minimalne vrednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti koje svrstavaju ispitivanu ploču u odgovarajuću kategoriju. Prema odredbama ovog standarda, klasifikacija se vrši u odnosu na izračunate vrednosti savojne čvrstoće i modula elastičnosti po dužini i širini ploče (uzdužne i poprečne epruvete). U Tabeli 36 sa F je označena savojna čvrstoća, a sa E modul elastičnosti. Prva vrednost odnosi se na podužne, a druga na poprečne epruvete.

Iz Tabele 36 se vidi da sa porastom vlažnosti dolazi do blagog rasta klasifikacije pojedinih ploča. Kako se furnirske ploče nikad ne isporučuju u apsolutno suvom stanju, upotrebna klasifikacija ploča u apsolutno suvom stanju nije od praktičnog značaja. Prema odredbama evropskog standarda EN 315, vlažnost ploča mora se kretati u granicama $10\pm 2\%$. Ove granice odgovaraju vrednostima pri kondicioniranju ploča na 60% relativne vlažnosti vazduha (Tabela 18), pa je analiza urađena za ploče kondicionirane u ovim uslovima.

Tabela 36. Klasifikacija ploča prema standardu EN 636

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	0%	F 25/10 E50/10			
T3NT		F10/10 E40/15	F 10/5 E30/10	F15/10 E40/15	F5/10 E20/10
TNTNT		F15/5 E40/15	F10/10 E40/15	F10/5 E30/10	F5/5 E30/10
5T		F10/5 E30/10	F10/5 E40/10	F5/3 E30/5	F10/3 E25/10
Kontrolna	60%	F30/10 E50/10			
T3NT		F15/10 E30/10	F10/10 E30/10	F10/15 E30/10	F5/10 E20/10
TNTNT		F15/10 E40/15	F15/10 E30/15	F10/10 E30/10	F5/10 E30/10
5T		F10/10 E40/10	F20/5 E30/10	F15/3 E30/10	F10/3 E30/10

*F - savojna čvrstoća; E - modul elastičnosti pri savijanju

Najveće vrednosti po ovoj klasifikaciji ostvarile su kontrolne (5N) ploče. U odnosu na sve druge ploče, 5N ploče imaju veću klasifikaciju savojne čvrstoće i modula elastičnosti po dužini (prva cifra). Pri tome je razlika veća kod savojne čvrstoće, jer je prva sledeća vrednost (20) za dve kategorije lošija, u odnosu na 30 kod modula elastičnosti (lošije za jednu kategoriju).

U odnosu na ispitivane vrednosti po širini ploče (druga cifra), skoro sve ploče imaju ili iste ili vrednosti lošije za jednu kategoriju. Ovo bi značilo da, ako je pri upotrebi ovih ploča kritično opterećenje po širini ploče, nema bitnije razlike između kontrolne i većine drugih ploča. Naprotiv, ako je kritično opterećenje po dužini ploče, 5N ploče imaju prednost u odnosu na sve druge ploče.

Najbliže po dostignutim kategorijama 5N ploča, su TNTNT ploče na 190 i 200 °C. U odnosu na 5N ploče ova dva tipa ploča imaju iste vrednosti savojne čvrstoće po širini, veći modula elastičnosti po širini, nešto manji modula elastičnosti po dužini, ali značajno manju savojnu čvrstoću po dužini. Sa stanovišta dostignute kategorije savojne čvrstoće, vrlo je diskutabilna mogućnost upotrebe 5T ploče na 210 °C i 215 °C, kao i svih ploča na 215 °C. Vrednost 3 kod savojne čvrstoće označava najnižu kategoriju, a 5 prvu sledeću. Pri poređenju ploča po vrsti, u odnosu na klasifikaciju po standardu EN 636, najbolje rezultate su pokazale TNTNT ploče.

6.2.5 Smicajna čvrstoća u sloju lepka

Smicajna čvrstoća ispitivanih ploča računata je prema zahtevima standarda EN 314-1 i EN 314-2. Prednost ovih standarda je u tome što nije potrebno imati različita merila u zavisnosti od ispitivane vrste, tj. da li je ispitivana vrsta četinar, meki ili tvrdi lišćar, ili egzota, što je bila mana nekih prethodnih standarda (SRPS D.A8.067). Još jedna prednost ovog standarda je što se svaki par linija lepljenja ispituje posebno, što kod prethodnih standarda nije bio slučaj. Na ovaj način se može ustanoviti postojanje sistemске greške u slučaju da neki par linija lepljenja konstantno daje slabije rezultate, npr. pri korišćenju različitih vrsta u konstrukciji ploče.

U Tabelama 37-39, prikazane su dobijene srednje vrednosti smicajne čvrstoće, procentualnog učešća loma u zoni drveta i po liniji lepljenja. U odnosu na kriterijume standarda data je i ocena da li su ovi kriterijumi zadovoljeni ili ne. Ispitivanja su vršena za tri tipa vodootpornosti ploča tj. za ploče koje se koriste u suvim uslovima, za ploče koje se koriste u vlažnim uslovima i za ploče koje se koriste u eksterijeru (klasifikacija prema EN 636).

Jedna od pretpostavki je bila da će se ploče konstruisane od termički modifikovanog, ili od kombinacije termički modifikovanog i nemodifikovanog furnira, pokazati kao postojanije pri ispitivanju vodootpornosti u odnosu na kontrolne ploče. Rezultati ispitivanja su, međutim, dali potpuno drugačije rezultate od očekivanih (Tabele 37-39). Najveće vrednosti smicajne čvrstoće u sloju lepka zabeležene su upravo kod kontrolnih ploča i to kod sva tri tipa epruveta. Takođe, jedino je ovaj tip ploča ispunio propisane zahteve za sva tri stepena vodootpornosti.

Tabela 37. Mogućnost upotrebe pojedinih ploča u suvim uslovima (prema EN 314-1 i EN 314-2)

Režim		190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
Vrsta	Kontrolna	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
Smicajna čvrstoća (MPa)	1,603	1,488	1,228	1,326	1,417	1,397	1,141	1,150	1,232	0,883	1,231	1,005	0,837
Lom u zoni drveta (%)	67,92	71,17	39,36	82,14	66,94	76,50	76,50	56,00	60,00	49,09	62,22	50,78	52,22
Prošla test	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da

Tabela 38. Mogućnost upotrebe pojedinih ploča u uslovima povećane vlažnosti (prema EN 314-1 i EN 314-2)

Režim		190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
Vrsta	Kontrolna	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
Smicajna čvrstoća (MPa)	1,220	1,016	0,701	0,770	1,018	0,905	0,753	0,947	0,741	0,674	0,876	0,724	0,626
Lom u zoni drveta (%)	16,25	2,50	12,50	6,67	13,75	9,17	13,75	33,91	14,82	19,05	24,50	25,45	23,00
Prošla test	da	da	ne	ne	da	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne

Tabela 39. Mogućnost upotrebe pojedinih ploča u eksterijeru (prema EN 314-1 i EN 314-2)

Režim		190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
Vrsta	Kontrolna	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
Smicajna čvrstoća (MPa)	1,095	0,803	0,624	0,675	0,843	0,763	0,719	0,970	0,735	0,634	0,825	0,720	0,588
Lom u zoni drveta (%)	5,42	1,25	1,67	8,33	15,83	9,47	4,17	23,64	19,17	17,08	20,23	24,91	21,86
Prošla test	da	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne

Pri ispitivanju pogodnosti za upotrebu u suvim uslovima, sve ploče su prošle test, pri čemu se (uz mala odstupanja), smicajna čvrstoća smanjuje sa povećanjem oštine režima kao i sa povećanjem učešća termički modifikovanog furnira u konstrukciji ploče. Tako je najveća vrednost od 1,603 MPa zabeležena kod kontrolne ploče, a najmanja kod 5T ploče na 215 °C - 0,837 MPa.

Učešće loma u zoni drveta se za ovaj tip vodootpornosti ploča kreće od 39,36% do 82,14%, pri čemu je kod većine ispitivanih ploča ovaj procenat bio preko 50%. Visoko učešće loma u zoni drveta govori da predtretman (24 h potapanje u vodu temperature 20 °C) nije previše narušio kvalitet lepljene veze, te da su razlike u smicajnoj čvrstoći (kod testiranja ove klase vodootpornosti) najviše nastale kao posledica smanjenja mehaničkih svojstava termički modifikovanog furnira.

Zbog načina izrade epruveta (propisanih standardom), pri ispitivanju smicajne čvrstoće dva spoljašnja i srednji sloj su bili izloženi naponu na zatezanje paralelno sa vlakancima, dok su drugi i četvrti sloj bili izloženi naponu na zatezanje upravno na vlakanca. Ovo znači da su kod 5N ploče, tri netretirana lista bila izložena zatezanju paralelno, a dva upravno na vlakanca, kod T3NT tipa ploče, dva termički tretirana i jedan netretiran list su bili izloženi zatezanju paralelno i dva netretirana upravno na vlakanca, kod TNTNT tipa ploče, tri tretirana lista su bila izložena zatezanju paralelno, a dva netretirana upravno na vlakanca, dok su kod 5T ploče tri tretirana lista bila izložena zatezanju paralelno, a dva upravno na vlakanca.

U uslovima kad kvalitet lepljene veze nije previše oslabio, samo je smanjenje zatezne čvrstoće tretiranih listova moglo doprineti ovakvim rezultatima. Da termička modifikacija utiče na smanjenje zatezne čvrstoće ustanovili su Boonstra et al. (2007), tako da je ovo najverovatniji uzrok primećenom smanjenju smicajne čvrstoće pri ispitivanju ploča za upotrebu u suvim uslovima. Kritična tačke kod 5T ploča su bila dva tretirana lista izložena zatezanju popreko na vlakanca. Kako ni jedna druga ploča nije imala tretirane listove izložene ovom naponu, ne čude slabije vrednosti smicajne čvrstoće kod ovog tipa ploče, pogotovo sa rastom oštine režima.

T3NT ploče su uglavnom pokazale nešto veće vrednosti smicajne čvrstoće u odnosu na TNTNT ploče. Ovo je najverovatnije posledica toga što su kod T3NT ploča dva, a kod TNTNT tri termički modifikovana lista bila izložena naponu na zatezanje paralelno sa vlakancima. Da kod ovih ploča kritična tačka nisu dva netretirana lista izložena naponu na zatezanje popreko na vlakanca, govore podaci o smicajnoj čvrstoći netretiranih 5N ploča. Kod netretiranih ploča, kritične tačke su upravo dva netretirana lista izložena naponu na zatezanje popreko na vlakanca. Da je čvrstoća na zatezanje paralelno sa vlakancima tretiranih listova, bila veća od čvrstoće na zatezanje upravno na vlakanca netretiranih listova, onda bi vrednosti smicajne čvrstoće T3NT i TNTNT ploča bile približno iste kontrolnim 5N pločama.

Pooštravanje predtretmana, (pri ispitivanju mogućnosti upotrebe ovih ploča za uslove povećane vlažnosti i za spoljašnju upotrebu), dovodi do značajnog pada smicajne čvrstoće ispitivanih ploča. Ovo pokazuju i rezultati testiranja pomoću jednosmerne ANOVE i Bonferroni post hoc testa, prema kome su od ukupno ispitanih 26 parova, nađene značajne razlike kod 24 para istog tipa ploče pri poređenju ploča za upotrebu u suvim sa pločama za upotrebu u vlažnim uslovima i pri poređenju ploča za upotrebu u suvim sa pločama za upotrebu u eksterijeru (jedino kod T3NT ploče na 210 °C ove razlike nema). Pri isto testiranju, nijedan od 13 ispitanih parova nije pokazao značajnost razlike smicajne čvrstoće kod istog tipa ploče pri poređenju ploča za upotrebu u vlažnim uslovima sa pločama za upotrebu u eksterijeru.

Ovaj pad smicajne čvrstoće najverovatnije nije nastao kao posledica dodatnog slabljenja mehaničkih svojstava listova furnira pod dejstvom predtretmana, već je posledica slabljenja veze između lepka i furnira (prouzrokovane promenom hemijskog sastava površine tretiranog furnira). U prilog ovoj tvrdnji govore podaci o učešću loma po zoni drveta koji je kod ispitivanja mogućnosti upotrebe ploča u suvim uslovima prosečno iznosio 62,37%, da bi ovaj prosek pao na 16,56% i 13,31% kod vlažnih i spoljašnjih uslova.

Pad smicajne čvrstoće sa povećanjem oštine predtretmana bio je očekivan, ali pretpostavka je bila da će kod ploča konstruisanih sa učešćem termički modifikovanog

furnira, pad smicajne čvrstoće biti manji. Očekivalo se da će manja hidrofilnost (kao posledica termičkih tretmana), da dovede do smanjenja bubrenja i da će se samim tim smanjiti sile koje teže da odvoje pojedine listove u konstrukciji, tj. da će se umanjiti negativno dejstvo predtretmana na kvalitet lepljene veze. Pretpostavljalo se da će tretirani listovi u konstrukciji ploče predstavljati barijeru za prodiranje vode, te da će smanjeno bubrenje ovih ploča biti dovoljno da nadomesti lošiji kvalitet lepljene veze prouzrokovan lepljenjem termički modifikovanih furnira pomoću vodorazredivog lepka.

Ako se pogledaju vrednosti učešća loma po zoni drveta u Tabelama 38 i 39 (vlažni uslovi i eksterijer), može se videti da (uz pojedina odstupanja) ovo učešće raste kod istog tipa ploče sa oštrinom tretmana. Ovo znači da je pri poređenju istog tipa ploče, lepljena veza pre popuštala kod blažih režima. Ovo jeste bilo u skladu sa pretpostavkom, ali je i najveća vrednost od 33,91% (T3NT ploča na 210 °C) premala da bi postignuta smicajna čvrstoća u sloju lepka zadovoljila zahteve standarda.

Da je problem bio u spoju između tretiranih i netretiranih listova, odnosno da je različito menjanje dimenzija tretiranih i netretiranih furnira uticalo na smanjenje jačine lepljene veze, onda bi 5T ploče (konstruisane samo od tretiranih furnira), zabeležile bolje vrednosti u odnosu na TNTNT i T3NT ploče u okviru istog režima. Kako to nije bio slučaj i kako je kod podjednako malog učešća loma u zoni drveta bilo potrebno primeniti veće sile da bi popustio lepak kod kontrolnih ploča, jedino logično objašnjenje je da se primenjeni MUF lepak nije pokazao kao pogodan za lepljenje termički modifikovanog furnira. Ovo potvrđuju i skorašnja istraživanja (Fioravanti et al. 2013), po kojima se smicajna čvrstoća u sloju lepka (kod ploča konstruisanih od termički tretiranih listova topolovog furnira), smanjila posle drugog predtretmana (ploče za upotrebu u uslovima povećane vlažnosti), za oko 64%.

Melamin-formaldehid (MF) i melami-urea-formaldehid (MUF) lepkovi su jedni od najčešće korišćenih u proizvodnji ploča na bazi drveta namenjenih za upotrebu u uslovima povećane vlažnosti ili u eksterijeru (Pizzi, Mittal 2003). Kako su MUF lepkovi jeftiniji od MF lepkova, češće se koriste u proizvodnji vodootpornih furnirskih ploča, pa je zato ovaj tip lepka i odabran pri izradi eksperimenta. Prema radovima

Šerneka et al. (2008) i Kariža (2011), moguće je ostvariti dobar kvalitet lepljene veze pri upotrebi MUF lepkova sa termički modifikovanim drvetom. Oni su na različitim vrstama poredili dobijeni kvalitet lepljene veze pri upotrebi različitih lepkova. U oba ova rada, autori su konstatovali da se najbolji kvalitet lepljene veze ostvaruje pomoću poliuretanskih PUR lepkova, ali su takođe konstatovali da je moguće ostvariti zadovoljavajući kvalitet lepljene veze pri lepljenju termički modifikovanog drveta MUF lepkom.

Teško je uporediti rezultate ovih istraživanja sa ovde prikazanim podacima, zato što postoje velike razlike u načinu pripreme uzoraka i načinu ispitivanja. Tako su Šernek et al. (2008), termički modifikovali različite vrste pomoću Plato procesa modifikacije na 180 °C u trajanju od 2 h i zatim pripremljene uzorke slepljivali u grede pri pritisku od 1 MPa. Iz greda su potom uzimani uzorci za ispitivanje smicajne čvrstoće po EN 13354 standardu. Deo koji je interesantan za poređenje, sa stanovišta problematike koja se obrađuje u ovom istraživanju, je ispitivanje termički modifikovanih uzoraka topolovog klona I-214, slepljenih MUF vezivom. Pre ispitivanja smicajne čvrstoće po EN 13354 standardu, istraživači su uzorke podelili u dve grupacije – prvu koju su ispitivali u suvom stanju i drugu koja je predtretirana na isti način kao druga grupa uzoraka u ovom istraživanju (ploče za upotrebu u uslovima povećane vlažnosti).

Kako je određivanje smicajne čvrstoće u zoni lepka rađeno po različitim standardima, vrednosti smicajne čvrstoće nisu uporedive, ali bi rezultati o učešću loma u zoni drveta mogli biti interesantni pošto je u pitanju ista vrsta lepljena pomoću MUF veziva pri istom pritisku (različite dimenzije epruveta utiču na ostvarenu smicajnu čvrstoću, ali ne i na kvalitet lepljene veze). Šernek et al. su dobili da je učešće loma u zoni drveta sa 100% kod suvih uzoraka, palo na 82% kod vlažnih. Istovremeno je smicajna čvrstoća opala za polovinu, što su autori objasnili padom mehaničke čvrstoće drvnog tkiva usred kuvanja i upijanja vode, a ne padom adhezije MUF lepka, barem ne u većoj meri.

Kariž (2011), koji je uzorke smrče termički tretirao na temperaturama od 150 do 230 °C u trajanju od 3 h, je pri ispitivanju smicajne čvrstoće u sloju lepka po EN 392 standardu, dobio da je kod uzoraka slepljenih MUF lepilom (pri pritisku od 1 MPa), učešće loma u

zoni drveta oko 95% za suve uzorke i 100% za uzorke tretirane po prvom predtretmanu ovog ispitivanja (ploče za upotrebu u suvim uslovima). Ovo znači da su svi uzorci lepljeni MUF lepilom, posle potapanja 24 h u vodu temperature od 20 °C, pri ispitivanju smicajne čvrstoće lomili isključivo u zoni drveta.

Uz sva ograničenja koja proizilaze iz različite pripreme i načina ispitivanja uzoraka lepljenih MUF vezivom, razlike u učešću loma u zoni drveta su prevelike u odnosu na ovo ispitivanje – Kariž: 100% naspram 62,37%; Šernek: 82% naspram 16,56%. Iz ovako različitog učešća loma u zoni drveta, proizilaze i različiti zaključci o pogodnosti upotrebe MUF lepila za termički modifikovano drvo (pogotovo u uslovima povećane vlažnosti).

Bitna razlika između gore spomenutih eksperimenata i ovog istraživanja, je u tome što su ovi istraživači koristili hladno očvršćavajuće MUF lepilo, dok je ovde korišćen MUF lepak za vruć postupak očvršćavanja. Zato su i vremena presovanja kod spomenutih eksperimenata iznosila 90 i 180 min, dok je kod postupka vrućeg presovanja vreme presovanja bilo 15 min.

Vruće očvršćavajući MUF lepak je izabran za rad u ovom eksperimentu, zato što nije moguće koristiti hladno očvršćavajući MUF lepak u industrijskoj proizvodnji (proces presovanja bi bio predugačak). Na osnovu istraživanja Sahin Kol et al. (2009), moglo se pretpostaviti da će vruće očvršćavajuće MUF vezivo dati nešto lošiji kvalitet lepljene veze u odnosu na hladno očvršćavajuće. Oni su za termički tretirane uzorke tali (*Erythrophleum ivorense*) i iroko (*Chlorophora excelsa*) drveta, dobili da je učešće loma u zoni drveta (kod suvih uzoraka lepljenih MUF smolom), prosečno iznosilo oko 75% i 80%. Nažalost, Sahin Kol et al. nisu vršili ispitivanje smicajne čvrstoće u sloju lepka posle nekog od opisanih predtretmana, tako da se nije moglo pretpostaviti da će ovi predtretmani dovesti do naglog smanjenja smicajne čvrstoće u sloju lepka.

Rečeno je da usled hemijskih promena tretiranog materijala tokom procesa termičke modifikacije postoje ograničenja pri lepljenju termički modifikovanog drveta pomoću vodorazredivih lepkova (Šernek et al. 2008, Paul et al. 1998...). Može se pretpostaviti da

dugotrajan proces presovanja hladno očvršćavajućeg MUF veziva, daje ovim lepkovima veću mogućnost da se razliju i prodru u strukturu drveta, u odnosu na kratkotrajno presovanje tokom vrućeg postupka. Sa stanovišta teorije mehaničkog kačenja (Frihart 2005b), dublja penetracija lepka omogućava stvaranje čvršćeg spoja između lepka i drveta, odnosno, da bi se razdvojila ovako formirana veza, potrebno je upotrebiti veću silu - pogotovo kad su u pitanju smicajne sile.

Da je dugotrajan proces presovanja odgovoran za veću smicajnu čvrstoću pri primeni hladno očvršćavajućeg MUF lepka (u odnosu na MUF lepak za vruć postupak presovanja), može se pretpostaviti i na osnovu rezultata Kariža (2011). On je zaključio da se pri lepljenju termički modifikovanog drveta, bolji rezultati postižu ako se produže preporučena vremena presovanja.

7. ZAKLJUČCI

Predmet istraživanja ovog rada je bilo ispitivanje mogućnosti primene termički modificiranih listova topolovog furnira u proizvodnji furnirskih ploča u industrijskim uslovima. Formatirani topolovog furnira tretirani su na temperaturama od 190 °C, 200 °C, 210 °C i 215 °C u trajanju od 1 h. Kombinovanjem tretiranih i netretiranih listova topolovog furnira, proizvedeno je trinaest različitih tipova ploča.

Osnovni cilj ovog rada je bio da se istraži kako termička modifikacija topolovog furnira utiče na promenu ispitivanih fizičkih i mehaničkih svojstava furnirskih ploča proizvedenih od ovog materijala. Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja i njihove analize zaključeno je sledeće:

- Ustanovljeno je da postoji značajna razlika u boji topolovog furnira nastalog iz zone beljike, međuzone i iz zone lažne srčevine pre termičke modifikacije. Najveća razlika je zabeležena pri poređenju netretiranog furnira iz zone beljike i zone lažne srčevine, a na osnovu izračunate vrednosti parametra ΔE od 7,69 ova razlika je svrstana u kategoriju velike razlike u boji. Sa stanovišta izjednačavanja boje, najbolji rezultati ostvareni su pomoću tretmana na 210 °C. Nešto lošije rezultate dao je tretman na 215 °C, dok se tretmani na 190 i 200 °C nisu pokazali kao zadovoljavajući;
- U zavisnosti da li su izrađeni iz zone lažne srčevine, međuzone ili iz zone beljike, furniri su imali različitu prosečnu vlažnost pre i posle sušenja u fabričkoj sušari. Za formate iz zone beljike ova vlažnost je iznosila 125,50% pre i 2,73% posle sušenja, dok su formati iz lažne srčevine imali vlažnost od 181,25% pre i 5,33% posle sušenja. Ovi podaci ukazuju da pre procesa sušenja treba izvršiti razvrstavanje furnira na one koje sadrže lažnu (mokru) srčevinu i one bez nje, te da ovako razvrstane furnire treba sušiti po dva različita režima, ukoliko se želi dobiti ujednačeni sadržaj vlage;
- Ploče konstruisane samo od termički modificiranog topolovog furnira (na temperaturama od 190, 200, 210 i 215 °C), zabeležile su značajno manju ravnotežnu vlažnost u odnosu na kontrolne ploče (pri $\phi=60\%$ i $T=22\text{ °C}$) i to za 4,42%; 8,76%;

27,41% i 29,97%. Velika razlika od skoro 20% smanjenja vlažnosti (između tretmana na 200 i 210 °C), potencijalno ukazuje na drastičnije narušavanje hemijskog sastava tretiranog furnira topole na temperaturama od oko 210 °C.

- Kod ploča konstruisanih od listova tretiranih na temperaturama iznad 200 °C, dolazi do značajnog smanjenja gustine. Ovo se prvenstveno odnosi na režim od 215 °C, kod koga je i zabeležen najveći broj značajnih razlika. Konstrukcija ploča nije pokazala značajniji uticaj na promenu gustine;

- U uslovima povećane vlažnosti vazduha, ploče konstruisane od furnira tretiranog na višim temperaturama, kao i ploče konstruisane sa većim učešćem termički modifikovanog furnira, imale su niže vrednosti ravnotežne vlažnosti. Posle devet nedelja, kontrolne ploče su zabeležile najveću ravnotežnu vlagu od 22,74%, dok je najmanju promenu vlažnosti imala ploča konstruisana samo od termički modifikovanih listova (5T) na temperaturi od 215°C - 13,14%. U odnosu na kontrolne ploče, dostignuta vlažnost ploča konstruisanih samo od termički tretiranih furnira (na temperaturama od 190, 200, 210 i 215 °C), bila je manja za 23,18; 34,26; 40,29 i 42,22%;

- Na smanjenje ravnotežne vlažnosti konstrukcija ploče imala je veći uticaj od temperature modifikacije. Sa stanovišta upotrebe ovih ploča, značajno je da se do pozitivnih efekata može doći i primenom nižih temperatura, ali korišćenjem druge konstrukcije - npr. ploča TNTNT na 190 °C umesto ploče T3NT na 215 °C;

- U odnosu na kontrolne ploče očekivano najmanje povećanje dimenzione stabilnosti (mereno preko ASE pokazatelja), zabeleženo je kod T3NT ploče na 190 °C (8,64%), a najveće kod 5T ploče na 215 °C (58,23%). Vrlo približne vrednosti povećanja dimenzionalne stabilnosti zabeležene su kod T3NT ploča na 200, 210 i 215 °C i kod TNTNT ploče na 190 °C. Kod ovih ploča vrednosti ASE pokazatelja kretale su se od 21,21 do 24,79%, tako da bi zbog manjeg narušavanja mehaničkih svojstava, logičnija bila upotreba ploča T3NT na 200 °C i TNTNT ploča na 190 °C od T3NT ploča na 210 i 215 °C;

- Najveća vrednost tvrdoće po Brinelu od 13,17 MPa, dobijena je kod kontrolne ploče (5N) u apsolutno suvom stanju, dok je najmanja vrednost zabeležena kod TNTNT ploče pri 60% relativne vlažnosti vazduha za režim od 215 °C - 7,41 MPa. Kontrolne ploče pokazale su značajno veću tvrdoću u odnosu na sve druge tipove ploča, odnosno može se zaključiti da je termička modifikacije furnira topole smanjila tvdoću ploča konstruisanih od tako tretiranih listova. Pri poređenju različitih režima, razlika u tvrdoći postoji, ali samo se režim na 190 °C značajno razlikuje od režima na 210 i 215 °C.

- Upoređivanjem vrednosti savojne čvrstoće kod uzdužnih i poprečnih epruveta, može se videti da uzdužne epruvete imaju veću savojnu čvrstoću od poprečnih, pri čemu je ova razlika kod kontrolnih (5N) i ploča sastavljenih samo od termički modifikovanih listova (5T) skoro dvostruka, dok je kod T3NT i TNTNT ploča razlika primetna, ali varira u zavisnosti od primenjenog režima;

- Testiranjem vrednosti savojne čvrstoće uzdužnih epruveta, utvrđeno je da se značajna razlika pojavljuje pri poređenju kontrolnih sa svim drugim pločama. Kod međusobnog poređenja različitih tretmana, značajna razlika je ustanovljena pri poređenju blažih tretmana (190 i 200 °C) sa najoštrijim tretmanom 215 °C. Kod većine drugih ispitivanih ploča, negativni uticaj termičkih tretmana na savojnu čvrstoću ublažen je ubacivanjem netretiranih listova u konstrukcije ploča. Kod poprečnog tipa epruveta, termički tretmani su uticali na smanjenje savojne čvrstoće, ali skoro isključivo kod 5T tipa ploče. Kod ovog tipa ploče primetan je pad savojne čvrstoće sa porastom oštine režima i on je u odnosu na kontrolnu ploču iznosio 19,03; 37,04; 39,51 i 47,82% respektivno;

- Kod uzdužnog tipa epruveta najveća vrednost modula elastičnosti zabeležena je kod kontrolnih ploča u apsolutno suvom stanju (6241,09 MPa), a najmanju vrednost su imale 5T ploče na 215 °C, kondicioniranih na 60% relativne vlažnosti vazduha (4245,03 MPa). Kod poprečnih epruveta, najveća vrednost modula elastičnosti zabeležena je kod kontrolnih ploča u apsolutno suvom stanju (2109,38 MPa), a najmanju vrednost su imale 5T ploče na 215 °C, kondicioniranih na 60% relativne vlažnosti vazduha (1424,84 MPa);

- Rezultati testiranja pokazali su da postoji manje signifikantnih razlika kod modula elastičnosti u odnosu na savojnu čvrstoću, a ove razlike uglavnom su se pojavile na istim mestima, što ukazuje da je modul elastičnosti manje osetljiv od savojne čvrstoće na uticaj termičke modifikacije. Nije konstatovan značajniji uticaj konstrukcije ploča, kao i promene vlažnosti, na izračunate vrednosti modula elastičnosti;

- Sa stanovišta upotrebne klasifikacije, očekivano najveće vrednosti ostvarile su kontrolne 5N ploče. Najbliže 5N pločama po dostignutim vrednostima su TNTNT ploče na 190 i 200 °C. Sa stanovišta dostignute kategorije savojne čvrstoće, vrlo je diskutabilna mogućnost upotrebe svih ploča na 215 °C kao i 5T ploče na 210 °C;

- Rezultati ispitivanja smicajne čvrstoće u sloju lepka pokazali su da su najveće vrednosti zabeležene kod kontrolnih ploča i to kod sva tri tipa epruveta. Takođe, jedino je ovaj tip ploče ispunio propisane zahteve za sva tri stepena vodootpornosti;

- Pri ispitivanju pogodnosti za upotrebu u suvim uslovima sve ploče su prošle test, pri čemu (uz mala odstupanja), smicajna čvrstoća opada sa povećanjem oštine režima kao i sa povećanjem učešća termički modifikovanog furnira u konstrukciji ploče. Tako je najveća vrednost od 1,603 MPa zabeležena kod kontrolne ploče, a najmanja kod 5T ploče na 215 °C - 0,837 MPa. Učešće loma u zoni drveta se za ovaj tip vodootpornosti ploča kreće od 39,36% do 82,14%, pri čemu je kod većine ispitivanih ploča ovaj procenat bio preko 50%;

- Pooštavanje predtretmana (pri ispitivanju mogućnosti upotrebe ovih ploča za uslove povećane vlažnosti i za spoljašnju upotrebu) dovodi do značajnog pada smicajne čvrstoće ispitivanih ploča. Ovaj pad smicajne čvrstoće najverovatnije nije nastao kao posledica dodatnog slabljenja mehaničkih svojstava listova furnira pod dejstvom predtretmana, već kao posledica slabljenja veze između lepka i furnira. U prilog ovoj tvrdnji govore podaci o učešću loma po zoni drveta koji je kod ispitivaja mogućnosti upotrebe ploča u suvim uslovima prosečno iznosio 62,37%, da bi ovaj prosek pao na 16,56% i 13,31% kod vlažnih i spoljašnjih uslova;

Mogućnosti upotrebe ispitivanih ploča

Cilj ovog istraživanja bio je da se ustanovi da li bi se proizvodnjom furnirskih ploča od termički modifikovanog topolovog furnira dobio materijal koji bi bio dimenzionalno stabilniji u odnosu na klasične topolove furnirske ploče, a da pri tome ne dođe do prevelikog narušavanja mehaničkih svojstava.

Na osnovu svih sprovedenih ispitivanja i testiranja može se zaključiti da se tretman na 215 °C pokazao kao neadekvatan, jer je previše smanjio ispitivana mehanička svojstva kod svih konstrukcija ploča. Furnirske ploče koje sadrže listove topolovog furnira tretiranog na ovoj temperaturi mogle bi se upotrebiti samo u slučajevima kad se želi postići odgovarajuća boja, a da pri tome ploče ne trpe veća opterećenja.

Nasuprot režimu od 215 °C, kod režima na 190 °C najmanje su se smanjila ispitivana mehaničkih svojstava, ali je isto tako ovaj režim ograničeno uticao na smanjenje ravnotežne vlažnosti i debljinskog bubrenja. Upotrebu ploča konstruisanih od topolovog furnira tretiranog na ovoj temperaturi trebalo bi ograničiti na enterijer (klasa trajnosti 1 po EN 335-1 standardu - upotreba u enterijeru bez mogućnosti kvašenja). Kod ovog režima najlogičnija bi bila upotreba T3NT ploča, pomoću kojih bi se ostvario estetski prihvatljiviji vizuelni efekat u odnosu na standardne topolove furnirske ploče, pri čemu bi mehanička svojstva najmanje bila narušena.

Režimi na 200 °C i 210 °C su u većini slučajeva pokazivali slične vrednosti ispitivanih svojstva. Izbor između ova dva režima zavisio bi od namene ploča, odnosno u slučaju kada se zahtevaju nešto bolja mehanička svojstva prednost treba dati režimu na 200 °C, a režimu na 210 °C kada se zahtevaju nešto bolja fizička svojstva. U odnosu na standard EN 335-1, ove ploče bi se mogle svrstati u klasu trajnosti 2 - upotreba u enterijeru sa povremenom mogućnošću kvašenja, ili u klasu 3.1 - upotreba u natkrivenom eksterijeru (bez kontakta sa tlom) sa povremenom mogućnošću kvašenja.

Kombinovanjem tretiranog i netretiranog furnira mogu se ublažiti loše posledice termičke modifikacije po mehanička svojstva. Izbor između TNTNT i T3NT ploča

zavisio bi od specifične namene, odnosno isto kao i kod režima na 200 °C i 210 °C, izbor bi zavisio od toga da li se zahtevaju nešto bolja mehanička ili fizička svojstva. Kako 5T ploče ne sadrže netretirane listove, njihovu upotrebu bi trebalo ograničiti u slučajevima kada bi ploče bile izložene povećanoj vlažnosti, a da pri tome ploče ne trpe značajna mehanička opterećenja.

Preporuke za dalja istraživanja

Daljim istraživanjima treba ustanoviti da li bi promena režima presovanja doprinela stvaranju kvalitetnije veze pri lepljenju termički modifikovanog furnira pomoću MUF lepka predviđenog za suvi vrući postupak presovanja.

Povećanje pritiska tokom operacije presovanja najverovatnije bi doprinelo boljoj penetraciji lepila, što bi moglo rezultirati boljim kvalitetom lepljene veze. Mogućnosti za povećanje pritiska (u odnosu na 1 MPa koliko je iznosio u eksperimentu) su ograničene, jer većina autora ne preporučuje veće pritiske od 1,2 MPa pri presovanju mekih lišćara, a treba uzeti u obzir da termička modifikacija dodatno smanjuje gustinu tretiranog topolovog furnira.

Vreme presovanja je faktor koji pruža nešto veće mogućnosti za eksperimentisanje. Produžavanje presovanja moralo bi biti povezano sa smanjenjem temperature presovanja, jer svako produženje presovanja (nakon vremena potrebnog za očvršćavanja veziva), ne bi doprinelo boljem kvalitetu lepljene veze. Treba imati u vidu i da se produžavanjem vremena presovanja smanjuje proizvodnost prese, što bi bio ograničavajući faktor pri industrijskoj proizvodnji ovakvih ploča.

Dalja istraživanja mogla bi biti usmerena i ka variranju vremena termičke modifikacije, u cilju iznalaženja optimalnog tretmana. Pomoću modeliranja treba ustanoviti koji su to optimalni tretmani i potom dobijene rezultate proveriti u industrijskim uslovima. Moglo bi se ispostaviti da se bolji rezultati mogu postići na nižim temperaturama uz duže vreme termičke modifikacije (npr. 2 ili 3 h na 180 °C, ili 1,5 h na 190 °C).

Upotrebom PUR lepka bi se najverovatnije postigao bolji kvalitet lepljene veze, ali je (sa stanovišta isplativosti) diskutabilna upotreba ovog lepka u industrijskim uslovima proizvodnje furnirskih ploča. Potencijalno bolji rezultati bi se možda mogli ostvariti korišćenjem MUF lepka sa različitim sadržajem melamina u recepturi lepka.

Moguće bi bilo ispitati i kakva su svojstva ploča konstruisanih od termički tretiranog furnira različitih debljina - npr. kombinacija tanjeg termički modifikovanog furnira u spoljašnjim slojevima i debljeg netretiranog u sredini ploče. Značajno bi bilo ispitati i uticaj termičke modifikacije na furnir nastao preradom drugih vrsta (npr. bukovine), kao i mogućnost kombinovanja termički modifikovanog furnira različitih vrsta.

8. LITERATURA

1. Alen R., Kotilainen R., Zaman A., (2002): „Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180–225 °C”, Wood science and technology, br. 36, str. 163-171, Springer Berlin / Heidelberg;
2. Allegretti O., Travan L., Cividini R. (2009): ”Drying techniques to obtain white beech”, wood drying seminar, Bled, Slovenia;
3. Andersons B., Andersone I., Biziks V., Irbe I., Grinsh J., Zudrags K.(2009): „Peculiarities of the Thermal Modification of Hardwood“, Proceedings of 4th European conference on wood modification, str. 141-145, Stockholm;
4. Awoyemi L., Jones I. P., (2010): „Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment”, Wood science and technology (online) - prihvaćeno: 29 avgusta 2008., Springer Berlin / Heidelberg;
5. Ayadi N., Lejeune F., Charrier F., Charrier B., Merlin A. (2003): „Color stability of heat-treated wood during artificial weathering”, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 61, str. 221-226, Springer Berlin / Heidelberg;
6. Aydin S., Yardimci M. Y., Ramyar K. (2007): „Mechanical properties of four species commonly used in Turkey“, Turkish J. Eng. Env. Sci., br. 31, str. 19-27;
7. Banković S. et al. (2009): „Nacionalna inventura šuma Republike Srbije“, monografija, Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede Republike Srbije – Uprava za šume, Beograd;
8. Bal B. C., Bektas I. (2014): "Some mechanical properties of plywood produced from eucaliptus, beech and poplar veneer", Madreas Ciencia y tecnologia, br. 16 (1), str. 99-108;

9. Bergman P.C.A. et al., (2005): „Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass“, ECN Report, ECN-C-05-026;
10. Bhuiyan T. R., Hirai N., (2000): „Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions“, Journal of wood science, br. 46, str. 431-436, Springer Berlin / Heidelberg;
11. Bhuiyan T. R., Hirai N., (2001): „Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose“, Journal of wood science, br. 47, str. 336-341, Springer Berlin / Heidelberg;
12. Birkinshaw C., Dolan S.(2009): „ Mechanism of Strength Loss in Heat Treated Softwoods“, Proceedings of 4th European conference on wood modification, str. 337-343, Stockholm;
13. Biyiks V., Andersons B., Andersone I., Grinins J., Irbe I., Kurnosova N., Mility H. (2010): „Hydrothermal modification of soft deciduous wood: Bending strenght properties“, Proceedings of 5th European conference on wood modification, str. 99-106, Riga;
14. Bjurhager I., Berglund L. A., Bardage S. L., Sundberg B. (2008):” Mechanical characterization of juvenile European aspen (*Populus tremula*) and hybrid aspen (*Populus tremula* x *Populus tremuloides*) using full-field strain measurements“, Journal of wood science, br. 54, str. 349-355;
15. Boonstra et al. (2007): „Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects“, Wood science and technology, br. 41, str. 31- 57, Springer Berlin / Heidelberg;
16. Boonstra M. J., Tjeerdsma B., (2006a): „Chemical analysis of heat treated softwoods“, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 64, str. 204-211, Springer Berlin / Heidelberg;

17. Boonstra M. J., Pizzi A., Zomers F., Ohlmeyer M., Paul W. (2006b): „The effects of a two stage heat treatment process on the properties of particleboard”, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 64 (2), str. 157-164, Springer Berlin / Heidelberg;
18. Boonstra M. J., Van Acker J., Tjeerdsma B., Kegel E., (2007): „Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents”, Ann. Forest. Sci., br. 64, str. 679-690,
19. Borrega M., Kärenlampi P. P., (2008): „Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity”, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 66, str. 63-69, Springer Berlin / Heidelberg;
20. Borrega M., Kärenlampi P. P., (2010): „Hygroscopicity of heat-treated Norway spruce (*Picea abies*) wood”, European journal of wood and wood products (online) - prihvaćeno: 18 februara 2009., Springer Berlin / Heidelberg;
21. Bushong F. W. (1907): „Composition of gas from cottonwood trees“, Kans. Acad. Sci. Part II, str. 21-53;
22. Carter J. C. (1945): „Wetwood of elms“, Bul. of the Ill. Nat. Hist. Survey, 23 (4), str. 401-448;
23. Claus S., Joscak M., Niemz P. (2011): "Thermal stability of glued wood joints measured by shear test", European journal of wood and wood products, br. 69, str. 101-111, Springer Berlin / Heidelberg;
24. Clausen V. H., Kaufert F. H., (1952): „Occurrence and probably cause of heartwood degradation in commercial species of populus“, Jour. Forest Prod. Res. Soc., 2 (4), str. 62-67;

25. Coutand C., Jeronimidis G., Chanson B., Loup C. (2004): „Comparison of mechanical properties of tension and opposite wood in Populus“, Wood science and technology, br. 38, str. 11-24;
26. Danilović M. (2000): “Značaj i uticaj faktora kvaliteta na sortimentnu strukturu u intezivnim zasadima topole *Populus x euramericana* cl. I-214”, magistarski rad, Šumarski fakultet, Beograd;
27. Danilović M. (2005): „Proučavanje faktora kvaliteta u zasadima topola *Populus x euramericana* 'I-214' i *Populus x euramericana* 'Ostia' sa aspekta primene nacionalnih i evropskih standarda kvaliteta“, doktorska disertacija, Šumarski fakultet, Beograd;
28. Dapeng C. L. Z., Tingchang S. F. Z., Chunjing L. (1998): „Fusarium proliferatum (Matsushima) Nirenberg – a pathogen causing wetwood in poplar trees“, Scientia silvae sinicae, br. 05, China;
29. Del Menezzi C.H.S., Tomaselli I., Okino E.Y.A., Teixeira D.E., Santana M.A.E., (2009): „Thermal modification of consolidated oriented strandboards: effects on dimensional stability, mechanical properties, chemical composition and surface color“, European journal of wood and wood products, br. 67, str. 383-396, Springer Berlin / Heidelberg;
30. Edvardsen K., Sandland K. M., (1999): „Increased drying temperature - Its influence on the dimensional stability of wood“, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 57, str. 207-209, Springer Berlin / Heidelberg;
31. Evans P. (2009): „Weathering and Photostability of Modified Wood“, Proceedings of 4th European conference on wood modification, str. 541-550, Stockholm.

32. Fang S., Yang W. (2003): "Interclonal and within-tree variation in wood properties of poplar clones", *Journal of Forestry Research*, br. 14 (4), str. 263-268, China;
33. FAO (2012a): "Global forest land-use change 1990-2005", Food and agriculture organization of the united nations joint research centre, Rome;
34. FAO (2012b): "Improving lives with poplars and willows. Synthesis of Country Progress Reports"; 24th Session of the International Poplar Commission, Dehradun, India;
35. Fioravanti M., Goli G., Negro F., Cremonini C., Zanuttini R. (2013): "Effect of heat treatment on mechanical properties and bonding quality of poplar plywood glued with MUF resin", 13th international scientific conference on hardwood processing, Florence, Italy;
36. Frihart C. R., (2005a): "Handbook of wood chemistry and wood composites", Forest products laboratory, Madison;
37. Frihart C. R., (2005b): "Adhesive bonding and performance testing of bonded wood products", *Journal of ASTM International*, br. 4 (7), Madison;
38. Garcia R. A., Cloutier A., Riedl B. (2006): "Dimensional stability of MDF panels produced from heat-treated fibres", *Holzforschung*, br. 60 (3), str. 278-284;
39. Gerardin, P., Petric, M., Petrissans, M., Lambert, J., and Ehrhardt, J. J. (2007). "Evolution of wood surface free energy after heat treatment," *Polym. Degrad. Stabil.* 92, 653-657;

40. Glavaški L. (1982): „Istraživanje nekih fizičkih i mehaničkih svojstava drveta *Populus Robuste*, *Populus Ostie* i *Populus I-214* i mogućnosti njihove primene u pojedinim oblastima upotrebe“, Magistarska teza, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu;
41. Glavaški L., Popadić R. (1997): „The research of the influence of drying on the change of form of poplar lumber“, Proceedings of 3rd international conference on the development of forestry and wood science/technology – Volume 1, str. 481-486, Beograd;
42. Hartley C. et al. (1961): „Wetwood, bacteria and increased pH in trees“, United states department of agriculture - forest service, report No. 2215;
43. Hill, C. (2006). “Wood modification”, Wiley Series in Renewable Resources. ISBN-100-470-02172-1;
44. Johansson T., Hjelm B. (2013): “Frequency of false heartwood of stems of poplar growing on farmland in Sweden”, Forests, br. 4, str. 28-42;
45. Jovanović B., Tucović A. (1972): „Flora SR Srbije III“, Srpska akademija nauka i umetnosti, str. 405-406., Beograd;
46. Kariž M., (2011): ”Influence of thermal modification of wood on curing of adhesives and bond performances”, Doktorska disertacija, Univerzitet v Ljubljani, Biotehnička fakulteta;
47. Klašnja B., Kopitović S., Orlović S. (2003): „Variability of some wood properties of eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) clones“, Wood science and technology, br. 37, str. 331-337;

48. Kocaefe D., Poncsak S., Doré G., Younsi R., (2008a): „Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, br. 66, str. 355-361, Springer Berlin / Heidelberg;
49. Kocaefe D., Shi J. L., Yang D. Q., Bouzara M., (2008b): „Mechanical properties, dimensional stability, and mold resistance of heat-treated jack pine and aspen”, *Forest products journal*, br. 58 (6), str. 88-93, Forest Products Society, Madison;
50. Kollmann F., Cote W. A., (1984): "Principles of wood science and technology"
51. Kord B., Kialashaki A., Kord B., (2010): „The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*“, *Turk J Agric For*, br. 34, str. 121-126;
52. Korkut S., Bektas I., (2008): „The effects of heat treatment on physical properties of Uludag fir (*Abies bornmuelleriana* Mattf.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood”, *Forest products journal*, br. 58 (3), str. 95-99, Forest Products Society, Madison;
53. Kubojima Y., Okano T., Ohta M., (2000): „Bending strength and toughness of heat-treated wood”, *Journal of wood science*, br. 46, str. 8-15, Springer Berlin / Heidelberg;
54. Kubojima Y., Wada M., Suzuki Y., Tonosaki M., (2001): „Real-time measurement of vibration properties and fine structural properties of wood at high temperature”, *Wood science and technology*, br. 35, str. 503-515, Springer Berlin / Heidelberg;
55. Laurance W., Sayer J., Cassman K., (2014): " Agricultural expansion and its impacts on tropical nature", *Trend in ecology & evolution*, br. 29 (2) str. 107-116;

56. Lee W. C., Biblis E. J., (2007): "Higroscopic properties and shrinkage of southern yellow pine plywood", Wood and fiber science, br. 8 (3), str. 152-158, Society of wood science and technology;
57. Lovrić A., Zdravković V., (2009a): „Uticaj termičkih tretmana na gustinu i bubrenje bukovog furnira”, Prerada drveta, br. 26-27, str. 34- 40, Šumarski fakultet, Beograd;
58. Lovrić A., Zdravković V., (2009b): „Uticaj visokotemperaturnih tretmana na gustinu, bubrenje i gubitak mase topolovog furnira”, Prerada drveta, br. 28, str. 35- 43, Šumarski fakultet, Beograd;
59. Manoj K. D. (2010): “Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil”, doctoral thesis, University of Canterbury, New Zealand;
60. Marcos M. Gonzales-Pena., Michael D. C. Hale.(2009): „Color Change in Thermally-modified Wood and its Relationship with Property Changes“, Proceedings of 4th European conference on wood modification, str. 181-185, Stockholm;
61. Metsä-Kortelainen S., Antikainen T., Viitaniemi P., (2006): „The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C”, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 64, str. 192-197, Springer Berlin / Heidelberg;
62. Nazerian M., Ghalehno M.D., Kashkooli A.B. (2011): „Effect of wood species, amount of juvenile wood and heat treatment on mechanical and physical properties of laminated veneer lumber”, Journal of applied science, Asian network for scientific information;

63. Nikolić S., (1988): "Furniri i slojevite ploče", udžbenik, Šumarski fakultet, Beograd;
64. Ohnesorge D. et al. (2009): „Laboratory tests on the natural durability of six different wood species after hygrothermal treatment“, Proceedings of 4th European conference on wood modification, str. 159-164, Stockholm;
65. Paul, W., Ohlmeyer, M., and Leithoff, H. (2007). “Thermal modification of OSB-strands by a one-step heat pre treatment-Influence of temperature on weight loss, hygroscopicity and improved fungal resistance,” *Holz Roh Werkst.* 65, 57-63;
66. Peters J. J., Bender D. A., Wolcott M. P., Johnson J. D. (202): „Selected properties of hibrid poplar clear wood and composite panels“, *Forest products journal*, br. 52 (5), str. 45-54;
67. Pfriem A., Buchelt B., Zauer M., Wagenfuhr A. (2010): „Colour differences in thermally modified wood in dependence of the distance from the external surface and the modification parameters“, Proceedings of 5th European conference on wood modification, str. 157-160, Riga;
68. Pizzi A., Mittal K. L., (2003): "Handbook of adhesive technology", chapter 32;
69. Poncsak S., Kocaefe D., Bouazara M., Pichette A., (2006): „Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*)” *Wood science and technology*, br. 40, str. 647-663, Springer Berlin, Heidelberg;
70. Poncsak S., Kocaefe D., Younsi R., (2010): „Improvement of the heat treatment of Jack pine (*Pinus banksiana*) using ThermoWood technology”, *European journal of wood and wood products* (online) - prihvaćeno: 14 septembra 2009., Springer Berlin / Heidelberg;

71. Potočić Z. et al. (1963): „Šumarska enciklopedija“ – II sveska, str. 648-654;
72. Rapp A. O., Sailer M. (2000): Heat treatment of wood in Germany- state of the art, Hamburg, Germany;
73. Rathke J., Sinn G., Harm M., Teischinger A., Weigl M., Muller U. (2012a): "Effects of alternative raw materials and varying resin content on mechanical and fracture mechanical properties of particle board", BioResources br. 7 (3), str. 2970-2985;
74. Rathke J., Weigl M., Muller U. (2012b): "Double cantilever I-beam test (DCIB) - characterisation of adhesive content and wood raw material properties of particleboards", book of abstracts, COST Action 2012, Kuchl/Salzburg, Austria;
75. Rousset P., Perr P., Girard P., (2004): „Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by a thermal treatment at high temperature”, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 62, str. 113-119, Springer Berlin / Heidelberg;
76. Rowell R. et al (2009): „Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood“, Proceedings of 4th European conference on wood modification, str. 489-502, Stockholm;
77. Sahin Kol H., Ozbay G., Altun S., (2009): "Shear strength of heat-treated tali (*Erythrophleum ivorense*) and iroko (*Chlorophora excelsa*) woods, bonded with various adhesives", BioResources br 4 (4), str. 1545-1554;
78. Schnabel T., Zimmer B., Petutschnigg A. J., Schonberger S., (2007): „An approach to classify thermally modified hardwoods by color”, Forest products journal, br. 57 (9), str. 105-110, Forest Products Society, Madison;
79. Seliskar C. E. (1952): „Wetwood organism in aspen, poplar, is isolated“, Colo. Farm and Home Res. 2 (6), str. 6-11, 19-20;

80. Shi J. L., Kocaefe D., Zhang J., (2007): „Mechanical behaviour of Qu´ebec wood species heat-treated using ThermoWood process”, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 65, str. 255-259, Springer Berlin / Heidelberg;
81. Siniković T., Govorčin S., Sedlar T., (2011): „Usporedba fizikalnih svojstava neobrađene i toplinski obrađene bukovine i grabovine”, Drvna industrija, br. 62 (4), str. 283-290., Zagreb;
82. Skyba O., Schwarze F., Niemz P. (2009): "Physical and mechanical properties of thermo-hygro-mechanically (THM) densified wood", Wood research, br. 52 (2), str. 1-18;
83. Stamm AJ (1956) Thermal Degradation of Wood and Cellulose. Ind. Eng. Chem. 48, 413-417;
84. Stamm AJ, Burr HK, Kline AA (1946) Staybwood-heat-stabilized wood. Industrial and Engineering Chemistry 38, 630-634;
85. Stingl R., Weigl M., Teischinger A., Hansmann C.(2009): „Moderate thermal treated norway spruce (*Picea abies* (L.) [Karst.]) exposed to ground contact in Austria for five years“, Proceedings of 4th European conference on wood modification, str. 165-168, Stockholm;
86. Sundqvist B., (2004) „Colour changes and acid formation in wood during heating“, Doctoral thesis, Lulea University of technology;
87. Sykes R., Kodrzycki B., Tuskan G., Foutz K., Davis M. (2008): “Within tree variability of lignin composition in *Populus*”, Wood science and technology, br. 42, str. 649-661;

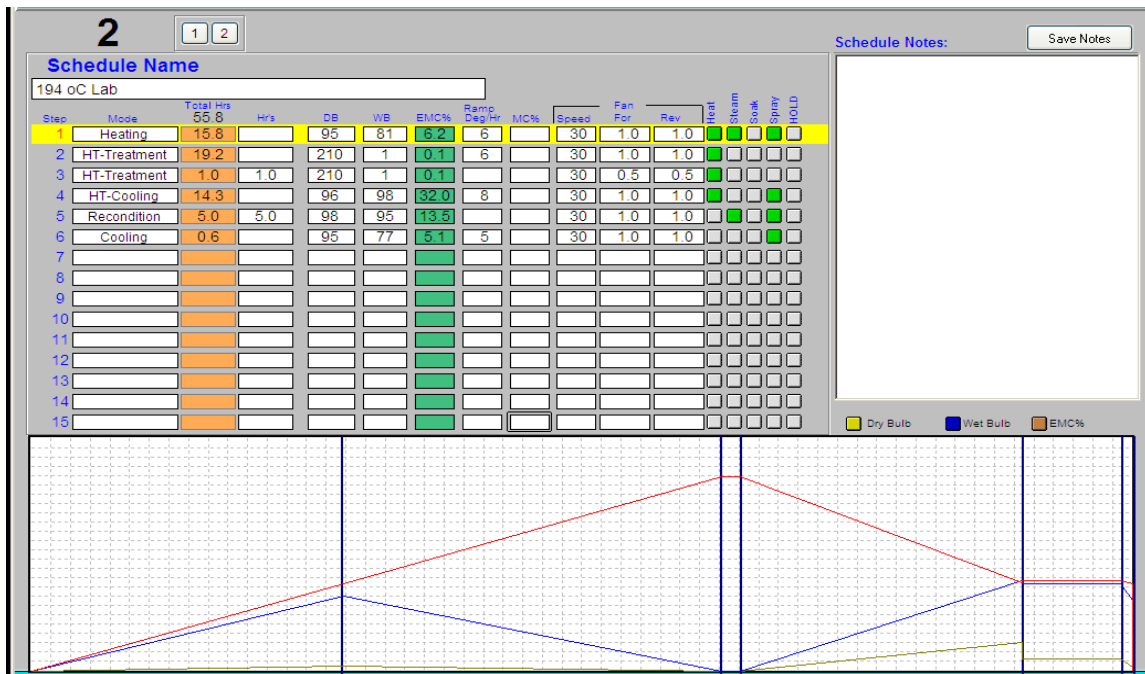
88. Šernek M., Boonstra M., Pizzi A., Despres A., G´erardin P., (2008): „Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, br. 66, str. 173-180, Springer Berlin / Heidelberg;
89. Šoškić B., Popović Z., (2002): "Svojstva drveta", udžbenik, Šumarski fakultet, Beograd;
90. Tao Ding, Lianbai Gu, Tao Li, (2010): „Influence of steam pressure on physical and mechanical properties of heat-treated Mongolian pine lumber”, *European journal of wood and wood products* (online) - prihvaćeno: 10 juna 2009., Springer Berlin / Heidelberg;
91. Tjeerdsma B. F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H., (1998): „Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, br. 56, str. 149-153, Springer Berlin / Heidelberg;
92. Tjeerdsma B. F., Militz H., (2005): „Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, br. 63, str. 102-111, Springer Berlin / Heidelberg;
93. Tjeerdsma, B. F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., and Militz, H. (1998). “Characterisation of thermally modified wood: Molecular reasons for wood performance improvement,” *Holz Roh Werkst.* 56, 149-157;
94. Todorović N. (2012): „Primena bliske infracrvene spektroskopije u predviđanju svojstava termički modifikovanog drveta bukve sa lažnom srčevinom”, doktorska disertacija, Šumarski fakultet, Beograd;
95. Tolvaj L., Papp G., Varga D., Lang E., (2012a): "Effect of steaming on the colour change of softwoods", *BioResources* br.7 (3), str. 2791-2808;

96. Tolvaj L., Varga D., Papp G., (2012b): "Colour measurement for determining the steaming properties of wood", Óbuda University e-Bulletin br. 3 (1), str. 99-104;
97. Ullah I. (2012): "Discoloration in poplar tree and production of sprouts after harvest", master thesis, faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Uppsala;
98. Viitaniemi Pertti, Jämsä Saila, Ek Pentti, Viitanen Hannu: Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus November 1994: WO 1994/027102;
99. Wallin W. B. (1954): „Wetwood in balsam poplar“, Minnesota forestry notes, No. 28;
100. Weiland J. J., Guyonnet R. (2003): „Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy“, Holz als Roh- und Werkstoff, br. 61, str. 216-220, Springer Berlin / Heidelberg;
101. Welzbacher C. R., Meyer L., Brischke C. (2010): „Prediction of flooring-relevant properties based on colour values of thermally modified timber“, Proceedings of 5th European conference on wood modification, str. 143-150, Riga;
102. Windeisen E., Strobel C., Wegener G., (2007): „Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood“, Wood science and technology , br. 41, str. 523-536, Springer Berlin / Heidelberg;
103. Xiaomei J., Lifei Z., Bangxing X., Shikai Z. (1993): „Studies on the occurrence, distribution and wood properties of wetheartwood in *Populus deltoides* I-69“, Forest research, br. 05, China;

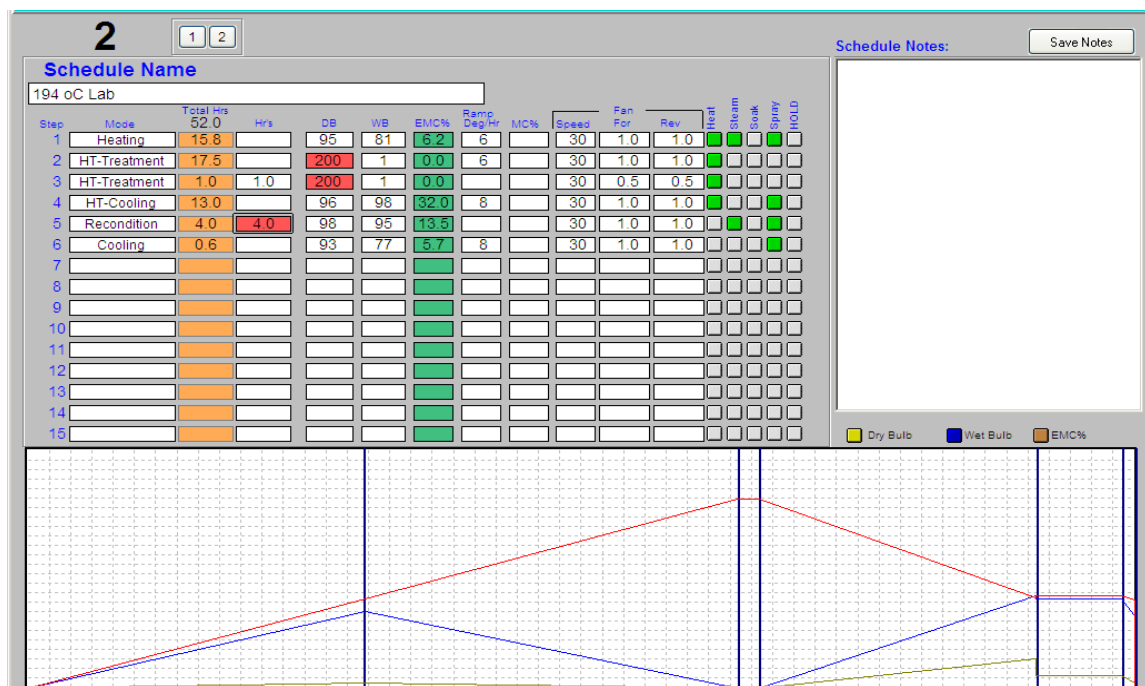
104. Xie Y.J., Liu Y.X., Sun Y. X. (2002): "Heat-treated wood and its development in Europe", *Journal of forest research*, br. 13 (3), str. 224-230, Harbin, Kina;
105. Yongjian Cao, Jianxiong Lu, Rongfeng Huang, (2010): "Increased dimensional stability of Chinese fir through steam-heat treatment", *European journal of wood and wood products* (online) - prihvaćeno: 23 novembra 2010., Springer Berlin / Heidelberg;
106. Zdravković V., Djiporović M., Miljković J., (1989): "Kontrola kvaliteta u funkciji smanjenja emisije slobodnog formaldehida kod furnirskih ploča", *Zbornik radova sa drugog savjetovanja o ljepilima i ljepljenju drveta*, str. 398-409., Šumarski fakultet, Zagreb;
107. Zdravković V., Lovrić A., (2010): "Uticaj termičkih tretmana na ugao kvašenja i razlivanje vode po površini topolovog furnira", rad izložen na međunarodnoj konferenciji "First Serbian Forestry Congress – future with forest", štampan u knjizi abstrakta str. 298., Beograd;
108. Zhang P., Wu F., Kang X. (2012): "Genotypic variation in wood properties and growth traits of triploid hybrid clones of *Populus tomentosa* at three clonal trials", *Tree genetics & genomes*, br. 8, str. 1041-1050;
109. Zhang S. Y. (1997): "Wood specific gravity-mechanical relationship at species level", *Wood science and technology*, br. 31, str. 181-191;
110. Internet baza podataka - ThermoWood brochure, ThermoWood handbook 2003 www.thermowood.fi;
111. Internet baza podataka - Principles & applications of wood retification www.thermotreatedwood.com/Researches/Retification.pdf.

9. PRILOZI

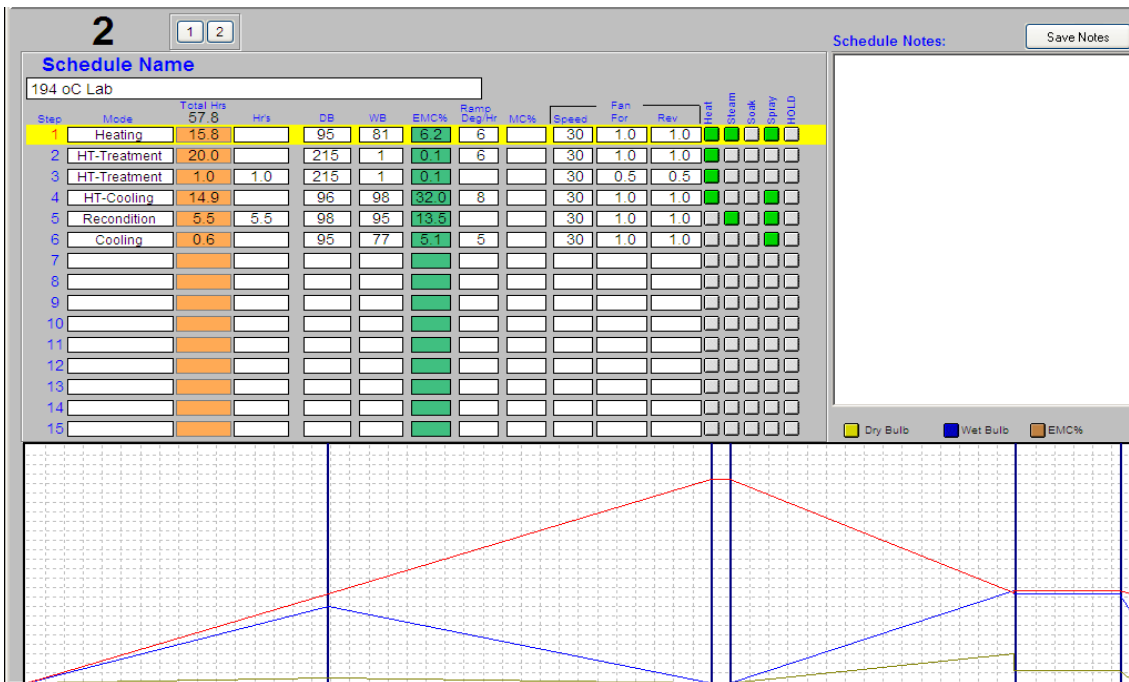
Prilog 1: Prikaz režima termičkih tretmana



Slika 1: Termički tretman na 200° C



Slika 2: Termički tretman na 210° C



Slika 3: Termički tretman na 215° C

Prilog 2: Statistička analiza podataka

Tabela 1. Analiza značajnosti razlika dostignute vlažnosti ploča pri $\phi=60\%$ i $T=22\text{ °C}$

		5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
			t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
190 °C	5N		-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	t3nt			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	tntnt				*	-	*	*	-	-	*	-	*	*
	5t					*	-	*	*	*	*	*	*	*
200 °C	t3nt						*	*	-	*	*	-	*	*
	tntnt							*	*	*	*	*	*	*
	5t								*	*	*	*	-	*
210 °C	t3nt									*	*	-	*	*
	tntnt										*	-	*	*
	5t											*	*	-
215 °C	t3nt												*	*
	tntnt													*
	5t													

*značajna razlika na nivou od 95% - Tukey post hoc test

Tabela 2. Analiza značajnosti razlika gustine ploča pri $\phi=60\%$ i $T=22\text{ °C}$

		5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
			t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
190 °C	5N		-	-	*	-	-	*	-	*	*	*	*	*
	t3nt			-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	*
	tntnt				-	-	-	-	-	*	*	*	*	*
	5t					-	-	-	-	-	-	-	-	*
200 °C	t3nt						-	-	-	-	*	*	*	*
	tntnt							-	-	*	*	*	*	*
	5t								-	-	*	-	-	*
210 °C	t3nt											*	*	*
	tntnt												-	-
	5t												-	-
215 °C	t3nt													-
	tntnt													-
	5t													

*značajna razlika na nivou od 95% - Bonferroni post hoc test

Tabela 3. Analiza značajnosti razlika dostignute vlažnosti ploča posle devet nedelja

		5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
			t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
5N			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
190 °C	t3nt			*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	*
	tntnt				-	-	-	*	-	-	*	-	*	*
	5t					*	-	*	-	-	*	-	-	*
200 °C	t3nt						*	*	-	*	*	-	*	*
	tntnt							*	*	-	*	*	-	*
	5t								*	*	*	*	*	*
210 °C	t3nt									*	*	-	*	*
	tntnt										*	*	-	*
	5t											*	*	-
215 °C	t3nt												*	*
	tntnt													*
	5t													

*značajna razlika na nivou od 95% - Bonferroni post hoc test

Tabela 4. Analiza značajnosti razlika tvrdoće ploča pri $\phi=60\%$ i $T=22\text{ °C}$

		5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
			t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
5N			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
190 °C	t3nt			-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-
	tntnt				-	-	-	-	*	*	-	*	*	*
	5t					-	-	-	-	*	*	-	*	*
200 °C	t3nt						-	-	-	-	-	-	-	-
	tntnt							-	-	-	-	-	-	-
	5t								-	-	-	-	-	-
210 °C	t3nt									-	-	-	-	-
	tntnt										-	-	-	-
	5t											-	-	-
215 °C	t3nt												-	-
	tntnt													-
	5t													

*značajna razlika na nivou od 95% - Bonferroni post hoc test

Tabela 5. Analiza značajnosti razlika savojne čvrstoće za uzdužni tip epruveta pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

	5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
5N		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
190 °C	t3nt		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	tntnt			-	-	-	-	-	-	-	-	-	*
	5t				-	-	-	-	-	-	-	-	-
200 °C	t3nt					-	-	-	-	-	-	-	-
	tntnt							-	-	-	-	-	-
	5t							-	*	-	-	*	*
210 °C	t3nt								-	-	-	-	*
	tntnt									-	-	-	-
	5t										-	-	-
215 °C	t3nt											-	-
	tntnt												-
	5t												

*značajna razlika na nivou od 95% - Tukey post hoc test

Tabela 6. Analiza značajnosti razlika savojne čvrstoće za poprečni tip epruveta pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

	5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
5N		-	-	-	-	-	*	-	-	*	-	*	*
190 °C	t3nt		-	-	-	-	*	-	-	*	-	-	*
	tntnt			-	-	-	*	-	-	*	-	*	*
	5t				-	*	-	-	-	-	-	-	*
200 °C	t3nt					-	*	-	-	*	-	-	*
	tntnt						*	-	-	*	-	*	*
	5t							*	*	-	*	-	-
210 °C	t3nt								-	*	-	-	*
	tntnt									*	-	-	*
	5t										*	-	-
215 °C	t3nt											-	*
	tntnt												*
	5t												

*značajna razlika na nivou od 95% - Bonferroni post hoc test

Tabela 7. Analiza značajnosti razlika modula elastičnosti za uzdužni tip epruveta pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

	5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
5N		*	-	*	*	*	-	-	*	*	*	*	*
190 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												
200 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												
210 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												
215 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												

*značajna razlika na nivou od 95% - Bonferroni post hoc test

Tabela 8. Analiza značajnosti razlika modula elastičnosti za poprečni tip epruveta pri $\varphi=60\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

	5N	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t	t3nt	tntnt	5t
5N		-	-	*	-	-	*	-	-	*	-	-	*
190 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												
200 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												
210 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												
215 °C	t3nt												
	tntnt												
	5t												

*značajna razlika na nivou od 95% - Bonferroni post hoc test

Prilog 3: Izračunate vrednosti fizičkih i mehaničkih svojstava ploča
kondicioniranih pri $\varphi = 30\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabela 1. Vlažnost ploča posle četiri nedelje kondicioniranja na $\varphi=30\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	30%	7,90 %			
T3NT		7,77 %	7,60 %	7,57 %	7,27 %
TNTNT		7,02 %	7,01 %	7,26 %	6,64 %
5T		6,75 %	6,61 %	6,01 %	5,68 %

Tabela 2. Gustina ploča posle četiri nedelje kondicioniranja na $\varphi = 30\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (g/cm^3)

Vrsta \ Režim		190 °C	200 °C	210 °C	215 °C
Kontrolna	30%	0,435			
T3NT		0,414	0,415	0,408	0,397
TNTNT		0,416	0,418	0,399	0,398
5T		0,405	0,417	0,379	0,375

Tabela 3. Tvrdoća ploča posle četiri nedelje kondicioniranja na $\varphi=30\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
\bar{x}	11,42	9,09	9,59	9,95	7,99	8,15	8,36	8,76	8,03	7,76	8,23	7,66	7,80
SD (σ_{n-1})	3,02	1,28	1,43	2,47	0,57	1,00	1,03	1,84	1,35	1,47	1,79	1,51	1,66
KOV (v)	26,48	14,08	14,93	24,83	7,19	12,31	12,34	21,02	16,87	18,91	21,76	19,71	21,23
SG (φ_x)	0,55	0,23	0,26	0,45	0,10	0,18	0,19	0,34	0,25	0,27	0,33	0,28	0,30

Tabela 4. Savojna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete posle četiri nedelje kondicioniranja na $\varphi=30\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	56,06	34,73	40,58	37,71	36,83	35,45	42,04	35,82	32,37	32,82	26,52	30,45	24,03
SD (σ_{n-1})	5,55	5,31	7,01	7,72	9,60	6,03	7,63	5,80	7,21	6,40	8,16	6,31	5,65
KOV (v)	9,90	15,28	17,28	20,48	26,06	17,01	18,14	16,19	22,28	19,51	30,75	20,72	23,52
SG (φ_x)	1,60	1,53	2,02	2,23	2,77	1,74	2,20	1,67	2,08	1,85	2,35	1,82	1,63

Tabela 5. Savojsna čvrstoća epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete posle četiri nedelje kondicioniranja na $\varphi=30\%$ i $T=22\text{ °C}$ (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	28,60	25,93	26,65	21,90	27,06	28,52	17,96	26,34	26,29	17,15	24,28	21,40	16,65
SD (σ_{n-1})	5,72	3,35	2,81	4,03	6,27	5,27	4,35	4,69	5,07	5,17	2,82	2,55	4,54
KOV (ν)	20,00	12,90	10,53	18,42	23,18	18,47	24,22	17,80	19,29	30,13	11,60	11,92	27,28
SG (φ_x)	1,65	0,97	0,81	1,16	1,81	1,52	1,26	1,35	1,46	1,49	0,81	0,74	1,31

Tabela 6. Modul elastičnosti epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva paralelnih sa dužom stranom epruvete posle četiri nedelje kondicioniranja na $\varphi=30\%$ i $T=22\text{ °C}$ (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	6142,50	5007,34	5389,67	5157,97	4872,07	5084,09	5672,79	5411,59	4903,69	4953,10	4567,03	4822,11	4388,63
SD (σ_{n-1})	404,39	384,87	567,56	670,37	820,60	570,99	821,28	553,60	716,65	856,47	1231,75	614,54	618,42
KOV (ν)	6,58	7,69	10,53	13,00	16,84	11,23	14,48	10,23	14,61	17,29	26,97	12,74	14,09
SG (φ_x)	116,74	111,10	163,84	193,52	236,89	164,83	237,08	159,81	206,88	247,24	355,58	177,40	178,52

Tabela 7. Modul elastičnosti epruveta sa tokom vlakana spoljašnjih slojeva upravnih na dužu stranu epruvete posle četiri nedelje kondicioniranja na $\varphi=30\%$ i $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MPa)

OSNOVNA STATISTIKA	TIP PLOČE I TRETMAN												
	K	190 °C			200 °C			210 °C			215 °C		
		T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T	T3NT	TNTNT	5T
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
\bar{x}	2139,21	1777,23	1895,26	1571,22	2027,14	1988,18	1607,63	1882,71	1945,49	1624,53	1637,04	1786,47	1614,44
SD (σ_{n-1})	348,68	228,39	92,34	219,06	308,18	261,82	131,17	240,71	286,80	299,14	227,02	306,57	181,86
KOV (v)	16,30	12,85	4,87	13,94	15,20	13,17	8,16	12,79	14,74	18,41	13,87	17,16	11,26
SG (φ_x)	100,66	65,93	26,66	63,24	88,96	75,58	37,87	69,49	82,79	86,36	65,53	88,50	52,50

10. BIOGRAFIJA AUTORA

Aleksandar Lovrić je rođen 03. aprila 1974. godine u Vršcu, gde je završio osnovnu školu i upisao gimnaziju. Po završetku treće godine gimnazije preselio se u Beograd gde je i završio srednje obrazovanje u IX Beogradskoj gimnaziji. Na Šumarski fakultet, Odsek za preradu drveta, upisao se školske 1993/94 godine. Studiranje je otpočeo po odsluženju vojnog roka 1994/95, a diplomirao je 08. februara 2002. godine. U novembru iste godine upisao se na poslediplomske studije iz oblasti Primarne prerade drveta.

Dana 11.02.2008. godine odbranio je magistarsku tezu pod naslovom: "Uticaj osnova piljenja na iskorišćenje jelove oblovine" i na osnovu toga stekao akademski naziv magistra nauka iz oblasti prerade drveta. U zvanje asistenta pripravnika, na užoj naučnoj oblasti Primarna prerada drveta, izabran je 01. marta 2002. god., a u zvanje asistenta 18. jula 2008. godine.

Aleksandar Lovrić je, do sada, objavio 10 naučnih i 6 stručnih radova i učestvovao je u izradi 3 tehnička rešenja. Objavio je i 1 rad na Prvom šumarskom kongresu u Beogradu 2010. godine, a kao istraživač, učestvovao je na 3 domaća projekta koja su finansirana sredstvima Ministarstva za nauku i prosvetu Republike Srbije.

Naučni radovi objavljeni u časopisima od 2002. godine:

1. Šoškić B., Vukovojac B., Lovrić A. (2003): "Istraživanje nekih fizičkih svojstava drveta Paulownija elongata i Paulownija fortunei" Glasnik Šumarskog fakulteta br. 87, str. 211-221, Beograd;
2. Šoškić B., Popović Z., Todorović N., Lovrić A. (2005): "Iskorišćenje ljuštenog furnira u proizvodnji bukovih furnirskih ploča" Prerada drveta br. 12, str. 29-35, Beograd;
3. Šoškić B., Lovrić A., (2006): "Istraživanje deformacija bukovih rezanih sortimenata", Glasnik Šumarskog fakulteta br. 5, str 1-11, Banja Luka;

4. Šoškić B., Lovrić A., Furtula M., Pištignjat M. (2007): "Prilog određivanju zapremine sporednih pilanskih sortimenata", - Prerada drveta br. 20, str. 17-21, Beograd;
5. Šoškić B., Lovrić A., Popadić R., (2008): "Uticaj kvaliteta trupaca na kvantitativno iskorišćenje jelove oblovine pri jednofaznom tehnološkom postupku pilanske prerade" Prerada drveta br. 21-22, str. 5-8, Beograd.
6. Lovrić A., Zdravković V., (2009): "Uticaj termičkih tretmana na gustinu i bubrenje bukovog furnira" Prerada drveta br. 26-27, str. 34-40, Beograd.
7. Lovrić A., Zdravković V., (2009): "Uticaj visokotemperaturnih tretmana na gustinu, bubrenje i gubitak mase topolovog furnira", Prerada drveta br. 28, str. 35-42, Beograd.
8. Zdravković V., Lovrić A., Stanković B. (2013): "Dimensional stability of pluwood panels made from thermally modified poplar veneers in conditions of variable air humidity", Drvna industrija br. 64 (3), str. 175-181, Zagreb;
9. Milić G., Kolin B., Lovrić A., Todorović N., Popadić R. (2013): "Drying of beech (*Fagus sylvatica* L.) timber in oscillation climates: drying time and quality", *Holzforschung* br. 67 (7), str. 805-813, Berlin.
10. Lovrić A., Zdravković V., Furtula M. (2014): "Influence of thermal modification on colour of poplar (*Populus x euramericana*)" rotary cut veneer, *Wood research* br 59 (4), str. 661-670, Bratislava.

Naučni radovi objavljeni na kongresima, simpozijumima i drugim naučnim skupovima od 2002. godine:

1. Zdravković V., Lovrić A., (2010): "Uticaj termičkih tretmana na ugao kvašenja i razlivanje vode po površini topolovog furnira", rad izložen na međunarodnoj

konferenciji "First Serbian Forestry Congress – future with forest", 11-13. 11. 2010.,
štampan u knjizi abstrakta str. 298., Beograd.

Stručni radovi objavljeni u časopisima od 2002. godine:

1. Mirić M., Popović Z., Lovrić A. (2002): "Ekonomski aspekti zaštite drveta hrasta i bukve" Drvarski glasnik br. 43-44, Šumarski fakultet, str. 37-44, Beograd;
2. Zdravković V., Lovrić A. (2004): "Mogućnosti primene elektronskih karti za kontrolu kvaliteta u proizvodnji furnira" Prerada drveta br. 6, Šumarski fakultet, str. 25-31, Beograd;
3. Lovrić A., Kolin B. (2005): "Uporedna analiza konvencionalne i metode kondenzacionog veštačkog sušenja piljene građe" Prerada drveta br. 11, Šumarski fakultet, str. 15-18, Beograd;
4. Popadić R., Lovrić A. (2008): "Primena kompjuterske tomografije u pilanskoj preradi drveta" Prerada drveta br. 24, Šumarski fakultet, str. 33-38, Beograd;
5. Zdravković V., Lovrić A., (2010): "Mogućnosti uštede energije i poboljšanja kvaliteta sušenja ljuštenog furnira" Prerada drveta br. 29, Šumarski fakultet, str. 15-20, Beograd;
6. Lovrić A., Zdravković V., (2010): "Tretiranje predmeta podvodne arheologije polietilenglikolom (PEG)" Prerada drveta br. 30-31, Šumarski fakultet, str. 28-33, Beograd.

Tehnička rešenja od 2002. godine:

1. Popović Z., Šoškić B., Todorović N., Lovrić A., Stanković P. (2002): "Idejni tehnološki projekat proizvodnje klasičnog parketa DIP-SAVA-Hrtkovci", 92 str + prilozi, Šumarski fakultet, Beograd;

2. Popović Z., Šoškić B., Lovrić A., Todorović N., Stanković P. (2002): "Generalni plan rasporeda objekata i površina DIP-SAVA-Hrtkovci", 51 str+prilozi, Šumarski fakultet, Beograd;
3. Popović Z., Savić P., Todorović N., Zdravković V., Lovrić A. (2010): „Mašina za ispitivanje mehaničkih svojstava drveta i proizvoda na bazi drveta WT-4“, Šumarski fakultet, Beograd.

Projekti koji su finansirani od Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije:

1. "Istraživanje uticaja anizotropije i tehnoloških postupaka mehaničke prerade drveta na deformacije i iskorišćenje rezane građe i furnira iz bukovog i hrastovog drveta", učesnik na naučno-istraživačkom projektu iz programa tehnološkog razvoja br. 528, 2003 – 2004. (Rukovodilac projekta prof. dr Borislav Šoškić);
2. "Razvoj novih proizvoda u cilju boljeg korišćenja drvene sirovine i unapređenja izvoza prerade drveta Srbije", učesnik na projektu finansiranom u okviru Nacionalnog programa – Biotehnologija i agroindustrija br. BTN 361005, 2005-2008. (Rukovodilac projekta prof. dr Zdravko Popović);
3. "Istraživanje svojstava i kvaliteta drveta u cilju unapređenja tehnologije pilanske prerade i povećanja proizvodnje rezane građe", učesnik na projektu iz programa tehnološkog razvoja br. TR: 20105, 2008-2010. (Rukovodilac projekta prof. dr Zdravko Popović).

Magistarski rad:

Magistarski rad pod naslovom: "Uticaj osnova piljenja na iskorišćenje jelove oblovine", odbranio je 11.02.2008. godine na Šumarskom fakultetu u Beogradu.

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора Александар Ловрић

Број уписа _____

Студијски програм Технологије, менаџмент и пројектовање намештаја и
производа од дрвета

Наслов рада Могућност примене термички модификованог тополовог фурнира у
производњи фурнирских плоча

Ментор др Владислав Здравковић, ванр. проф.

Потписани _____

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Могућност примене термички модификованог тополовог фурнира у производњи фурнирских плоча

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, _____
