

UDK: 630*84

Оригинални научни рад

DOI: 10.2298/GSF1614239T

УТИЦАЈ ТЕРМИЧКОГ ТРЕТМАНА НА ПРОМЕНУ БОЈЕ БУКОВОГ ДРВЕТА СА ЛАЖНОМ СРЧЕВИНОМ

Др Небојша Тодоровић, доцент, Универзитет у Београду, Шумарски факултет (nebojsa.todorovic@sfb.bg.ac.rs)

Др Здравко Поповић, редовни професор, Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Др Горан Милић, ванредни професор Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Др Ранко Попадић, доцент у Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Извод: Циљ овог рада је био да се истраже параметри боје буковог дрвета пре и после термичког третмана, као и да се одреди да ли постоји разлика у боји између белјике и лажне срчевине пре и после примене високе температуре. Узорци су третирани на температурама од 170°C, 190°C односно 210°C, у трајању од 4 h. Координате боје (CIEL*a*b* sistem), су измерене пре и после третмана при чему су одређени следећи параметри: ΔL , Δa , Δb и ΔE – промена боје. Боја је измерена на 4 места на радијалној и попречној површини дрвета и узета је њихова просечна вредност за даље истраживање. Добијени резултати показују да примењен термички третман белјике није значајно утицао на промену разлике у боји између попречне и радијалне површине. Разлика између попречне и радијалне површине, код нетретиране лажне срчевине, је мања од вредности измерене код белјике. Разлика у боји нетретиране белјике и лажне срчевине је више изражена на радијалној него на попречној површини. Дејством високе температуре долази до значајног смањења ове разлике. Температура од 210°C је произвела најмању разлику у боји између ова два дела дрвета која је у овом истраживању утврђена на радијалној површини. Закључак је да примењен термички третман доводи до приближно исте боје белјике и лажне срчевине, поготову на радијалној површини, и са тог становишта се може закључити да су ова два дела буковог дрвета у том смислу потпуно изједначена. При овој констатацији не треба изоставити ни претпоставку да се у случају изједначених свостава, белјика и лажна срчевина могу једнако употребити у готовом производу од термички третираног буковог дрвета.

Кључне речи: буковина, термички третман, промена боје, лажна срчевина.

УВОД

Термички третман је еколошки метод који се користи за заштиту дрвета. Поред побољшања хигроскопности и трајности, један од важних разлога за његову примену је и промена боје дрвета (Mitsui et al. 2001; Bekhta and

Neimz 2003; Johansson and Morén 2006; Esteves et al. 2008; González-Peña and Hale 2009; Toung and Li 2010). Термички третман даје дрвету тамнију боју која је постала веома интресантна на тржишту и чиме се мање вредним врстама

може побољшати њихова употреба и повећати тржишна вредност. Према неким ауторима, промена боје дрвета може бити и индикатор степена промене својстава (*Bourgeois et al. 1989*). Разлоге за промену боје дрвета, после термичког третмана, можемо наћи у деградацији хемицелулоза (*Sehistedt-Persson 2003; Sundqvist 2004*) и екстрактива који учествују у формирању боје хидротермички третираног дрвета (*Mc Donald et al. 2000; Sundqvist and Moren 2002*).

Промена боје после термичког третмана је углавном условљена присуством екстрактива у структури дрвета (*Tjeerdsma et al. 1998; Sundqvist and Moren 2002; Bekhta and Neimz 2003; Sundqvist 2004; Windeisen et al. 2009; Kocaefe et al. 2008; Niemz et al. 2010; Aydemir et al. 2011*). Поред тога, приликом излагања високим температурама, формирају се алдехиди и феноли, који доприносе промени боје која настаје као последица хемијске реакције (*Mc Donald et al. 2000*).

Буква је најважнија лишћарска врста у Европи. Поред резултата о физичким и механичким својствима термички третаног буковог дрвета (*Yildiz 2002, Reppelin et al. 2005, Hakkou et al. 2006, Arnold 2009, Todorović et al. 2012*), неки аутори су приказали и резултате о промени боје термички третиране буквине.

Gonzalez-Pena and Hale (2009) су испитивали утицај високе температуре на хемијска својства и димензионалну стабилност буквине при дејству температуре од 190, 210, 230 и 245°C од 30 min и 1, 4, 8 и 16 сати. Они су закључили да је промена боје последица хемијских промена главних полимера дрвета и да више потиче од промена код лигнина него полисахарида.

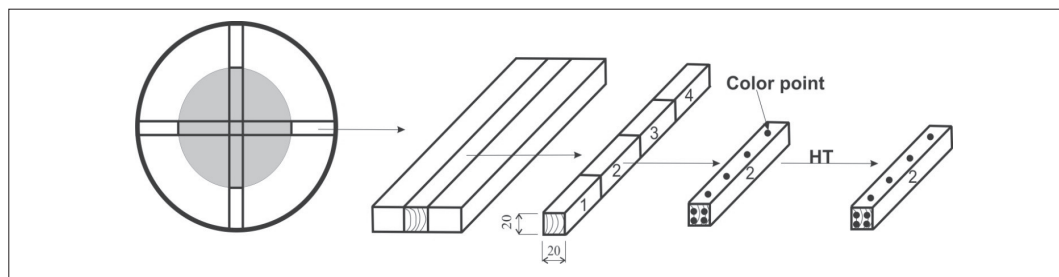
Mitani and Barboutis (2014) су испитивали димензионалну стабилност и боју термички третиране буквине на температури од 180°C при пет различитих времена трајања од 2 до 10 сати. Димензионална стабилност и абсорпција су измерене после 1-h, 3-h, 6-h, 1 дан и 3 дана потапања узорка у воду. Значајне промене боје, према поменутиим ауторима, су се десиле после 4 h. Најизраженије промене боје, у поређењу са нетретираним узорцима, су се десиле после 8 и 10 сати излагања дрвета.

Горе наведени резултати су углавном рађени на узорцима буквине без присуства лажне срчевине. Међутим, буква је посебно интересантна због присуства лажне срчевине из које се, због природне тамније боје и потенцијалног присуства гљива, израђују сортименти чија је вредност на тржишту ниска. Како у процесу термичке модификације долази до промене боје, важно је да се установи да ли се термички модификовано дрво лажне срчевине, по боји, разликује од белике што је веома битно за његову каснију производњу и експлоатацију. Ако се не установе битне разлике, онда је могуће користити, овај сада мање вредни материјал, за добијање високо вредних сортимената.

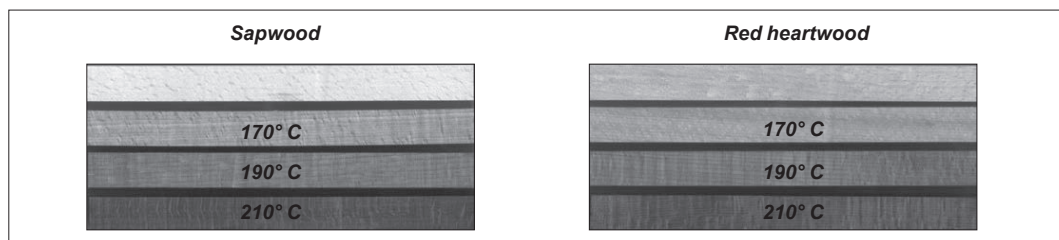
На основу свега наведеног, основни циљ овог рада је био да се утврде параметри боје код нетретираних узорка буквине из предела белике и лажне срчевине као и да се истражи промена боје код ова два дела дрвета која се десила после термичких третмана.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

Материјал за ово истраживање је пореклом из 11 случајно изабраних букових стабала са шумског подручја које припада Наставно научној бази Шумарског факултета на Гочу. Просечан прсни пречник стабала је износио 45 cm. Сва стабла су била са приближно истим садржајем здраве лажне срчевине (око 50%). Одабрана стабла су изрезана у трупце дужине око 2 m. Изрезано је по три трупца из сваког стабла (укупно 33 трупца): изнад прсне висине, на средини и код крошње. Труpci су затим прорезани у 8 радијалних дасака дебљине око 30 mm (4 из предела белике и 4 из предела лажне срчевине – слика 1). Све даске су, после вештачког сушења, изрезане у четири узорка по дужини влаканаца (1 – нетретирана + 3 за термичку обраду) (Слика 1). Узорци су били са јасно дефинисаним анатомским правцима и без видљивих грешака. За одређивање боје изрезани су узорци димензија 20x20x320 mm (радијални, тангенцијални и аксијални). Укупно је припремљено 576 узорка од тога 288 белике (72+3x72) и 288 лажне срчевине (72+3x72).



Слика 1. Кројење узорка и место мерења боје (1-нетретирани, 2-170 °C, 3-190 °C, 4 -210°C, HT – термички третирани)



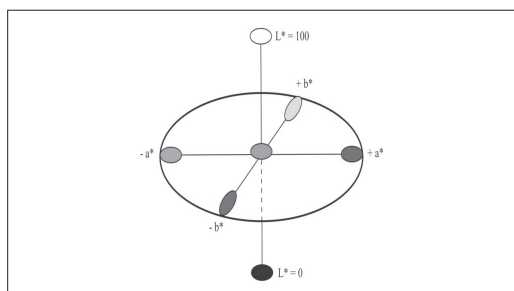
Слика 2. Термички третирани узорци букове бељике и лажне срчевине

Термички третман

Термички третман узорка је изведен помоћу водене паре у лабораторијској комори (сца $1m^3$) са атмосферским притиском. Узорци су били изложени температурама од 170, 190 и 210°C у трајању од 4 h (Слика 2). Изабрани режим се највише употребљава у термичком третману буковине у индустријским условима за производњу подова, зидних облога, намештаја и др. Њихово загревање од собне до задате температуре је трајало 24 h. Пре и после термичког третмана сви узорци су кондиционирани на температури од 23°C и релативној влажности ваздуха од 50%.

Мерење боје дрвета

Боја дрвета је одређена у CIE Lab систему (Слика 3.) са ВУК (BYK Gardner GmbH колориметром - Слика 4.) коришћењем стандардног осветљења D65 и 10° угао посматрача. Пречник отвора је био 8 mm. Калибрација инструмента је урађена коришћењем калибрационе беле плоче која је испоручена заједно са уређајем од стране произвођача. Током мерења сваки узорак је био постављен на равну плочу ради стабилности приликом мерења. Боја је измерена пре и после третмана на радијалној и попречној површини на четири мерна места. За даљи прорачун коришћена је средња вредност



Слика 3. CIE L*a*b* координатни систем



Слика 4. ВУК колориметар

ова четири мерења. Боја је снимљена у интервалу од 10 nm у видљивом делу спектра (од 400 до 700 nm) при чему су одређене следеће координате: L* (осветљеност), a* (зелена-црвена), b* (плава-жута).

Помоћу вредности L*a*b*, разлика у осветљености (ΔL^*) и координатама (Δa^* and Δb^*), су одређене помоћу следећих формула:

$$\begin{aligned} \Delta L^* &= L^*_{\text{третирани}} - L^*_{\text{нетретирани}} \\ \Delta a^* &= a^*_{\text{третирани}} - a^*_{\text{нетретирани}} \\ \Delta b^* &= b^*_{\text{третирани}} - b^*_{\text{нетретирани}} \end{aligned}$$

Разлика (промена) у боји, између третираних и нетретираних узорака, је одређена помоћу стандарда DIN 5033 коришћењем следеће формуле:

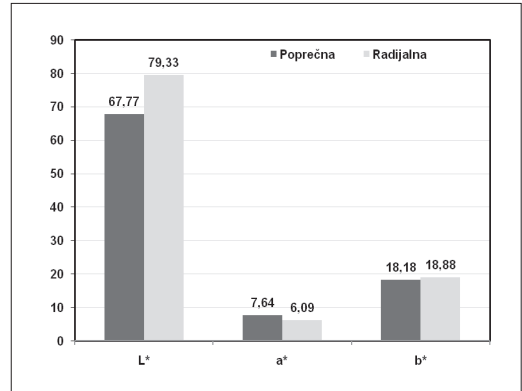
$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

ANOVA and Tukey-ev posthoc test (SPSS 13.0 software) су коришћени за поређење и одређивање значајних разлика у боји између две групе узорака.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Боја нетретиране и термички модификоване белјике буковог дрвета

Измерене и упросечене вредности координата L*, a* и b* код нетретираног дрвета су приказане на слици 5., а остали статистички показатељи су дати у табели 1. Према приказаним вредностима и резултатима Studentovog t-testa, координата L* је већа код радијалне површине (t=112,6 p<0,05), док је координата a* већа код попречне површине (t=48,02 p<0,05). Између површина, узимајући у обзир координату b*, не постоји разлика. Утврђена разлика у боји (ΔE) између попречне и радијалне површине, према најчешће коришћеној табели за класификацију Allegreti et al. (2008), показује да се ради о великој разлици у боји ($\Delta E=11,68$). Овоме је највише допринела координата L*, а најмање координата b*.



Слика 5. Просечне вредности CIEL*a*b* координата снимљених са попречне и радијалне површине нетретиране белјике буковог дрвета

Разлог за различите боје анализираних површина можемо наћи у боји прстенова прираста на попречној површини на коме су изражене тамније линије као последица присуства механичких влаканаца-либриформа. Исто тако, хоризонтално распоређене траке дрвета на радијалној површини могу допринети светлијој боји, односно мањој вредности координате L*.

Табела 1. Статистички показатељи CIEL*a*b* координата код нетретиране белјике буковог дрвета

Површина дрвета	Статистички показатељи	CIEL*a*b* координате		
		L*	a*	b*
Попречна	N	95	95	95
	x	67,77	7,64	18,18
	SD	2,69	0,79	0,83
	Max	74,47	9,50	19,80
Радијална	N	95	95	95
	x	79,33	6,09	18,88
	SD	2,38	0,94	1,02
	Max	83,24	9,39	21,65

У табели 2. су приказане просечне вредности са осталим статистичким показатељима CIEL*a*b* координата утврђених на термички третираним узорцима букове белјике.

Примењени термички третмани, у овом истраживању, су највише утицали на смањење координате L* што је проузроковало тамнију боју дрвета. Код попречне површине смањење ове координате износи 26,7% код третмана на 170°C, затим 54,3% код 190°C и 68,1% код 210°C. Код радијалне површине смањење је слично као код попречне површине, тако да код дрвета третираног на 170°C износи 29,1%, затим нешто мање при 190°C од 49,7%, али је значајно мање, у односу на попречну површину, утврђено код дрвета третираног на 210°C где је смањење координате L* износило 60,6%.

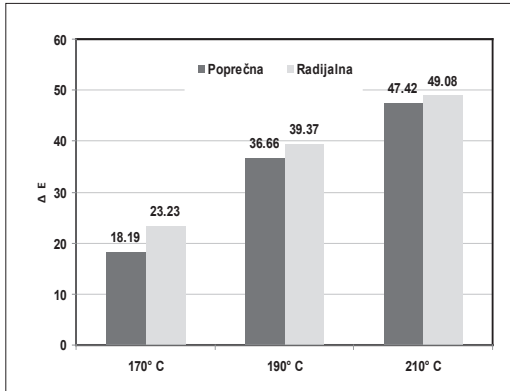
Координата b* се код попречне површине узорака третираних на 170°C није променила, али се са даљим повећањем температуре значајно смањује и код 190°C износи 14,29 односно 6,93 код дрвета термички обрађеног на 210°C. Код радијалне површине координата b* се повећала код 170°C, а затим нагло смањила при дејству температура од 190°C и 210°C. Приближно исти тренд је утврђен код координате a*, где је такође значајно смањење измерено на узорцима третираним на 210°C.

Примењена термичка модификација белјике углавном није значајно утицала на промену разлике у боји између попречне и радијалне површине. Као што смо већ навели, пре третмана разлика је износила 11,68 али се после дејства температуре та разлика смањила, тако да је при 170°C износила 6,71, затим се код 190°C повећала на 9,03 и наставила повећање тако да је код 210°C забележена разлика у боји од 9,83. Утврђено смањење још увек не показује да нема разлике у боји између ове две површине, јер је разлика у боји код 170°C скоро на граници између велике разлике и разлике видљиве на екрану средњег квалитета (Allegreti et al. 1998), док је код температура од 190 и 210°C разлика између попречне и радијалне површине термички третиране букове белјике и даље у категорији "Разлика која се може уочити и голим оком". Један од доприноса оваквој разлици може бити и претпоставка да се приликом термичког третмана најиспарљивији екстрактиви брже појављују на попречним површинама због њиховог лакшег испаравања кроз аксијалне анатомске елементе. Са друге стране много веће разлике у боји (ΔE) су забележене између нетретираних и термички модификованих узорака. Просечно утврђене вредности за попречне и радијалне површине су приказане на слици 6.

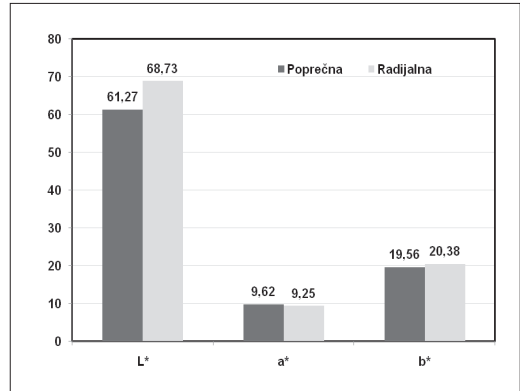
Табела 2. Статистички показатељи CIEL*a*b* координата утврђених на попречној и радијалној површини термички третираних узорака букове белјике

p.d.	s.p.	170°C			190°C			210°C		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
pop.	N	95	95	95	95	95	95	95	95	95
	SD	3,48	0,77	0,94	3,20	0,77	1,64	3,51	0,85	1,47
	X	49,66	8,51	18,71	30,93	8,19	14,29	21,64	4,86	6,93
	Min	39,51	7,30	15,56	15,36	5,37	9,65	12,66	2,58	3,67
	Max	55,18	10,74	20,94	35,58	9,71	17,87	28,15	6,29	9,82
rad.	N	95	95	95	95	95	95	95	95	95
	SD	4,23	0,49	1,06	3,52	0,77	1,92	1,42	0,47	1,00
	X	56,27	8,40	19,83	39,89	7,85	15,35	31,24	5,13	9,03
	Min	39,28	7,00	16,23	27,06	5,35	8,61	27,20	3,27	5,27
	Max	60,63	9,68	22,27	44,10	9,40	18,19	37,72	6,25	11,22

p.d. – површина дрвета; pop. – попречна површина; rad. – радијална површина; s.p. - статистички показатељи.



Слика 6. Просечна разлика у боји (ΔE) између нетретираних и термички модификованих узорака букове белјике утврђена на попречној и радијалној површини



Слика 7. Просечне вредности CIEL*a*b* координата снимљених са попречне и радијалне површине нетретиране лажне срчевине буковог дрвета

Добијени резултати потврђују да са повећањем температуре дрво постаје тамније па је самим тим и највећа разлика у односу на боју пре третмана измерена код термички третираних узорака на 210° C, а најмања на 170° C. Управо због нешто тамније попречне површине, разлика у боји између нетретираних и термички третираних узорака је већа код радијалне површине. Разлика између попречне и радијалне површине се у релативном смислу смањује, али је она значајна на свим температурама при чему резултати t-testa износе: за 170°C ($t=52,3$; $p<0,05$), за 190°C ($t=103,5$; $p<0,05$) и за 210°C ($t=163,6$; $p<0,05$).

Боја нетретиране и термички модификоване лажне срчевине

Боја буковине из предела лажне срчевине је одређена и анализирана на исти начин као и боја белјике. Просечне вредности координата L*, a* и b*, одређене пре третмана, су приказане на слици 7., а остали статистички показатељи су дати у табели 3.

Према приказаним вредностима и резултатима Studentovog t-testa, утврђена координата L* је већа код радијалне површине ($t=139,05$ $p<0,05$), док за координате a* и b* није утврђена разлика између попречне и радијалне површине. Разлика у боји (ΔE) између попреч-

не и радијалне површине је мања (7,51), у апсолутном износу, од вредности измерене код белјике, али се и даље сматра великом разликом. Овоме је највише допринела координата L*, а једнако мало координате a* и b*. Према приказаним вредностима CIEL*a*b* координата, утврђеним на нетретираном буковом дрвету из предела лажне срчевине, они су слични онима које приказују *Luu et al. (2005)*.

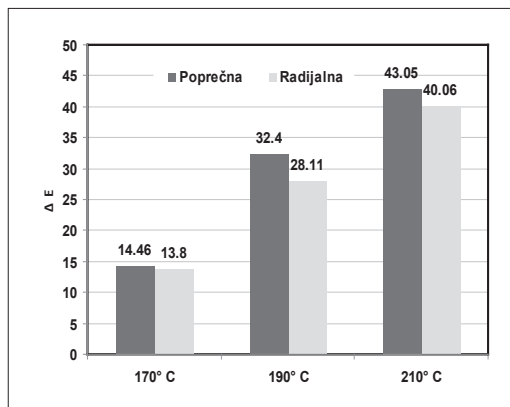
Табела 3. Статистички показатељи CIEL*a*b* координата боје код нетретиране лажне срчевине буковог дрвета

Површина дрвета	Статистички показатељи	CIEL*a*b* координате		
		L*	a*	b*
Попречна	N	91	91	91
	x	61,27	9,62	19,56
	SD	3,18	1,52	1,32
	Min	53,92	7,04	16,23
	Max	67,92	18,27	22,54
Радијална	N	91	91	91
	x	68,73	9,25	20,38
	SD	3,52	1,03	1,56
	Min	57,59	6,89	10,39
	Max	76,70	12,20	23,87

Дејством високе температуре значајно се мења боја букове лажне срчевине. Промена координате L^* је забележена већ на првој температури, а значајне промене координата a^* и b^* су утврђене на температурама од 190°C и 210°C . У Табели 4. су приказане просечне вредности са осталим статистичким показатељима CIEL*a*b* координата утврђених на термички третираним узорцима букове лажне срчевине на температури од 170°C , 190°C и 210°C – 4 h.

Према приказаним подацима и код овог дела буковог дрвета примењен термички третман је највише утицао на смањење координате L^* . Код попречне површине смањење износи 23,3% код третмана на 170°C , затим 52,2% код 190°C и 66,7% код 210°C . Код радијалне површине смањење је слично код дрвета третираног на 170°C и износи 19,8%, затим значајно мање при 190°C и 210°C односно 41,8 и 55%. Координата b^* се код обе површине узорака третираних на 170°C није променила, али се са даљим повећањем температуре значајно смањује и код 190°C износи 13,69 односно 6,61 код дрвета термички обрађеног на 210°C . Сличан тренд је забележен и код координате a^* .

Слично као и код белјике, термичка модификација није значајно утицала на промену разлике у боји између попречне и радијалне површине. Међутим, за разлику од белјике, код лажне срчевине се та разлика углавном повећала са дејством третмана. Пре третмана



Слика 8. Просечна разлика у боји (ΔE) између нетретираних и термички модификованих узорака букове лажне срчевине утврђена на попречној и радијалној површини

разлика је износила 7,51 а после дејства температуре иста се повећавала, и при 170°C износила 8,24 код 190°C од 10,87 а код 210°C од 10,84. Према већ горе поменутој класификацији, забележена разлика у боји припада групи означеној као велика разлика у боји ($6 \leq \Delta E < 12$). И код лажне срчевине је потврђено да су многе веће вредности разлика у боји установљене између нетретираних и термички модификованих узорака. Просечно утврђене вредности са попречне и радијалне површине су приказане на слици 8.

Табела 4. Статистички показатељи CIEL*a*b* координата утврђених на попречној и радијалној површини термички модификованих узорака букове лажне срчевине

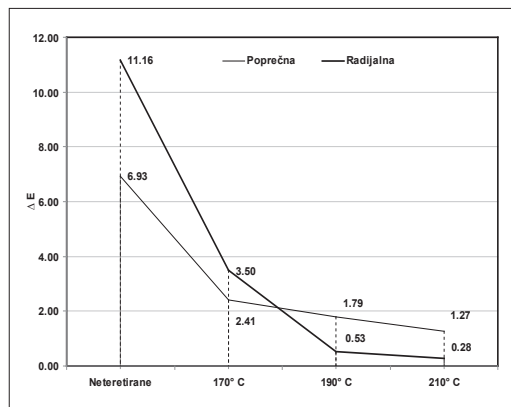
p.d.	s.p.	170°C			190°C			210°C		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
pop.	N	91	91	91	91	91	91	91	91	91
	x	46,98	9,73	18,75	29,26	8,44	13,69	20,41	4,79	6,61
	SD	4,10	0,85	1,11	2,88	0,69	1,31	3,49	0,86	1,30
	Min	35,09	1,80	15,93	19,85	6,06	10,00	10,05	2,86	3,75
	Max	55,41	11,45	21,14	36,16	9,82	16,17	26,27	6,61	9,04
rad.	N	91	91	91	91	91	91	91	91	91
	x	55,1	9,29	20,06	40,01	8,36	15,29	30,98	5,22	8,98
	SD	3,94	0,75	1,31	2,72	0,68	1,61	1,59	0,60	1,26
	Min	35,40	6,33	11,83	28,47	5,70	7,88	24,86	3,37	4,74
	Max	60,89	11,02	22,15	45,46	10,09	18,63	33,76	6,43	10,89

Добијени резултати потврђују да је највећа разлика у односу на боју пре третмана измерена код термички третираних узорака на 210°C, а најмања код узорака третираних на 170°C. Резултати t-testa се разликују од оних приказаних код белјике. Разлика у боји између попречне и радијалне површине је незнатна при најблажем режиму (170°C), али је постала значајна односно већа код попречне површине при 190°C ($t=92,3$ $p<0,05$) и при 210°C ($t=103,0$ $p<0,05$). Као последица тамније боје нетретиране лажне срчевине, ови резултати се разликују од оних код белјике где је већа разлика боје утврђена код радијалне површине и то код све три температуре.

Разлика у боји између белјике и лажне срчевине

Како је у процесу термичке модификације дошло до промене боје, веома је важно установити да ли се дрво лажне срчевине изједначило са бојом термички модификоване белјике. Ако се не утврде битне разлике, онда се мање вредно дрво из предела лажне срчевине, по боји, може подједнако користити као и дрво белјике. На слици 9. су приказане просечне вредности забележених разлика у боји на попречној и радијалној површини. Разлика у боји нетретиране белјике и лажне срчевине је више изражена на радијалној (11,16) него на попречној површини (6,93). Према Allegreti et al. (1998), ради се о великој разлици у боји између ова два дрвета како на попречној тако и на радијалној површини. Овај резултат је очекиван с обзиром на нехомогенију боју лажне срчевине, а која је нарочито изражена на радијалној површини.

Дејством термичког третмана долази до значајног смањења разлике у боји. Код третмана на 170°C разлика је и даље већа на радијалној површини и износи 3,50, а на попречној нешто мања и износи 2,41. Даље повећање температуре на 190°C и 210°C је довело до измене тј. већа разлика се добија када се координате боје измере на попречној површини. При томе су разлике на 190°C и са попречне (1,79) и са радијалне (0,53) констатоване као веома мале. Термички третман дрвета на 210°C



Слика 9. Разлика у боји између нетретиране и термички модификоване белјике и лажне срчевине са попречне и радијалне површине (просечне вредности)

је произвео најмању разлику у боји између белјике и лажне срчевине, а која је у овом случају утврђена на радијалној површини.

Вредност забележене разлике је мања, у односу на нетретирано дрво, за скоро 89% на попречној, односно за 96% на радијалној површини. Констатована разлика на радијалној површини (0,28) је према класификацији боје, на граници да скоро нема видљиве разлике, док је на попречној (1,27) та разлика врло мала. Закључак је да примењена температура од 210°C доводи до скоро исте боје белјике и лажне срчевине, поготову на радијалној површини, и са тог становишта се може закључити да су ова два дела буковог дрвета у том смислу потпуно изједначена.

ЗАКЉУЧЦИ

Истраживањем боје нетретираног и термички третираног дрвета букве са лажном срчевином добијени су следећи резултати:

Према просечним вредностима CIEL*a*b* координата, утврђена је велика разлика у боји ($\Delta E=11,68$) између попречне и радијалне површине нетретиране белјике, док је код нетретиране лажне срчевине та разлика значајно мања. Код лажне срчевине су забележене мање вредности координате L*, у односу на

бељику, али су веће апсолутне вредности утврђене код a^* и b^* координата. Разлика у боји између ова два дела буковог дрвета је више изражена на радијалној ($\Delta E=11,16$) него на попречној ($\Delta E=6,93$) површини.

Примењен термички третман је код оба дела буковог дрвета највише утицао на промену односно смањење координате L^* . Координате a^* и b^* су се такође смањиле, али не као координата L^* , при чему је то смањење значајније на температурама од 190 и 210°C. Висока температура није значајно утицала на промену разлике у боји, између попречне и радијалне површине, од оне утврђене код нетретираних

узорака. Температура од 210°C доводи до скоро индентичне боје бељике и лажне срчевине што наводи на закључак да су ова два дела буковог дрвета у том смислу потпуно изједначена. При овој констатацији не треба изоставити ни претпоставку да се у случају изједначених свостава, бељика и лажна срчевина могу једнако употребити у готовом производу од термички модификованог буковог дрвета.

Напомена: Рад је реализован у оквиру пројекта бр. ТР 31041 и ТР 37008 који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON COLOR CHANGE OF BEECH WOOD WITH RED HEARTWOOD

Nebojša Todorović, Assistant professor, University of Belgrade, Faculty of Forestry

Zdravko Popović, Full professor, University of Belgrade, Faculty of Forestry

Goran Milić, Associate professor, University of Belgrade, Faculty of Forestry

Ranko Popadić, Assistant professor, University of Belgrade, Faculty of Forestry

Abstract: The goal of this work was to examine the parameters of color of beech wood before and after thermal treatment, and to determine if there is a difference in color between sapwood and red heartwood before and after application of high temperature. Samples were treated at temperatures of 170°C, 190°C and 210°C, respectively, during 4 hours. Color coordinates (CIEL*a*b* system) were measured before and after treatment by using the following parameters: ΔL , Δa , Δb and ΔE – color change. Color was assessed at four spots on the radial and cross-section surfaces of wood and their mean values were taken for further calculations. Acquired results show that the applied heat treatment of sapwood did not significantly influence the change of color difference between cross-section and radial surfaces. The difference between cross-section and radial surfaces, in nontreated red heartwood was smaller than that measured in sapwood. The color difference of nontreated sapwood and red heartwood was more pronounced on the radial than on the cross-section surface. Application of high temperature caused a significant decrease of this difference. Temperature of 210 °C caused the smallest color difference between these two parts of wood which was in this research determined on the radial surface. It was concluded that the applied thermal treatment almost equalized the colors of sapwood and red heartwood, especially on the radial surface, and from this aspect it can be concluded that these two parts of beech wood were completely equalized. It should also be noted that in the case of equalized properties, sapwood and red heartwood can be equally applied in a final product made of thermally treated beech wood.

Keywords: beech wood, thermal treatment, change of color, red heartwood.

INTRODUCTION

Thermal treatment is an ecological method used in wood preservation. Aside from the enhancement of hygroscopicity and durability, one of the important reasons for its application is the change of wood color (Mitsui *et al.* 2001; Bekhta and Neimz 2003; Johansson and Morén 2006; Esteves *et al.* 2008; González-Peña and Hale 2009; Young and Li 2010). Thermal treatment gives wood a darker color which has become very interesting on the market and by which the usability of lower-value wood species can be enhanced, along with an increase of their market value. According to some authors, change of wood color can be an indicator of the degree of changes of wood properties (Bourgois *et al.* 1989). Reasons behind the change of wood color after heat treatment can be found in the degradation of hemicellulose (Sehistedt-Persson 2003; Sundqvist 2004) and the extractives which participate in the formation of color of hydrothermally treated wood (Mc Donald *et al.* 2000; Sundqvist and Moren 2002).

Change of color after heat treatment is mostly caused by the presence of extractives in wood structure (Tjeerdsma *et al.* 1998; Sundqvist and Moren 2002; Bekhta and Neimz 2003; Sundqvist 2004; Windeisen *et al.* 2009; Kocafee *et al.* 2008; Niemz *et al.* 2010; Aydemir *et al.* 2011). Aside from that, after the exposure to high temperatures, formation of aldehydes and phenols occurs, and they contribute to the part of color change which occurs as a consequence of chemical reactions (Mc Donald *et al.* 2000). Beech is the most important hardwood species in Europe. Aside from the results about the physical and chemical properties of thermally treated beech wood (Yildiz 2002, Reppelin *et al.* 2005, Hakkou *et al.* 2006, Arnold 2009, Todorović *et al.* 2012), some authors also showed the results about the color change of thermally treated beech wood.

Gonzalez-Pena and Hale (2009) examined the influence of high temperature on chemical properties and dimensional stability of beech wood at temperatures of 190, 210, 230 and 245°C during 30 minutes, and 1, 4, 8, and 16 hours. They concluded that the color change was a consequence

of chemical changes of the main polymers and that it originated from changes in lignin more so than from changes in polysaccharides.

Mitani and Barboutis (2014) examined dimensional stability and color of thermally treated beech wood at 180°C during five periods between 2 and 10 hours. Dimensional stability and absorption were measured after 1 h, 3 h, 6 h, 1 day and 3 days after the submersion of samples in water. Significant color changes, according to these authors, occurred after 4 h. The most remarkable color changes, in comparison to the untreated samples, occurred after 8 and 10 hours of exposure.

The mentioned examinations were mostly conducted on samples of beech wood without red heartwood. However, beech is particularly interesting because of the presence of red heartwood which is the material for final products of lower market value because of its naturally darker color and the potential presence of fungi. Since thermal modification causes a color change, it is important to determine if the color of thermally modified red heartwood differs from that of sapwood, which is very important for its later processing and usability. If there are no significant differences, then it would be acceptable to use this, currently less valuable material, for final products of high value.

According to SVEGA NAVEDENOG, the main goal of this research was to determine the parameters of color in nontreated samples of beech sapwood and red heartwood, and to examine the color change of these two parts that occurred after thermal treatments.

MATERIAL AND METHOD

Material for this research originated from 11 randomly chosen beech trees from the forest area which is a property of the Educational base of Faculty of Forestry, on Goč mountain. Average breast height diameter of these trees was 45 cm. All trees contained a similar share of healthy red heartwood (around 50%). The trees were cut into logs about 2 m long. Three logs were cut from each tree (33 logs in total): above breast height,

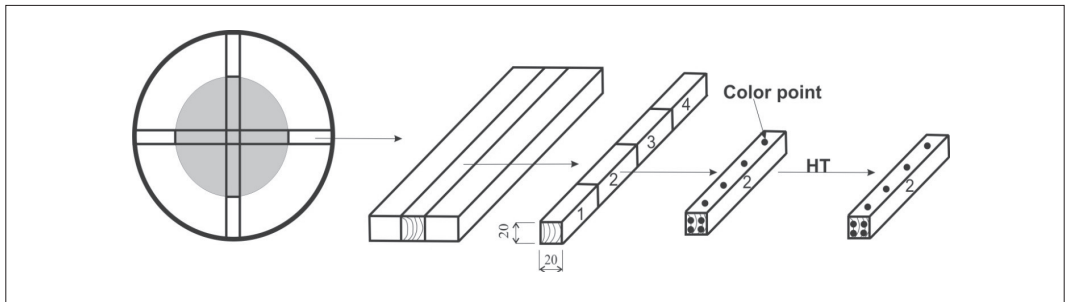


Figure 1. Cutting of samples and the place of color assessment (1-nontreated, 2-170 °C, 3-90 °C, 4-210 °C, HT – thermally treated).

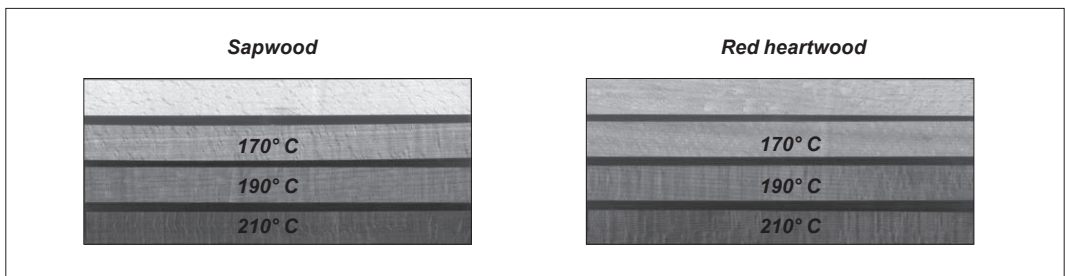


Figure 2. Thermally treated samples of beech sapwood and red heartwood

from the middle and at the crown. Logs were then cut into 8 radial boards about 30 mm thick (4 from sapwood and 4 from red heartwood – Fig. 1). All boards were kiln dried and cut into four samples along the fibers (1 nontreated + 3 for thermal treatment) (Fig. 1). Samples had clearly defined anatomical directions and without any visible faults. For color determination, samples of 20x20x320 mm were cut (radial, tangential and axial ones). In total, 576 samples were prepared, 288 of which from sapwood (72+3x72) and 288 of red heartwood (72+3x72).

Thermal treatment

Thermal treatment of samples was conducted with water vapor in a laboratory kiln (cca. 1m³) at atmospheric pressure. Samples were exposed to temperatures of 170, 190 and 210°C during 4 h (Figure 2). The chosen schedule was the one usually used in industrial thermal treatment of beech wood in flooring, wall padding, furniture, etc. Samples were heated from room temperature up

to set temperature for 24 h. Before and after the treatment all samples were conditioned at 23°C and at relative air humidity of 50%.

Assessment of wood color

Wood color was assessed in CIELab system (Figure 3) with BYK (BYK Gardner GmbH colorimeter, Figure 4) by using the standard lighting D65 and at an angle of observation of 10°. Diameter of the opening was 8 mm. The instrument was calibrated by using the calibration white board which came with the device. Each sample was placed on a flat board to ensure stability during measuring. Color was assessed before and after treatment on radial and cross-section surface on four measuring points. Average values of these four measurements were used for further calculations. Color was recorded in 10 nm intervals in the visible part of spectrum (400 nm to 700 nm) with these coordinates: L* (illumination), a* (green-red), b* (blue-yellow).

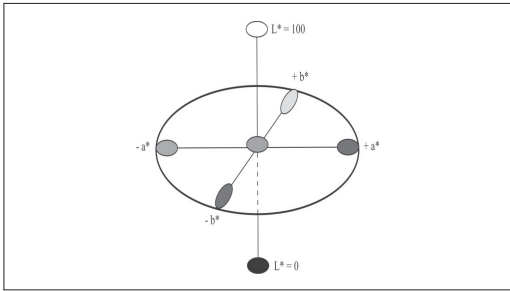


Figure 3. CIEL*a*b* coordinate system

Using the values of L*a*b*, the differences of illumination (ΔL^*) and the coordinates (Δa^* and Δb^*) were determined according to the following formulas:

$$\Delta L^* = L^*_{\text{treated}} - L^*_{\text{nontreated}}$$

$$\Delta a^* = a^*_{\text{treated}} - a^*_{\text{nontreated}}$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{treated}} - b^*_{\text{nontreated}}$$

The difference (change) of color between the treated and nontreated samples was determined according to DIN 5033 standard, by using this formula:

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

ANOVA and Tukey post hoc test (SPSS 13.0 software) were used to compare and determine significant color differences between the two groups of samples.

RESULTS AND DISCUSSION

Color of nontreated and thermally modified beech sapwood

The measured and average values of L*, a* and b* coordinates in nontreated wood are shown in Fig. 5 while Table 1 shows the other statistical indicators. According to these values and the results of Student's t-test, the L* coordinate was bigger on radial surface ($t=112.6$ $p<0.05$), while the a* coordinate is bigger on cross-section surface ($t=48.02$ $p<0.05$). The b* coordinate did not differ between the two surfac-



Figure 4. BYK colorimeter

es. The determined color difference (ΔE) between cross-section and radial surfaces, according to the usually used classification table *Allegreti et al. (2008)*, shows that there was a great color difference ($\Delta E=11,68$). This was influenced mostly by the L* coordinate, and least by the b* coordinate.

The cause for different colors of the analyzed surfaces can be found in colors of growth rings on cross-section surface on which the darker lines are more pronounced, as a consequence of the presence of mechanical fibers - the libriform. Similar to that, the horizontally dispositioned wood stripes on the radial surface can contribute to a lighter color, that is, to a lower value of L* coordinate.

The applied thermal treatments in this research mostly influenced the decrease of the L* coordinate which caused a darker wood color. On cross-section surface, the decrease of this coordinate was 26.7% at 170°C, 54.3% at 190°C, and

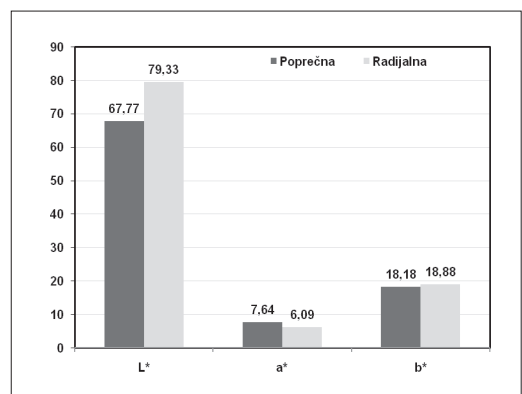


Figure 5. Average values of CIEL*a*b* coordinates recorded on cross-section and radial surfaces of nontreated beech sapwood

68.1% at 210°C. On radial surface, this decrease was similar at 170°C (29.1%), at 190°C it was 49.7%, and it was significantly smaller at 210°C – 60.6%.

Table 1. Statistical indicators of CIEL*a*b* coordinates in nontreated beech sapwood

Wood surface	Statistical indicators	CIEL*a*b* coordinates		
		L*	a*	b*
Cross-section	N	95	95	95
	x	67.77	7.64	18.18
	SD	2.69	0.79	0.83
	Min	62.22	6.32	15.62
	Max	74.47	9.50	19.80
Radial	N	95	95	95
	x	79.33	6.09	18.88
	SD	2.38	0.94	1.02
	Min	72.00	4.10	16.33
	Max	83.24	9.39	21.65

Table 2 shows the average values with other statistical indicators of CIEL*a*b* coordinates determined on thermally treated samples of beech sapwood.

The b* coordinate on cross-section surface of samples treated at 170°C did not change, but it did significantly decrease with the increase of temperature: it was 14.29 at 190°C and 6.93 at 210°C. On radial surface, the b* coordinate increased at 170°C, and abruptly decreased at 190°C and 210°C. A similar trend was noted with the a* coordinate which also decreased significantly on samples treated at 210°C.

The applied thermal modification of sapwood mostly did not significantly influence the change of color differences between the cross-section and radial surface. As stated before, before treatment the difference was 11.68, but then it decreased to 6.71 at 170°C and increased to 9.03 at 190°C which continued at 210°C when it reached 9.83. This decrease still does not indicate that there are no color differences between these two surfaces because the color difference at 170°C almost borders the big difference and a difference visible on an average screen (*Allegreti et al. 1998*), while the differences between the cross-section and radial surfaces of treated beech sap-

Table 2. Statistical indicators of CIEL*a*b* coordinates determined on cross-section and radial surface of thermally treated samples of beech sapwood

w. s.	st. ind.	170°C			190°C			210°C		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
c.-sec.	N	95	95	95	95	95	95	95	95	95
	SD	3.48	0.77	0.94	3.20	0.77	1.64	3.51	0.85	1.47
	X	49.66	8.51	18.71	30.93	8.19	14.29	21.64	4.86	6.93
	Min	39.51	7.30	15.56	15.36	5.37	9.65	12.66	2.58	3.67
	Max	55.18	10.74	20.94	35.58	9.71	17.87	28.15	6.29	9.82
rad.	N	95	95	95	95	95	95	95	95	95
	SD	4.23	0.49	1.06	3.52	0.77	1.92	1.42	0.47	1.00
	X	56.27	8.40	19.83	39.89	7.85	15.35	31.24	5.13	9.03
	Min	39.28	7.00	16.23	27.06	5.35	8.61	27.20	3.27	5.27
	Max	60.63	9.68	22.27	44.10	9.40	18.19	37.72	6.25	11.22

w.s. – wood surface; c.-sec. – cross-section surface; rad. – radial surface; s.p. - statistički pokazatelji.

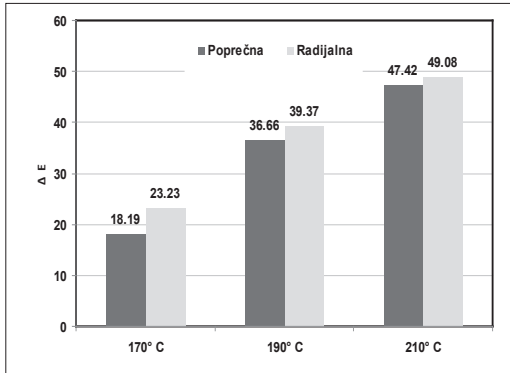


Figure 6. Average color difference (ΔE) between nontreated and thermally modified samples of beech sapwood, recorded on cross-section surface and radial surface

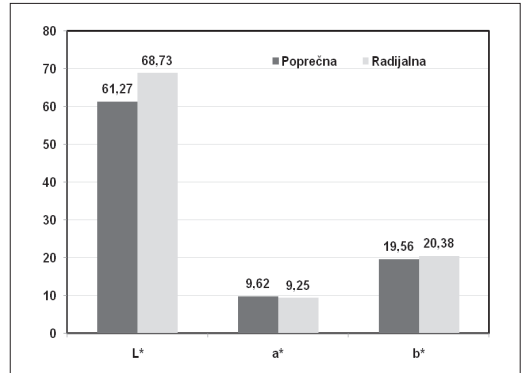


Figure 7. Average values of CIEL*a*b* coordinates recorded on cross-section surface and radial surface of nontreated beech red heartwood

wood at 190 and 210°C still fall in the “difference observable by naked eye” category. One of the contributions to these differences can be the assumption that, during thermal treatment, the most evaporable extractives show up sooner on cross-section surfaces because of their easier evaporation through axial anatomical elements. On the other hand, the much bigger color differences (ΔE) were recorded between nontreated and thermally modified samples. Average values from the cross-section and radial surfaces are shown in Figure 6.

Obtained results confirm that wood gets darker with an increase of temperature. Therefore, the biggest differences from the color before treatment were measured in thermally treated samples at 210°C, and the smallest at 170°C. Because of the somewhat darker cross-section surface, color differences between nontreated and thermally treated samples were bigger on radial surface. The differences between the cross-section and radial surface relatively decrease, but they are significant at all the temperatures, with results of t-test of: at 170°C ($t=52.3$; $p<0.05$), at 190°C ($t=103.5$; $p<0.05$) and at 210°C ($t=163.6$; $p<0.05$).

Color of nontreated and thermally modified red heartwood

Color of beech red heartwood was determined and analyzed in the same way as the color of sap-

wood. Figure 7 shows average values of L*, a*, and b* coordinates before treatment, while the other statistical indicators are shown in Table 3.

The values and the results of Student’s t-test, the L* coordinate was bigger on radial surface ($t=139.05$ $p<0.05$), while for a* and b* coordinates there was no difference between the cross-section and radial surfaces. Color difference (ΔE) between the cross-section and radial surfaces was smaller (7.51), in absolute value, than the value recorded on sapwood, but this is still considered a big difference. This was mostly contributed by the L* coordinate, while a* and b* coordinates contributed equally little. The values of CIEL*a*b* coordinates on nontreated beech red heartwood were similar to those shown by Liu *et al.* (2005).

Application of high temperatures significantly changed the color of beech red heartwood. A change of the L* coordinate was recorded already at the first temperature, and significant changes of a* and b* coordinates were determined at 190°C and 210°C. Table 4 shows their average values with other statistical indicators of CIEL*a*b* coordinates determined on thermally treated samples of beech red heartwood at 170, 190, and 210 °C during 4 hours.

These results show that thermal treatment had the biggest influence on L* coordinate in this wood part, too. On the cross-section surface the decrease was 23.3% at 170°C, 52.2 at 190 °C, and 66.7% at 210°C. On the radial surface, the de-

Table 3. Statistical indicators of CIEL*a*b* coordinates of color of nontreated beech red heartwood

Wood surface	Statistical indicators	CIEL*a*b* coordinates		
		L*	a*	b*
Cross-section	N	91	91	91
	x	61.27	9.62	19.56
	SD	3.18	1.52	1.32
	Min	53.92	7.04	16.23
	Max	67.92	18.27	22.54
Radial	N	91	91	91
	x	68.73	9.25	20.38
	SD	3.52	1.03	1.56
	Min	57.59	6.89	10.39
	Max	76.70	12.20	23.87

crease was similar as in the wood treated at 170°C and it was 19.8%, then significantly lower at 190°C and 210°C with 41.8% and 55%, respectively. The b* coordinate did not change on either surface at 170°C, but then it significantly decreased and at 190°C it was 13.69 and 6.61 at 210°C. A similar trend was noted with the a* coordinate.

Similarly as with sapwood, thermal modification did not significantly influence the change of color difference between the cross-section and radial surface. However, unlike with sapwood, that difference was mostly increasing during treatment of red heartwood. Before treatment, the difference was 7.51 and after the application of high temperatures it increased and was 8.24 at 170°C, 10.87 at 190°C and 10.84 at 210°C. According to the aforementioned classification, the recorded color difference falls into the “big color difference” category ($6 \leq \Delta E < 12$). With red heartwood too, it was confirmed that there were much bigger color differences between nontreated and thermally modified samples. The average determined values from the cross-section and radial surfaces are shown in Figure 8.

Obtained results confirm that the biggest difference from the pre-treatment color was measured on thermally treated samples at 210°C, and the lowest on samples treated at 170°C. Results of t-test differ from those shown with sapwood. Color difference between the cross-section and radial surfaces was insignificant at the lowest temperature (170°C) but then it increased and was bigger on cross-section surface at 190°C ($t=92.3$ $p<0.05$) and at 210 °C ($t=103.0$ $p<0.05$). As a consequence of the darker color of nontreated red heartwood, these results differ from those

Table 4. Statistical indicators of CIEL*a*b* coordinates determined on cross-section and radial surface of thermally modified samples of beech red heartwood

w. s.	st. ind.	170°C			190°C			210°C		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
c.-sect.	N	91	91	91	91	91	91	91	91	91
	x	46.98	9.73	18.75	29.26	8.44	13.69	20.41	4.79	6.61
	SD	4.10	0.85	1.11	2.88	0.69	1.31	3.49	0.86	1.30
	Min	35.09	1.80	15.93	19.85	6.06	10.00	10.05	2.86	3.75
	Max	55.41	11.45	21.14	36.16	9.82	16.17	26.27	6.61	9.04
rad.	N	91	91	91	91	91	91	91	91	91
	x	55.1	9.29	20.06	40.01	8.36	15.29	30.98	5.22	8.98
	SD	3.94	0.75	1.31	2.72	0.68	1.61	1.59	0.60	1.26
	Min	35.40	6.33	11.83	28.47	5.70	7.88	24.86	3.37	4.74
	Max	60.89	11.02	22.15	45.46	10.09	18.63	33.76	6.43	10.89

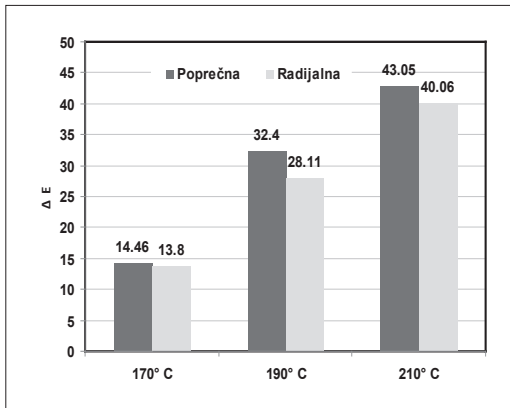


Figure 8. Average color difference (ΔE) between nontreated and thermally modified samples of beech red heartwood recorded on cross-section and radial surface

with sapwood where a bigger color difference was recorded on radial surface, at all three temperatures.

Color difference between sapwood and red heartwood

Because thermal modification alters the color, it is very important to determine if the color red heartwood equalized with that of thermally modified sapwood. If there are no significant differences, then the lower-valued wood from red heartwood could, by color, be used equally to that of sapwood. Figure 9 shows average values of recorded color differences on the cross-section and radial surfaces. Color difference of nontreated sapwood and red heartwood was more pronounced on the radial (11.16) than on the cross-section surface (6.93). According to Allegreti et al. (1998), this is a big difference in color between these two woods on both cross-section and radial surface. This result was expected, considering the more nonhomogeneous color of red heartwood, which is particularly pronounced on the radial surface.

Application of thermal treatment caused a significant decrease in color difference. At 170°C the difference was still bigger on the radial surface (3.50) than on the cross-section surface (2.41).

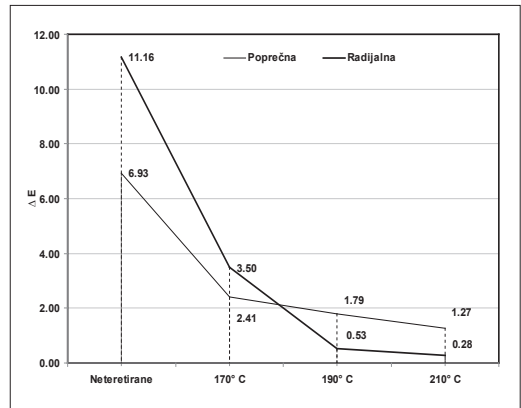


Figure 9. Color difference between nontreated and thermally modified sapwood and red heartwood on cross-section and radial surfaces (average values)

The increase of temperature to 190°C and 210°C caused a shift with higher differences on the cross-section surface. These differences at 190°C are considered small on both the cross-section surface (1.79) and the radial surface (0.53). Thermal treatment at 210°C resulted in smallest color differences between sapwood and red heartwood, and this was recorded on the radial surface.

Values of recorded differences were smaller than those of nontreated wood by nearly 89% on the cross-section surface, and by 96% on the radial surface. The difference on the radial surface (0.28) was, by color classification, on the border of almost invisible, while on the cross-section surface it was very small (1.27). The conclusion is the temperature of 210 °C causes almost same colors of sapwood and red heartwood, and particularly on the radial surface, and that from this aspect these two parts of wood can be considered completely equalized.

CONCLUSIONS

Research of colors of nontreated and thermally treated wood with red heartwood resulted in following:

According to average values of CIEL*a*b* coordinates, there was a big color difference

($\Delta E=11.68$) between the cross-section surface and the radial surface of nontreated sapwood, while this difference was significantly smaller in red heartwood. Red heartwood showed smaller values of the L^* coordinate as compared to sapwood, but with bigger absolute values of a^* and b^* coordinates. Color difference between these two parts of beech wood is more pronounced on the radial ($\Delta E=11.16$) than on the cross-section ($\Delta E=6.93$) surface.

The applied thermal treatment influenced mostly on the decrease of the L^* coordinate in both parts of wood. The a^* and b^* coordinates also decreased, but not by as much, and their decrease was bigger at 190°C and 210°C. High temperature did not significantly influence the difference of color between the cross-section and radial surfaces, and those of nontreated samples. The temperature of 210°C causes almost identical colors of sapwood and red heartwood which indicates that in this aspect these two parts of beech wood are almost completely equalized. It can also be assumed that, with this property being equal, sapwood and red heartwood can be equally used in a final product made from thermally modified beech wood.

Acknowledgments: The authors acknowledge the financial support by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (TR 37008 and TR 31041).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Allegretti, O., Travan, L., and Cividini, R. (2008). "Drying techniques to obtain white beech," *Pro Ligno* 4 (1), 11-19.
- Arnold, M. (2009): "Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce," *Journal of Materials Science*, 45, 669-680.
- Aydemir, D., Gunduz, G., Altuntas, E., Ertas, M., Turgut Sahin, H., and Hakki Alma, M. (2011). "Investigating changes in the chemical constituents and dimensional stability of heat-treated hornbeam and uludag fir wood," *BioResources* 6(2), 1308-1321.
- Bekhta, P., and Niemz, P. (2003). "Effect of high temperature on the change of color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood," *Holzforschung*. 57, 539-546.
- Bourgois, J., Bartholin, M., and Guyonnet, R. (1989). "Thermal treatment of wood: Analysis of the obtained product," *Wood Sci. Technol.* 23, 303-310.
- Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I., and Pereira, H. (2008). "Heat induced color changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood," *Wood Sci. Technol.* 42(5), 369-384.
- González-Peña, M., and Hale, M. (2009). "Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine," Part 1: Colour evolution i colour changes, *Holzforschung* 63, 385-393.
- Hakkou, M., Petrissans, M., Gerardin P., and Zoulihan, A. (2006): "Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. Elsevier, *Polymer Degradation and Stability*, 91 (2): 393-397.
- Johansson, D., and Morén, T. (2006). "The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood," *Holz Roh-Werkst.* 64, 104-110.
- Kocaefe, D., Poncsak, S., and Bulok Y. (2008). "Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch i aspen," *BioRes.* (3)2, 517-537.
- McDonald, A.G., Fernandez, M., Kreber, B., and Laytner, F. (2000). "The chemical nature of kiln brown stain in radiata pine," *Holzforschung* 54, 12-22.
- Mitani, A., and Barboutis, J. (2014). "Changes Caused by Heat Treatment in Color and Dimensional Stability of Beech (*Fagus sylvatica* L.) Wood," *Drvna industrija* 65 (3) 225-232.
- Mitsui, K., Takada H., Sugiyama, M., and Hasegawa, R. (2001). "Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color, *Holzforschung*. 55, 601-605.
- Niemz, P., Hofmann, T., and Rétfalvi, T. (2010). "Investigation of chemical changes in the structure of thermally modified wood," *Maderas y Science Tecnologia.* 12 (2), 69-78.

- Repellin, V.; Guyonnet, R., 2005: Evaluation of heat treated wood swelling by different scanning calorimetry in relation to chemical composition. *Holzforschung*, 59: 28-34.
- Sehistedt-Persson, M. (2003). "Colour responses to heat treatment of extractives and sap from pine and spruce," 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, 459-464.
- Sundqvist, B., and Morén, T. (2002). "The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment," *Holz Roh-Werkst.* 60, 375-376.
- Sundqvist, B. (2004). "Colour changes and acid formation in wood during heating," Doctoral thesis. Lulea University of Technology.
- Tjeerdsma, B., Bonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., and Militz, H. (1998). "Characterization of thermally modified wood: Molecular reasons for wood performance improvement," *Holz Roh-Werkst* 56, 149-153.
- Todorović, N., Popović, Z., Milić, G., and Popadić, R. (2012). „Estimation of heat-treated beech-wood properties by color change," *BioRes.* (7)1, 799-815.
- Toung M.,V., and Li, J. (2010). "Effect of heat treatment on the change in color and dimensional stability of acacia hybrid wood," *BioRes.* 5(2), 1257-1267.
- Windeisen, E., Bächle, H., Zimmer, B., and Wegener, G. (2009). "Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood," *Holzforschung.* 63, 773-778.
- Yildiz, S. (2002). "Physical, mechanical, technological and chemical properties of beech and spruce wood treated by heating," PhD dissertation Karadeniz Tech. Univ., Trabzon, Turkey.

