

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



**Posouzení barvy a tvrdosti neupraveného a termicky upraveného  
dřeva břízy bělokoré**

Bakalářská práce

Autor: Petr Fait

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petr Fait

Dřevařství

Název práce

**Posouzení barvy a tvrdosti neupraveného a termicky upraveného dřeva břízy bělokoré**

Název anglicky

**Assessment of color and hardness of untreated and heat-treated European birch wood**

---

### Cíle práce

1. Zhodnotit barvu a tvrdost dřeva břízy, a to jak neupraveného, tak i termicky upraveného při teplotách úpravy od 160 do 200 °C, s odstupňováním po 10 °C.
2. Posoudit faktor termo-úpravy s ohledem na vybrané vlastnosti.
3. Porovnat zjištěné hodnoty s dostupnými údaji v odborné literatuře.

### Metodika

1. Zpracovat literární rešerši o zkoumané dřevině, termické úpravě dřeva, hodnocených vlastnostech a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.
2. Standardizovanými postupy na ne-klimatizovaných neupravených (referenčních) zkušebních tělesech poměřit barvu vzorků spektrofotometrem CM-600d a tvrdost na přístroji DuraVision-30. Po tepelných úpravách vzorků vykonat opětovná měření předmětných vlastností.
3. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.

## Doporučený rozsah práce

40-50 stran

## Klíčová slova

dřevo břízy, termická úprava, barva, tvrdost, variabilita vlastností

---

## Doporučené zdroje informací

- Borůvka, V., and Babiak, M. (2016). Vlastnosti dřeva v příkladech, 1. vyd. Praha ČZU, 139 s. ISBN 978-80-213-2618-7
- ČSN EN 1534 (492124). (2011). "Dřevěné podlahoviny – Stanovení odolnosti proti vtisku – Metoda zkoušení [Wood flooring – Determination of resistance to indentation – Test method]," Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague, Czech Republic.
- Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, pp. 258. ISBN 0-419-25550-8
- Kačíková, D., and Kačík, F. (2011). Chemické a Mechanické Zmeny Dreva pri Termickej Úprave [Chemical and Mechanical Changes of Wood due to the Thermal Modification], Technická Univerzita vo Zvolene, Zvolen, Slovakia. ISBN 978-80-228-2249-7
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., and Babiak, M. (1997). Štruktúra a Vlastnosti Dreva [Structure and Properties of Wood], Príroda AS, Bratislava, Slovakia. ISBN 80-07-00600-1.
- Reinprecht, L., and Vidholdová, Z. (2008). Termodrevo – Příprava, Vlastnosti a Aplikácie [ThermoWood – Preparation, Properties and Applications], Technická Univerzita vo Zvolene, Zvolen, Slovakia. ISBN 978-80-228-1920-6
- Reinprecht, L., and Vidholdová, Z. (2011). Termodrevo [ThermoWood], ŠMÍRA-PRINT, Czech Republic. ISBN 978-80-87427-05-7
- Reinprecht, L. (2016). Wood Deterioration, Protection and Maintenance, John Wiley & Sons, Oxford, United Kingdom. ISBN 978-1-119-10653-1
- Wagenführ, R. (2000). Holzatlas, Fachbuchverlag, Leipzig. pp. 707. ISBN 978-3446213906
- Zobel, B. J., and Buijtenen, J. P. (1989). Wood Variation: Its Causes and Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 363. ISBN 978-3-642-74071-8
- 

## Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

## Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

## Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 20. 11. 2017

**doc. Ing. Milan Gaff, PhD.**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2018

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2019

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Posouzení barvy a tvrdosti neupraveného a termicky upraveného dřeva břízy bělokoré“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 17. 4. 2019

.....

## **Poděkování**

Tímto chci poděkovat Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za odborné vedení bakalářské práce, věnovaný čas a cenné rady, jež velmi pomohly při zpracovávání této práce. Dále chci poděkovat Ing. Tomáši Holečkovi za konzultace při zpracování bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vlivem termické modifikace na tvrdost a změnu barvy u dřeva břízy. Práce zahrnuje přehled problematiky, popis a výsledky praktického měření. Teoretická část se zabývá dřevem břízy (*Betula pendula* Roth.), termickou modifikací, metodikou potřebnou k měření a vyhodnocování hustoty, tvrdosti a barvy. Veškeré vlastnosti jsou v praktické části hodnoceny jak u neupraveného, tak u termicky upraveného dřeva při teplotách 160 °C–200 °C, které zapříčiňují chemické změny ve dřevě, vedoucí ke změně pozorovaných vlastností. U tvrdosti dochází k největším rozdílům při úpravě na teplotní stupně do 180 °C při vystavení dřeva břízy vyšší teplotě, není změna tvrdosti tak výrazná. U barvy nelze, vzhledem k subjektivnímu vnímání, určit, zda došlo k jejímu zlepšení, či zhoršení vlivem úpravy. Lze ovšem konstatovat konstantní tmavnutí s ohledem na zvyšující se teplotu. Vlastnosti jsou porovnány i mezi jednotlivými stupni úprav pro určení statisticky významných rozdílů a pro určení trendů.

## **Klíčová slova**

Termická úprava, změna barvy, Brinellova tvrdost, bříza bělokorá, thermowood

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the influence of thermal modification on hardness and color change in birch wood. The thesis includes an overview of the issue, description and results of practical measurement. The theoretical part deals with birch wood (*Betula pendula* Roth.), thermal modification, methodology needed to measure and evaluate density, hardness and color. All properties in the practical part are evaluated for both untreated and heat treated wood at temperatures of 160 °C – 200 °C, which cause chemical changes in wood, leading to a change in observed properties. For hardness, there are the biggest differences in treatment to lower grades. When birch wood is exposed to heat treatment at temperatures above 190 °C, the change in hardness is not so pronounced. Due to subjective perception cannot be determined, if color has been improved or deteriorated owing to treatment. However, a constant darkening with respect to increasing temperature can be observed. The properties are also compared between the adjustment stages to determine statistically significant differences and to determine trends.

## **Keywords**

Heat treatment, color change, Brinell hardness, Birch, thermowood

## Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>2</b>
<b>3. ROZBOR PROBLEMATIKY</b> .....	<b>3</b>
3.1. BŘÍZA BĚLOKORÁ-BETULA PENDULA ROTH. ....	3
3.1.1. Stavba dřeva .....	5
3.1.2. Využití dřeva břízy .....	6
3.2. HODNOCENÉ MECHANICKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI DŘEVA .....	7
3.2.1. Vlhkost dřeva .....	7
3.2.2. Hustota .....	8
3.2.2.1. Zjišťování hustoty .....	11
3.2.3. Tvrdost .....	13
3.2.3.1. Statická tvrdost .....	15
3.2.3.2. Dynamická tvrdost .....	17
3.2.4. Barva .....	18
3.2.4.1. Soustava CIE (RGB) .....	19
3.2.4.2. Soustava CIELAB .....	20
3.3. TERMICKÁ MODIFIKACE .....	22
3.3.1. ThermoWood .....	24
3.3.1.1. Třídy ThermoWood .....	25
3.3.2. Další metody termické úpravy .....	26
<b>4. METODIKA</b> .....	<b>28</b>
4.1. PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	28
4.2. TERMICKÁ ÚPRAVA .....	28
4.3. KLIMATIZOVÁNÍ .....	29
4.4. STANOVENÍ HUSTOTY .....	29
4.5. STANOVENÍ TVRDOSTI PODLE BRINELLA .....	29
4.6. MĚŘENÍ BARVY .....	30
<b>5. VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>31</b>
5.1. HUSTOTA .....	33
5.2. TVRDOST .....	35
5.3. BARVA .....	38
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	<b>41</b>
<b>7. POUŽITÉ ZDROJE</b> .....	<b>43</b>
<b>8. PŘÍLOHY</b> .....	<b>47</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Nomogram pro stanovení hustoty dřeva při různé vlhkosti (Požgaj, 1993) .....	13
Obrázek 2 Tvrdost podle Brinella ( <i>Hanyko Praha: Brinellova tvrdost</i> [online]. 2016 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <a href="https://www.hanyko-praha.cz/wp-content/uploads/2016/06/Vtisk.gif">https://www.hanyko-praha.cz/wp-content/uploads/2016/06/Vtisk.gif</a> ).....	16
Obrázek 3 Barevné spektrum (Hvězdárna plzeň: Barevné spektrum [online]. 2015 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <a href="http://www.hvezdarnaplzen.cz/2015/06/19/proc-nevidime-zadne-zelene-hvezdy/">http://www.hvezdarnaplzen.cz/2015/06/19/proc-nevidime-zadne-zelene-hvezdy/</a> ).....	18
Obrázek 4 Kolorimetrický trojúhelník CIE (Požgaj, 1993) .....	19
Obrázek 5 Kolorimetrické soustavy (Kolorimetrický trojúhelník [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <a href="http://www.fotoroman.cz/glossary/glossary_images/lab.jpg">http://www.fotoroman.cz/glossary/glossary_images/lab.jpg</a> ) .....	21
Obrázek 6 Zobrazení barev v prostoru CIELAB (Soustava CIELAB [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <a href="http://www.fotoroman.cz/glossary/glossary_images/lab2.jpg">http://www.fotoroman.cz/glossary/glossary_images/lab2.jpg</a> ) .....	21
Obrázek 7 Fáze procesu termické úpravy (Thermowood Handbook, 2003).....	23
Obrázek 8 Barva březového dřeva v závislosti na stupni úpravy. (Borůvka et al.,2019) .....	38

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Třídy přirozené trvanlivosti vybraných dřevin. (ČSN EN 350).....	4
Tabulka 2 Rozdělení tříd trvanlivosti (ČSN EN 350).....	4
Tabulka 3 Chemické složení dřeva (Blažej, 1975) .....	10
Tabulka 4 Tvrdosti vybraných dřevin (Matovič, 1993) .....	15
Tabulka 5 Základní statistické údaje pro vybrané vlastnosti. ....	32
Tabulka 6 Procentuální změny všech parametrů.....	32
Tabulka 7 Porovnání hustoty u neupraveného a upraveného dřeva .....	33
Tabulka 8 Duncanův test pro změnu hustoty .....	35
Tabulka 9 Porovnání tvrdosti u neupraveného a upraveného dřeva .....	36
Tabulka 10 Duncanův test pro změnu tvrdosti .....	37
Tabulka 11 Porovnání barevné změny mezi neupraveným a upraveným dřevem. ....	39
Tabulka 12 Duncanův test pro změnu barevnosti .....	40

## Seznam grafů

Graf 1 Vliv termické úpravy na hustotu.....	33
Graf 2 Vliv termické úpravy na tvrdost .....	36
Graf 3 Závislost hustoty a tvrdosti po úpravě .....	37
Graf 4 Vliv termické úpravy na barvu .....	39



## 1. Úvod

V dnešní době je dřevo jakýmsi znovu objeveným materiálem. Vzhledem k důrazu moderní společnosti na ekologii a hledání způsobu využití obnovitelných zdrojů, má využití dřeva perspektivu i v oblastech, kde bylo historicky nahrazeno jinými materiály, ale také v oblastech lidského působení, kde dosud k masivnímu využití tohoto materiálu nedocházelo. V nejjednodušší formě je dřevo stále ve velké míře využíváno jako palivo, ovšem má nespočetně dalších, cennějších způsobů využití. Lepšímu zúročení ovšem často brání některé negativní vlastnosti, jako například anizotropie, hygroskopicitu spojená s rozměrovou stabilitou, náchylnost na poškození biotickými činiteli nebo hořlavost. K potlačení těchto negativních vlastností je dřevo upravováno různými způsoby. V případě masivního dřeva jsou využívány úpravy konstrukční, chemické, či různé způsoby modifikací. Působení tepla na dřevo, za účelem vylepšení některých vlastností je proces známý již mnoho století. V dnešní době ovšem úprava neprobíhá opalováním materiálu, ale za působení tepla v přesně specifikovaných podmínkách doby úpravy, vlhkosti, teploty a dalších. Vlivem tepla se mění chemická struktura dřeva, což má vliv na mnoho vlastností.

Bříza bělokorá je v našich podmínkách vzhledem k nízké odolnosti této dřeviny vůči biotickým činitelům a častým růstovým vadám nejčastěji zpracovávána na palivové dřevo. Termická úprava je ekologický a energeticky relativně nenáročný proces, který má předpoklad zlepšit mnohé mechanické vlastnosti a vytvořit tak z málo ceněného materiálu, materiál s výhodnými vlastnostmi pro určitá použití. Cílem práce je zjistit, jakým způsobem může být dřevo břízy ovlivněno za použití termické úpravy. Zda a jakým způsobem se mění především hustota, tvrdost a barva, v závislosti na velikosti působící teploty, a jak znalost těchto změn může ovlivnit využitelnost tohoto materiálu.

## 2. Cíle práce

Tato práce má za hlavní cíl zhodnotit změny barvy a tvrdosti u vzorků břízy bělokoré (*Betula pendula* Roth.). Cílem je vyhodnotit změny barevnosti a tvrdosti mezi referenčními, neupravenými vzorky a jednotlivými stupni tepelných úprav na 160 °C, 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C. Následně porovnat změny vlastností mezi konkrétními stupni tepelných úprav a statisticky zhodnotit, v kterých případech lze uvažovat o statisticky významných rozdílech vlastností mezi jednotlivými stupni. Dalším hlavním cílem práce je zhodnotit a okomentovat závislosti změněné tvrdosti na hustotě termicky modifikovaného dřeva. Všechny tyto závislosti a naměřené hodnoty porovnat s literaturou.

K vedlejším cílům patří zhodnocení změny hustoty a rozměrů vlivem termické úpravy na různé tepelné stupně. Dále pak popis procesu termické modifikace dřeva a její využití zejména s ohledem na zkoumané parametry, tj. změny barvy, tvrdosti a hustoty.

### 3. Rozbor problematiky

V této kapitole jsou popsány veškeré potřebné informace potřebné pro pochopení problematiky spojené s touto prací. Rozbor problematiky obsahuje potřebný podklad pro praktický výzkum, popis materiálu, fyzikálně-mechanických vlastností i procesu úpravy.

#### 3.1. Bříza bělokorá-Betula pendula Roth.

Druh *Betula pendula* Roth (bříza bělokorá) patří do rodu *Betula* L. (bříza), její podčeď *Betuloideae* Arnott, čeď *Betulaceae* S. F. Gray (břizovité), řád *Fagales* Engler (bukotvaré), třída *Rosopsida* Batsch (vyšší dvouděložné rostliny), oddělení *Magnoliophyta* Cronquist, Takht. & W.Zimm. (rostliny krytosemenné), říše *Plantae* Haeckel (rostliny), nadříše *Bikonta*, *Corticata*, *Archaeplastida*, doména *Eukaryota* Whittaker & Margulis, 1978 (jaderní), soustava *Vitae* (živé organismy). (Zařazení v systému, BioLib)

Bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth), či také bříza bílá nebo bříza bradavičnatá je opadavá listnatá dřevina. Jedná se o nejrozšířenější druh břízy v Evropě. Je to středně velký strom s bílým kmenem, v mládí rovným, později zprohýbaným a vejcovitou, řídkou, nepravidelně utvářenou korunou. Ve stáří se na bázi kmene vytváří hrubě rozpukaná černá borka. Maximální výška je až 30 m, s průměrem kmene přes 75 cm. Bříza bělokorá je krátkověká dřevina. V ideálních podmínkách se dožívá max. 100-150 let. Pokud roste strom na nevhodném stanovišti, může se délka jeho dožití zkrátit klidně pod 80 let. (Úradníček, 2001)

**Odolnost dřeva** se hodnotí v závislosti na prostředí, ve kterém se dřevina vyskytuje a hodnotí se odolnost proti napadení houbami, dřevokazným hmyzem, termity a mořskými škůdci (v našich podmínkách se nevyskytují). Pro dřevo břízy platí, že je jeho odolnost velice nízká, řadí se do netrvanlivých dřevin, viz Tabulky (tab.1,2). Tento fakt je třeba brát v potaz při jeho využití.

Tabulka 1 Třídy přirozené trvanlivosti vybraných dřevin. (ČSN EN 350)

Dřevina		Třída odolnosti podle EN 350-1, 2	Pravděpodobná trvanlivost v třídě ohrožení 4 (EN 335-1, 2) [rok]
český název	botanický název		
Akát bílý	Robinia pseudopapacia	2 <sup>x)</sup>	15 ÷ 25 <sup>x)</sup>
Buk lesní	Fagus sylvatica	5	2 ÷ 6
Bříza obecná	Betula pendula	5	2 ÷ 6
Dub letní ÷ zimní	Quercus robur	2 <sup>x)</sup>	15 ÷ 25 <sup>x)</sup>
Habr obecný	Carpinus betulus	5	2 ÷ 6
Jasan ztepilý	Fraxinus excelsior	5	2 ÷ 6
Jilm polní	Ulmus carpinifolia	4	6 ÷ 10
Olše šedá	Alnus glutinosa	5	2 ÷ 6
Ořešák vlašský	Juglans regia	3 <sup>x)</sup>	10 ÷ 15 <sup>x)</sup>
Teak	Tectona grandis	1 ÷ 3	více než 10

Pozn.: <sup>x)</sup> Údaje platí pro jádrové dřevo; bělové dřevo je klasifikováno třídou odolnosti 5 (trvanlivost menší než 6 let).

Tabulka 2 Rozdělení tříd trvanlivosti (ČSN EN 350)

Třída odolnosti podle EN 350-1, 2		Průměrný hmotnostní úbytek zkušebních těles zjištěný zkouškou podle ENV 807 [%]		
číselné ozn.	slovní vyjádření	vyjádřený jako násobek úbytku referenčních těles x <sup>x)</sup>	při úbytku referenčních těles	
			33 [%] (buk)	24 [%] (borovice)
1	velmi trvanlivé	méně než 0,10 x	< 3,3	< 2,4
2	trvanlivé	0,10 x ÷ 0,20 x	(3,3 ÷ 6,6)	(2,4 ÷ 4,8)
3	středně trvanlivé	0,20 x ÷ 0,50 x	(6,6 ÷ 16,5)	(4,8 ÷ 12,0)
4	málo trvanlivé	0,50 x ÷ 0,80 x	(16,5 ÷ 26,4)	(12,0 ÷ 19,2)
5	netrvanlivé	více než 0,80 x	> 26,4	> 19,2 %

Pozn.: <sup>x)</sup> x = průměrný hmotnostní úbytek referenčních těles při konkrétní zkoušce

## Výskyt

Díky své odolnosti a nenáročnosti na podmínky se vyskytuje v širokém rozsahu klimatických pásů, je téměř lhostejná k projevům klimatu. Jedná se o silně světlomilnou a pionýrskou dřevinu. Jedinci tohoto druhu se často vyskytují na holých plochách ve značné vzdálenosti od mateřského stromu. Díky své malé náročnosti na

podloží se jedinci vyskytují zřejmě na všech typech, a to i na terénech velmi špatně dostupných s minimální zásobou živin. Roste často v písčítých půdách. Nejvíce ovšem prosperuje na kyselých horninách. Přirozeně je zastoupena v kyselých doubravách, písčinných borech a na silikátových skalách. Druhotný výskyt je často na místech zásahu člověka, například na pasekách, haldách, výsypkách a ladem ležících půdách. V České republice nalezneme břízu zastoupenou na celém území.

Zástupce druhu lze pozorovat od Jižní Evropy, kde musí dřeviny snášet vysoké teploty a často písčitou a na živiny chudou půdu, až po Skandinávii, kde naopak musí vydržet velmi nízké teploty a méně slunečního svitu.

Podle Mezinárodního svazu ochrany přírody (IUCN) je bříza bělokorá zařazena do skupiny málo dotčených druhů LC (Least concern). Není tedy žádná nebo jen velmi malá obava z vyhynutí.

### **Zastoupení dřeviny břízy v ČR**

V roce 2017 byla v ČR celková zalesněná plocha 2 671 659 ha, z toho 98,8 % bez holiny. Celková výměra lesních pozemků bez holiny tedy činila 2 571 749 ha. Z této plochy zaujímal porost břízy 71 783 ha, což činí po mnoho let stabilní procentuální zastoupení 2,8 %. Přirozená a v případě břízy i doporučená skladba lesů, která představuje ekologicky a ekonomicky optimalizované zastoupení dřeviny a zaručuje plnění produkčních a mimoprodukčních funkcí lesa je v Česku je podle ministerstva zemědělství 0,8 % , což činí plochu 20574 ha. Krátkověkost břízy se projevuje na datech o středním plošném věku dřevin, kde je bříza se středním věkem 48 let jednoznačně nejmladší dřevinou. (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2017)

#### **3.1.1. Stavba dřeva**

Dřevo břízy se vyznačuje roztroušeně pórovitou stavbou, tudíž póry nejsou v žádné ploše viditelné okem. Barva bývá nejčastěji bělavá, případně se světle žlutým zabarvením. Jedná se o běloušou dřevinu nevytvářející jádro. Při nevhodných

podmínkách se může vyskytnout pouze jádro nepravé, které je pro zužitkování materiálu velmi nežádoucí. Pro dřevo břízy jsou charakteristické relativně tmavé dřevné skvrny a dřevné paprsky viditelné pouze na radiální ploše. Až na výjimky, kterou je například takzvaná karelská bříza, má dřevo velmi nevýraznou texturu. Díky tomu nebývala často vyhledávána pro dekorační účely, ale spíše pro mechanické vlastnosti, které jsou poměrně dobré a nabízejí široké možnosti využití. Z hlediska tvrdosti se řadí mezi polotvrdé dřeviny. (Zeidler, 2016, Reisner 2010)

### **3.1.2. Využití dřeva břízy**

V první řadě bylo březové dřevo zdrojem energie. Dále, vzhledem k velmi dobré dostupnosti březového dřeva, bylo od pradávna využíváno k výrobě téměř veškerých předmětů, bez ohledu na jeho dobré a špatné vlastnosti. Bříza sloužila k výrobě vozů, násad, dalšího zemědělského nářadí i předmětů pro běžné denní použití. Nevýhodou byla velmi nízká odolnost neošetřeného dřeva vůči dřevokaznému hmyzu a houbám. Využívána bylo především pro dostatek dostupného materiálu, který nebyl dostatečně vhodný například na nosné prvky. (Reisner, 2010)

Dřevo břízy má v dnešní době využití v mnoha oblastech. Slabší dimenze a zbytky po dělení dřeva slouží stále velmi často jako energetický zdroj, nebo jsou využívány v celulózkách pro následnou výrobu papíru, či vláknitých desek. Další možností je zpracování štěpek a třísek pro velkoplošné materiály. V silnějších dimenzích je dřevo vhodné a často využívané pro výrobu konstrukčních, loupaných dýh, které jsou díky dobrým ohybovým vlastnostem využívány především ve středové vrstvě překližek. (Musil, 2005)

Dlouhou dobu byla bříza opomíjená při dekorativním použití. Pro okrasné účely se používaly dřeviny s výraznější texturou a barvou. Změna nastala zhruba v 80. letech minulého století. Bříza našla uplatnění i jako materiál pro okrasné dýhy, především díky nábytkářské firmě IKEA, která začala vyrábět světlý nábytek s nevýraznou texturou dřeva a tímto jednoduchým dizajnem udala trend v nábytkářství. (Reisner, 2010)

## 3.2. Hodnocené mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva

### 3.2.1. Vlhkost dřeva

Dřevo jako materiál má vlastnost vázat v sobě vodu, a to jak v podobě plynné, tak kapalné. Rozlišuje se, zda je voda vázaná chemicky na molekulární úrovni, či jde o vodu vázanou, tzv. hygroskopickou, na buněčné úrovni, nebo o vodu volnou v kapalném skupenství, která vyplňuje mezibuněčné prostory. Hmotnost vody vázané na molekulární úrovni tvoří 1-2 % z celkové hmotnosti dřeva. Při počítání hmotnosti absolutně suchého dřeva se molekulární vlhkost nebere v potaz, neboť její eliminování ze dřeva je možné pouze jeho spálením. (Gandelová, 2009)

Právě množství vody obsažené ve dřevě, se nazývá vlhkostí dřeva. Je to jedna z důležitých charakteristik, neboť množství vody značně ovlivňuje mechanické i fyzikální vlastnosti. Zjednodušeně lze říci, že vysoká vlhkost nepůsobí dobře na většinu mechanických vlastností a zároveň činí surovinu náchylnější k napadení dřevokaznými houbami, plísněmi a hmyzem. Vlhkost ovlivňuje kromě vlastností i technologické procesy při úpravě dřeva a je v každém případě třeba brát na ni ohled, ať už z důvodů změny rozměrů způsobených sesycháním a bobtnáním, tak i z důvodu mechanických a fyzikálních změn, které můžou procesy ovlivňovat negativním i pozitivním směrem.

Pro potřeby výpočtů se rozlišují dva typy vlhkosti, a to absolutní a relativní, které se liší tím, k čemu se vztahuje hmotnost vody.

Absolutní vlhkost dává do poměru hmotnost vody obsažené ve dřevě k hmotnosti absolutně suchého dřeva. Absolutní vlhkost slouží nejčastěji pro vyjádření fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Dána je vztahem:

$$W_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad [\%]$$

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva [kg]

$m_0$  – hmotnost absolutně suchého dřeva [kg].

Relativní vlhkost se vypočte podílem hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva. Vyjádřena je vztahem:

$$W_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} * 100 \quad [\%]$$

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva [kg]

$m_0$  – hmotnost absolutně suchého dřeva [kg].

### ***Mez hygroskopicity a mez nasycení buněčných stěn***

Mezí hygroskopicity se rozumí rovnovážná vlhkost, které dřevo dosáhne při dostatečně dlouhé expozici ve vzduchu, jehož stav je blízký nasycení (relativní vlhkost vzduchu = 0,995 %). Oproti tomu mez nasycení buněčných stěn (MNBS) je chápána jako maximální vlhkost buněčných stěn dosažena při kontaktu s kapalnou vodou. (Požgaj, 1993)

### **3.2.2. Hustota**

Hustota je všeobecně definovaná jako podíl hmotnosti a objemu. Zpravidla se vyjadřuje v jednotkách  $\text{kg.m}^{-3}$ , nebo  $\text{g.cm}^{-3}$ . U dřeva se jedná o jeden z nejdůležitějších znaků, který má velký vliv na mechanické vlastnosti dřeva. Právě hustota je často rozhodujícím faktorem při výběru vhodného materiálu.

Jelikož je hmotnost, a tudíž i váha dřeva závislá na vlhkosti, porovnává se hustota, stejně jako další fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, v absolutně suchém stavu  $w_{abs}=0$  %, při vlhkosti  $w_{abs}=12$  % a ve stavu vlhkého dřeva kdy  $w_{abs}>0$  %. Absolutní 12% vlhkost je pro zkoumání vlastností dřeva velmi důležitá. Bývá uváděna v normách. Vlhkosti 12% dřevo dosáhne vystavením podmínkám temperované místnosti (teplota vzduchu- $t=20$  °C, relativní vlhkost vzduchu- $\phi=65$  %)

Podle hustoty suchého dřeva se dělí následovně:

- Velmi lehké (do  $400 \text{ kg.m}^{-3}$ ) - topol
- Lehké dřevo ( $400\text{-}500 \text{ kg.m}^{-3}$ ) – smrk, jedle, borovice, lípa
- Mírně těžké ( $500\text{-}600 \text{ kg.m}^{-3}$ ) – vrba, javor
- Středně těžké ( $600\text{-}700 \text{ kg.m}^{-3}$ ) – bříza, ořech, jilm, jasan, dub, buk
- Těžké ( $700 \text{ kg.m}^{-3}$  a více) – habr, akát (Čunderlík, 2009)

V souvislosti se dřevem se rozlišují tři veličiny – hustota dřeva, hustota dřevní substance, redukovaná hustota dřeva. (Gandelová, 2009)



### **Hustota dřeva**

Jak již bylo zmíněno, rozlišuje se hustota dřeva ve třech stavech. Hustota dřeva v absolutně suchém stavu  $\rho_0$  se používá v teoretických výpočtech a je vhodná k porovnávání různých materiálů. Pro měření hustoty v suchém stavu je třeba nejdříve vysušit zkoumané vzorky. Sušení probíhá zpravidla dle normy při teplotě  $102 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hustota je dána vztahem:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$\rho_0$  – hustota dřeva v absolutně suchém stavu  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

$m_0$ - hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu  $[\text{kg}]$

$V_0$ - objem dřeva v absolutně suchém stavu  $[\text{m}^3]$ .

Nejobecnějším vyjádřením hustoty dřeva je **hustota vlhkého dřeva**  $\rho_w$ , neboť je to stav, který se vyskytuje s nejvyšší četností. Dán je vztahem:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$\rho_w$ - hustota vlhkého dřeva  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

$m_w$ - hmotnost vlhkého dřeva  $[\text{kg}]$

$V_w$ - objem vlhkého dřeva  $[\text{m}^3]$ .

Speciálním stavem je dřevo o absolutní vlhkosti  $w_{\text{abs}} = 12\%$ , hustota  $\rho_{12}$  se využívá ve výpočtech a je uvedena v normách.

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$\rho_{12}$  – hustota dřeva při  $w_{\text{abs}} = 12 \%$   $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

$m_{12}$  – hmotnost dřeva při  $w_{\text{abs}} = 12 \%$   $[\text{kg}]$

$V_{12}$  - objem dřeva při  $w_{\text{abs}} = 12 \%$   $[\text{m}^3]$ .

### ***Hustota dřevní substance***

Pod pojmem dřevní substance se rozumí hmota buněčných stěn bez mezibuněčných prostorů a submikroskopických dutin. Hustota dřevní substance  $\rho_s$  je vyjádřena jako poměr hmotnosti dřevní substance a příslušného objemu dřevní substance. Hustota dřevní substance  $\rho_s$  je větší než  $\rho_0$ , právě díky absenci mikrokapilár a mezibuněčných prostorů vyplněných vzduchem.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$\rho_s$  - hustota dřevní substance [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$m_s$  - hmotnost dřevní substance [ $kg$ ]

$V_s$  - objem dřevní substance [ $m^3$ ].

(Matovič, 1993)

Hustota dřevní substance se v závislosti na druhu dřeviny liší jen minimálně, vzhledem k procentuálně téměř neměnnému chemickému složení dřevin.

*Tabulka 3 Chemické složení dřeva (Blažej, 1975)*

	<b>Smrk (%)</b>	<b>Borovice (%)</b>	<b>Buk (%)</b>
<b>Celulóza</b>	<b>45,6</b>	<b>43,2</b>	<b>39,2</b>
<b>Hemicelulózy</b>	<b>27,6</b>	<b>28,0</b>	<b>35,3</b>
<b>Lignin</b>	<b>26,9</b>	<b>26,6</b>	<b>20,9</b>

Její velikost se pohybuje v rozmezí 1460–1570  $kg \cdot m^{-3}$ , když průměrné hustoty jednotlivých základních stavebních elementů dřeva jsou: celulóza (1555  $kg \cdot m^{-3}$ ), hemicelulózy (1500  $kg \cdot m^{-3}$ ) a lignin (1390  $kg \cdot m^{-3}$ ). (Gandelová, 2009)

### ***Redukovaná hustota***

Redukovaná hustota dřeva je vyjádřena podílem hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu a jeho objemem při určité vlhkosti. Vyjadřuje tedy kolik váhy suchého dřeva je v objemu vlhkého dřeva.

$$\rho_{rw} = \frac{m_0}{V_w} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$\rho_{rw}$  – redukovaná hustota dřeva [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$m_0$  – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu [kg]

$V_w$  – objem vlhkého dřeva [ $m^3$ ].

Redukovaná hustota čerstvého dřeva, či také hustota konvenční, nabývá na významu především v odběratelsko-pěstitelských vztazích. Při pěstování, těžbě a následném prodeji kulatiny se počítá s dřevem čerstvým, tudíž vlhkostí  $w_{abs} \geq$  mez hygroskopicity. Dána je poměrem hmotnosti suchého dřeva v maximálním objemu.

$$\rho_k = \rho_{rč} = \frac{m_0}{V_{max}} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$\rho_k$  - konvenční hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$\rho_{rč}$  - hustota dřeva v čerstvém stavu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$V_{max}$  - maximální objem dřeva [ $m^3$ ].

### 3.2.2.1. Zjišťování hustoty

Pro zjištění hustoty dřeva, redukované hustoty nebo hustoty dřeva v čerstvém stavu je známo několik způsobů, které se navzájem liší tvary zkoumaných vzorků, způsoby zjišťování dřeva a způsoby měření objemu.

Podle Matoviče (1993) jsou obvykle používané typy vzorků pro určení hustoty dřeva, redukované a dřeva v čerstvém stavu:

1. Průřezové kotouče nebo jejich radiální sekce.
2. Normované vzorky pro stereometrická měření podle normy (ČSN 49 0108).
3. Vývrty nebo jejich části.
4. Nepravidelné vzorky dřeva.

Pro výzkumné účely se zpravidla využívá normovaná metoda, podle normy ČSN 49 0108. V této normě se udává, jakým způsobem měřit hmotnost a objem při dané vlhkosti. Norma uvádí postupy výpočtu hustoty pro vlhké dřevo, dřevo absolutně suché a o absolutní vlhkosti 12 %, stejně tak i konvenční hustotu. Vzorce

pro jednotlivé výpočty jsou již uvedeny výše. Zkoumané vzorky jsou dle normy zkušební tělesa ve tvaru pravoúhlých hranolů se základnou 20x20 mm a délkou ve směru vláken  $25 \pm 5$  mm.

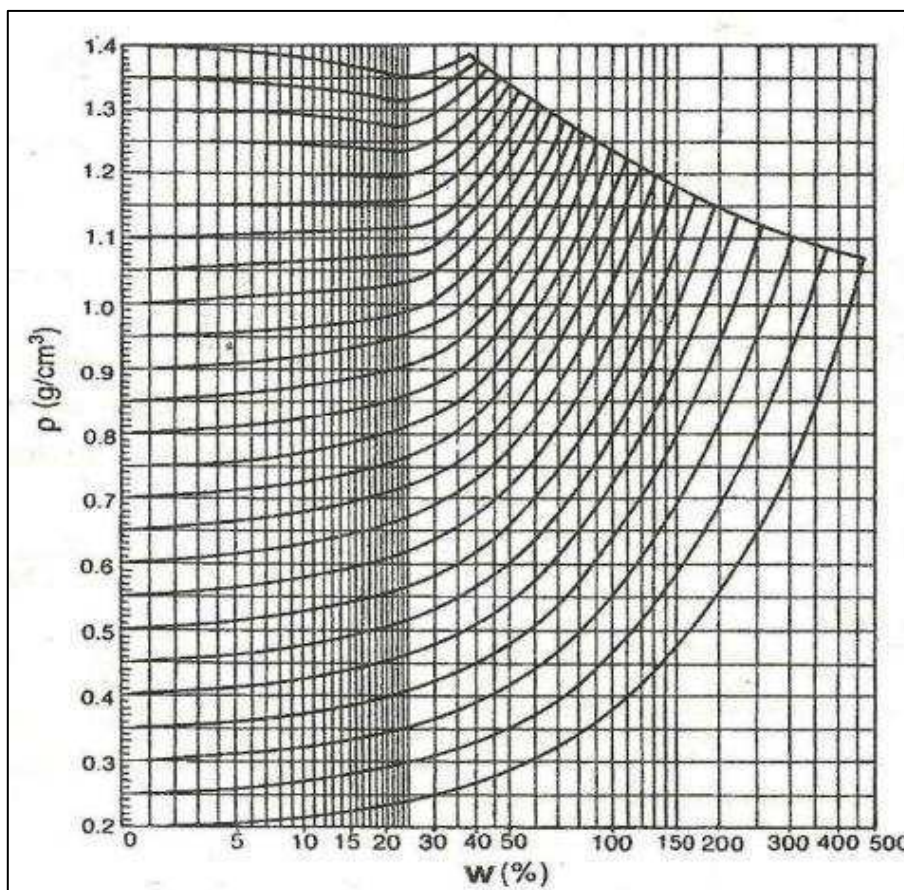
Hmotnost vzorku se zjišťuje vážením (dnes již na velmi přesných digitálních vahách v případě malých laboratorních vzorků). Pro zjištění váhy absolutně suchého dřeva musí nejprve dojít k vysušení vzorku. To probíhá při teplotě  $102 \pm 3^\circ\text{C}$ . Zda je vzorek vysušen se zjistí opakovaným vážením a porovnáním navážených hodnot. Z rozdílů hmotnosti před a po sušení se zjistí i vlhkosti vzorku. (Matovič, 1993)

Objem vzorku lze zjišťovat různými způsoby, zejména s ohledem na tvar a vlhkost zkoumaného vzorku. Při měření normovaných vzorků (dle ČSN 49 0108) se používá nejčastěji stereometrický způsob měření, tzn. pomocí posuvného měřítka nebo mikrometru. U nepravidelných vzorků se pro určení objemu volí jedna z možných metod, založených na aplikaci Archimedova zákona. Jedná se o vytlačování vody, ponořovací metodu, vytlačování rtuti a měření rtuťovými objemometry nebo jinými xyloměry. Při zjišťování objemu absolutně suchých vzorků je vhodná metoda vytlačování rtuti, neboť dřevo rtuť neabsorbuje. (Matovič, 1993)

Pro zjišťování objemu dřeva s vlhkostí nad mezí hygroskopicity je naopak vhodné volit metodu ponoření do vody. Při absorpci vody do tělesa, jehož vlhkost je vyšší, než mez hygroskopicity již nedochází k objemovým změnám.

Jednou z nejrychlejších metod, která je ovšem zatížena jistou dávkou nepřesnosti je odečtení hustoty z nomogramu pro stanovení hustoty dřeva při různé vlhkosti (Požgaj, 1993, Kollmann, 1951)

Odečet hustoty je ovšem možný pouze za předpokladu znalosti hustoty dřeva v absolutně suchém stavu a jeho absolutní vlhkosti.



Obrázek 1 Nomogram pro stanovení hustoty dřeva při různé vlhkosti (Požgaj, 1993)

### 3.2.3. Tvrdost

Tvrdost je obecně schopnost materiálu odolávat vnikání cizích těles do struktury materiálu. Čím větší tvrdost má zkoumaný materiál, tím větší odpor proti vniknutí klade. Význam tvrdosti při opracování dřeva je důležitý zejména s ohledem na volbu vhodných obráběcích nástrojů a pro nastavení strojních parametrů. Má smysl zjišťovat tvrdost u operací jako jsou loupání, řezání, hoblování, frézování atd. (Matovič, 1993)

Tvrdost je velmi závislá na druhu dřeva, zkoumané ploše, struktuře, hustotě, vlhkosti, kvalitě dřevních vláken a jejich anatomické stavbě. (Gandelová, 2009)

V praxi se rozlišuje tvrdost statická a dynamická. Liší se od sebe charakterem zkoušení, dobou zatěžování, působenou silou i způsobem vyhodnocování. Tvrdost lze laboratorně velmi přesně měřit, ale může být zjišťována i jen doplňkově a orientačně na makroskopické úrovni, například zkouškou vrypu nehtem nebo zkouškou tužkové metody. Tužková metoda (podle ČSN 67 3075) slouží primárně ke zkoušení tvrdosti náterů. Pro měření se používá sada tužek Hardtmuth Koh-I-Noor 1500 a hodnotí se

kteřá tužka o určité tvrdosti již, za působení stálé síly díky vozíku o dané hmotnosti, způsobila vryp do materiálu.

Podstata statické tvrdosti spočívá v hodnocení plochy, případně úhlopříčky, nebo průměru otlaku ve dřevě způsobeném působením zkušebního tělesa (indentoru) za působení dané síly po určitý čas. Zvlášt' se vyhodnocuje tvrdost čelní, radiální a tangenciální plochy dřeva. Pro dřevo a materiály na bázi dřeva se nejčastěji využívá Brinellova nebo Jankova metoda.

Podle Matoviče (1993) je statická tvrdost na čelních plochách materiálu u listnáčů o 30 % a jehličnanů dokonce o 40 % vyšší než na jejich bočních plochách. U většiny našich dřevin, vyjma dřevin s výraznými a dobře vyvinutými dřevnými paprsky (dub, buk, jilm), je tvrdost radiální a tangenciální plochy téměř identická. U zmíněných dřevin s výraznými dřevnými paprsky je pak tvrdost radiální plochy o 5-10 % vyšší než tvrdost tangenciální, viz tabulka (tab.4).

Na základě zjištěných statických tvrdostí na čelních plochách dřevin, při 12% vlhkosti, se dřeviny dělí do 5 skupin

1. měkká dřeva (tvrdost do 40 MPa) – smrk, borovice, lípa, topol
2. středně tvrdá dřeva (tvrdost 41-80 MPa) – dub, modřín, ořešák, bříza
3. tvrdá dřeva (tvrdost 81-100 MPa) – habr, akát
4. velmi tvrdá dřeva (101-150 MPa) – zimostřáz, šeřík
5. super tvrdá dřeva (nad 150 MPa) – eben, quajak.

Tabulka 4 Tvrdosti vybraných dřevin (Matovič, 1993)

druh dřeva	tvrdost dřeva v MPa na ploše					
	čelní		radiální		tangenciální	
	při vlhkosti dřeva (%)		při vlhkosti dřeva (%)		při vlhkosti dřeva (%)	
	12	30 a více	12	30 a více	12	30 a více
modřín	43,5	20,5	29,0	13,5	29,0	14,0
borovice	28,5	13,5	24,0	11,0	25,0	11,5
jedle	28,0	13,0	17,0	8,0	-	-
smrk	26,0	12,0	18,0	8,5	18,0	8,5
limba	22,0	10,5	-	-	-	-
akát	97,0	57,7	68,0	40,5	78,0	46,5
habr	90,5	54,0	77,0	45,5	78,5	47,0
jasan	80,0	48,0	59,0	35,0	67,0	39,5
hruška	79,0	47,0	59,5	35,0	60,5	36,0
javor						
klen	76,0	45,0	55,5	33,0	59,0	35,0
dub	67,5	40,0	56,0	33,5	49,0	29,0
buk	61,0	36,5	43,5	25,5	44,5	26,5
jilm vas	56,0	33,5	42,5	25,5	42,5	25,0
bříza	46,5	27,5	37,0	22,0	33,0	19,5
olše	40,0	24,0	27,5	16,0	28,0	17,0
osika	26,5	15,5	19,0	11,5	20,5	12,0
topol	26,5	15,5	18,5	11,5	-	-
lípa	26,0	15,5	17,5	10,0	18,0	10,5

### 3.2.3.1. Statická tvrdost

Statické zkoušky tvrdosti, také označovány jako zkoušky vnikací, jsou nejčastěji používané pro svoji přesnost, dobrou opakovatelnost měření a relativní jednoduchost. Princip statického zkoušení spočívá ve vtlačování indentoru z materiálu tvrdšího, než zkoušený materiál (nejčastěji ocel, tvrdokov, diamant), do zkoušeného vzorku. Indentor se v závislosti na typu prováděné zkoušky používá ve tvaru koule, polokoule, jehlanu, či kuželu. Tvrdost se určuje buď změřením otačené plochy v závislosti na použité síle (Brinellova metoda), nebo odečtením vynaložené síly na otačení určité plochy (Jankova metoda). Důležitá je doba zatěžování, u kovů se počítá se zatížením po dobu 10–15 s. U měkčích materiálů, například dřeva, doba narůstá na hodnoty zhruba 30–60 s.

Statická tvrdost dřeva je podle Matoviče (1993) nejvíce závislá na jeho hustotě a vlhkosti. S vlhkostí rostoucí do meze hygroscopicity, klesá statická tvrdost. Při nárůstu vlhkosti o 1 % klesá statická tvrdost o 3 %.

### ***Brinellova tvrdost***

Zkouška spočívá ve vtláčování ocelové kuličky o průměru  $D=10$  mm do plochy zkoušeného materiálu. Na kuličku je kolmo k ploše materiálu tlačeno konstantní silou, která je u měkkých dřevin 100 N, u středně tvrdých 500 N a u tvrdých dřevin 1000 N. Hodnota tvrdosti se zjišťuje optickým změřením průměru otláčeniny. Následně se dopočítá plocha otláčeniny a tvrdost se vyjadřuje jako poměr působené síly k velikosti plochy. (Požgaj, 1993)

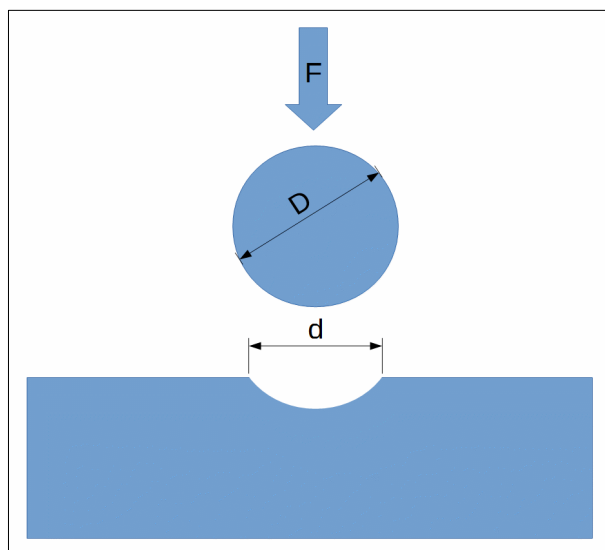
$$H_B = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [MPa]$$

$H_B$  – Brinellova tvrdost [MPa]

$F$  – síla působící na kuličku [N]

$D$  – průměr kuličky [mm]

$d$  – průměr otláčené plochy ve dřevě [mm].



Obrázek 2 Tvrdost podle Brinella (Hanyko Praha, 2016)



### ***Jankova metoda***

V případě Jankovy metody měření tvrdosti se do materiálu vtlačuje polokulička z tvrdokovu o poloměru 5,64 mm. Indentor se zatlačuje do hloubky 5,64 mm, čímž vznikne otláčená plocha 1 cm<sup>2</sup>. Na rozdíl od Brinellovy metody se při zkoušce nehodnotí otláčená plocha, která je pokaždé stejná, nýbrž síla, kterou je třeba vyvinout pro zatlačení polokuličky. Síla se následně přepočítá na tlak v MPa. (Matovič, 1993)

Dle normy ČSN 49 0136 mají zkušební vzorky tvar hranolu o průřezu 50 . 50 mm a délce maximálně 50 mm ve směru vláken. Výpočet tvrdosti podle Jankovy metody:

$$H_J = \frac{F}{S} \quad [MPa]$$

$H_J$  – Jankova tvrdost [MPa]

F – síla potřebná k zatlačení polokuličky [N]

S – otláčená plocha [100 mm<sup>2</sup>]

#### ***3.2.3.2. Dynamická tvrdost***

Dynamická tvrdost dřeva se určuje z otisku, který na ploše zanechala po dopadu kulička o průměru 25 mm padající z určité, normou stanovené výšky. Čím je dřevo měkčí, tím je větší otisk. Dynamická tvrdost se stanovuje převážně v radiální a tangenciální ploše. (Matovič, 1993)

Dle normy ČSN 490137 jsou zkušební tělesa hranoly o průřezu 20x20 mm, s délkou podél vláken 150 mm. Výpočet tvrdosti probíhá dle vzorce:

$$H_{wy} = \frac{4 \cdot A}{\pi \cdot d_1 \cdot d_2} \quad [J \cdot cm^{-2}]$$

A – spotřebovaná práce [J],  $A = m \cdot g \cdot h$

m – hmotnost ocelové kuličky [kg]

h – výška pádu kuličky [m]

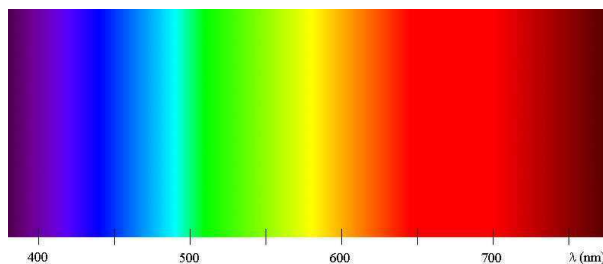
g – gravitační zrychlení,  $g = 9,80665 [m \cdot s^{-2}]$

$d_1, d_2$  – rozměry otláčku napříč a ve směru vláken [cm]

Dochází ke změnám dynamické tvrdosti v závislosti na vlhkosti. Při růstu vlhkosti do meze hygroskopicity klesá s každým procentem vlhkosti dynamická tvrdost o dvě procenta. Dynamická tvrdost břízy je dle Matoviče (1993) při  $w=12\%$   $= 0,80 \text{ J.cm}^{-2}$  a při vlhkosti nad mezí hygroskopicity  $= 0,67 \text{ J.cm}^{-2}$ .

### 3.2.4. Barva

Barva je charakterizována jako zřetelný vjem, které má lidské oko při pozorování předmětů. Různému zbarvení předmětů dochází pohlcováním a odražením různého vlnového spektra dopadajícího světelného záření, kdy světlo je definováno jako okem viditelné záření (vlnová délka: 380-780 nm). Vzhledem k individuálnosti vnímání barev, ovlivněného mnoha faktory, lze bez exaktního měření velmi obtížně porovnávat různé odstíny. Měřením barevnosti se zabývá obor kolorimetrie, který na základě 3 zkoumaných parametrů jednoznačně specifikuje danou barvu. (Šlezingerová, 2005)



Obrázek 3 Barevné spektrum (Hvězdárna Plzeň, 2015)

**Barva dřeva** je jednou z nejpodstatnějších charakteristik, při výběru vhodného dřeva pro dekorativní účely, například pro nábytek, hudební nástroje nebo obklady. Společně s leskem a texturou nejvíce určuje celkový vzhled.

Nejvíce barvu ovlivňuje chemické složení dřeva. Není tak závislá na hmotnostním nebo objemovém zastoupením jednotlivých látek ve dřevě, jako spíše na jejich výraznosti. Například celulóza se svou bílou barvou a vysokým procentuálním podílem ve dřevě je často překryta zbarvením ligninu a extraktivních látek. (Požgaj, 1993)

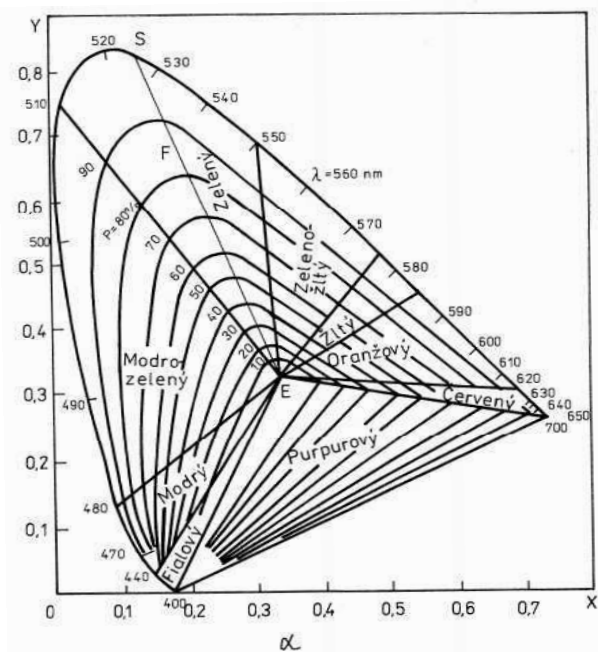
Barva dřeva tedy závisí nejvíce na obsahu a typu barviv, tříslovin, pryskyřic a produktů jejich oxidování, uložených v buněčných dutinách nebo buněčných

stěnách. Zabarvení je ve značné míře závislé na klimatických podmínkách. V našem mírném podnebném pásmu se vyskytují převážně světle zbarvené dřeviny a například v tropech se vyskytují dřeviny s mnohem větší variabilitou zabarvení. (Matovič, 1993)

Intenzita zabarvení není konstantní po celou dobu růstu, zpravidla s věkem roste. Dále může být během života stromu ovlivněna například hnilobnými procesy. Mimo živé stromy postihuje změna barvy působením vnějších podmínek i dřevo pokácené. Krom zmíněné hniloby se dřevo zbarvuje vlivem chemických a fyzikálních procesů, například během zpracování, dopravy nebo ochrany dřeva (černání dubu při kontaktu se solemi železa, oranžovění dřeva břízy atd.). Ke změně barvy dochází také v důsledku technologických procesů (paření, moření a povrchové úpravy dřeva) (Gandelová, 2009)

### 3.2.4.1. Soustava CIE (RGB)

Pro určení barvy dřeva se využívá více možných metod zobrazujících barevné spektrum. Jednou z nich je trichromatická soustava CIE (Mezinárodní komise pro osvětlení). Soustava funguje za předpokladu, že kombinací tří základních barev, červené (R), zelené (G), modré (B), lze docílit vjemu jakékoliv barvy. Každá z daných složek se popisuje funkcí, která vyjadřuje podíl základních složek na výsledné barvě.



Obrázek 4 Kolorimetrický trojúhelník CIE (Požgaj, 1993)

Složky  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , nazývané kolorimetrickými funkcemi kolorimetrického pozorovatele CIE mají každá jinou spektrální citlivost. Citlivostní maximum  $z(\lambda)$  je v modré zóně barevného spektra,  $y(\lambda)$  se nachází v zelené zóně a  $x(\lambda)$  v červené zóně. (Požgaj, 1993)

Pro zobrazení je třeba definovat trichromatické souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Dány jsou rovnicemi:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Zároveň platí:  $x + y + z = 1$

Kde normované složky libovolné barvy  $F$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) jsou určeny sčítáním spektrálních citlivostí podle váhy dané funkcionalitou  $\varphi(\lambda)$ , která zobrazuje vyzařované spektrum světelného podnětu (pozorovaného předmětu). (Podle Požgaje, 1993):

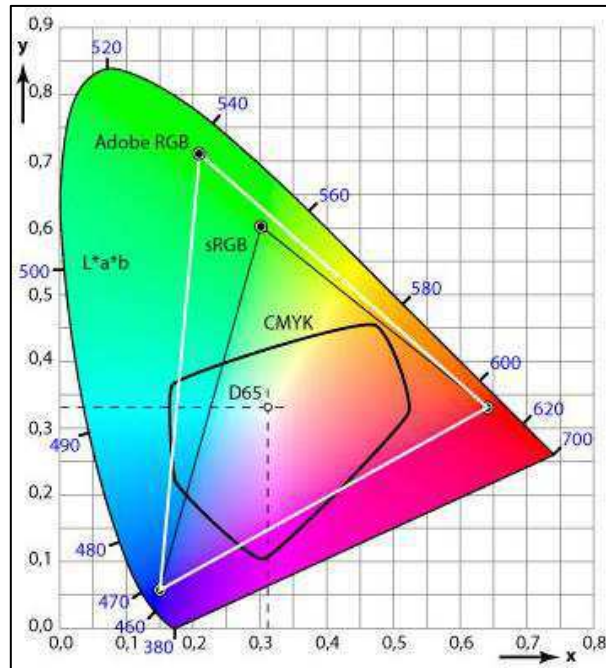
$$X = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

#### 3.2.4.2. *Soustava CIELAB*

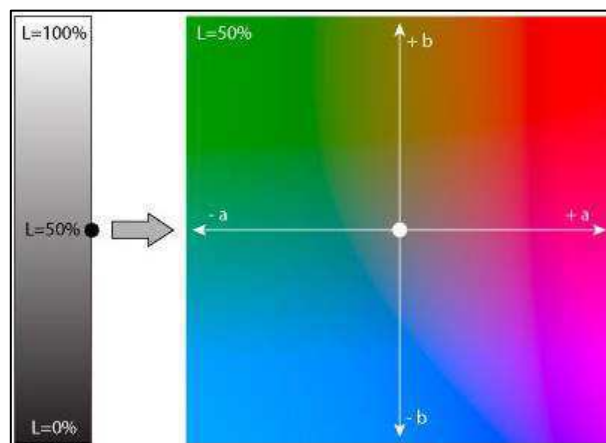
Barevný model CIELAB, označovaný též jako LAB nebo  $L^* a^* b^*$ , je v porovnání s ostatními barevnými modely schopný dosáhnout celého rozsahu barev, viditelných lidským okem. Velkou výhodou může být nezávislost na konkrétním používaném zařízení, zároveň v porovnání s ostatními modely není závislý na konkrétních třech barvách, spektrum barev je tedy širší. viz (obr. 5).



Obrázek 5 Kolorimetrické soustavy (FotoRoman)

Jak již napovídá označení „LAB“ jedná se stejně jako v případě CIE o trichromatickou soustavu. Hodnocenými parametry jsou:  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .

Složka  $L$  je luminance (světelnost), kdy 0 % odpovídá černá a 100% bílá. Složky „ $a$ “ a „ $b$ “ popisují barvu bodu, když „ $a$ “ je ve směru červeno-zeleném a „ $b$ “ ve směru modro-žlutém viz (obr. 6).



Obrázek 5 Zobrazení barev v prostoru CIELAB (FotoRoman)

Pro porovnání dvou barev se zavedla veličina  $\Delta E^*$ . Vyjádřena je vztahem:

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

Kde veličiny  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  dány vztahy:

$$\Delta L^* = L_1^* - L_0^*$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_0^*$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_0^*$$

$(L_0^*, a_0^*, b_0^*)$  - referenční hodnoty

$(L_1^*, a_1^*, b_1^*)$  - hodnoty po úpravě

$L^*$  - světlost barvy 0 (černá)100 (bílá)

$a^*$  - barva mezi červenou (+60) a zelenou (-60)

$b^*$  - barva mezi žlutou 60) a modrou (-60)

(CHEN, Yao, et al.;2012; Pánek, 2015)

Pro porovnávání dvou odstínů dle  $\Delta E^*$  se využívá následující tabulka

$0,2 > \Delta E^*$  - neviditelný rozdíl

$0,2 < \Delta E^* < 2$  – malý rozdíl

$2 < \Delta E^* < 3$  – barevná změna viditelná s vysoce kvalitním filtrem

$3 < \Delta E^* < 6$  – barevná změna viditelná se středně kvalitním filtrem

$6 < \Delta E^* < 12$  – vysoké barevné změny

$\Delta E^* > 12$  – odlišná barva Odchytky okem viditelné jsou od  $\Delta E^* > 3$ .

(Pánek, 2015)

### 3.3. Termická modifikace

Proces tepelného opracování dřeva je člověku znám již po mnoho staletí. Pomocí opalovaných dřevěných prken a tyčoviny si naši předci pomáhali prodloužit životnost dřevěných výrobků, jako například střech nebo plotů. Teorie i praxe ukázaly velmi výrazný vliv na mechanické i fyzikální vlastnosti dřeva v závislosti na stupni tepelné úpravy.

Zkoumat vliv vysoké teploty na vlastnosti dřeva napadlo vědce poprvé ve třicátých letech minulého století, kdy vědci Stamm a Hansen začali v Německu s výzkumem. Během 20. století byl vliv termické modifikace zkoumán převážně v Evropě a Americe a na jeho konci převážně ve Finsku. Nejintenzivněji se do výzkumu zapojili finští vědci z VTT (Technické výzkumné středisko) a YTI (institut enviromentálních technologií). Výsledkem jejich snažení je obchodní značka

ThermoWood®, s patentovaným postupem tepelné úpravy dřeva. (Thermowood Handbook, 2003)

Proces termické modifikace lze jednoduše definovat jako působení vysokých teplot na dřevo za účelem změny jeho struktury a vlastností. Tato technologická operace probíhá v několika fázích s jasně definovanými podmínkami.

Cílem této operace je přetvořit původní (vstupní) materiál na materiál výstupní, který bude mít pro specifické využití lepší vlastnosti. Tato velmi obecná charakteristika pasuje na velkou řadu technologických procesů využívaných v dřevařském průmyslu, ovšem termická modifikace se vyznačuje hned několika výhodami, které například chemická úprava postrádá. Vhodnou vlastností upraveného dřeva je snížení hygroskopicity, zvýšení rozměrové stability, vyšší některé pevnostní charakteristiky, lepší odolnost vůči biotickým činitelům a v neposlední řadě změna barvy, využitelná například pro napodobení exotických dřevin.

Termicky modifikované dřevo nachází uplatnění jak v interiérové, tak exteriérové aplikaci. Vhodné použití je v interiéru například na podlahy, koupelnový a kuchyňský nábytek, sauny, obklady jak vnitřní, tak hlavně venkovní. Dále se termicky modifikované dřevo využívá v exteriéru na výrobu zahradního nábytku, teras, oken apod. Pro proces termické úpravy se nejčastěji využívá dřevo smrku a borovice (až 90 %), ovšem termicky upravit lze jakékoliv dřevo listnatých i jehličnatých stromů a téměř vždy tento proces znamená vysokou přidanou hodnotu pro jinak špatně využitelné dřeviny, běžně zpracovávané pouze pro energetické účely. (Reinprecht, 2011c)

Pro strukturální změny ve dřevě je třeba působit teplotami mezi 150 °C a 250 °C, po dobu minimálně 15 minut, kdy začíná docházet k termické degradaci hemicelulóz, což je hlavní důvod změn vlastností termicky modifikovaného dřeva. (Thermowood Handbook, 2003)

### ***Procesy a klasifikace termických úprav***

Existuje celá řada metod, jak dosáhnout termicky modifikovaného dřeva. V dnešní době je vyvinuta řada komerčně využívaných procesů, jmenovitě německý Lignostone nebo Lignifol, americké Staypak a Staybwood, Platowood proces v Holandsku,

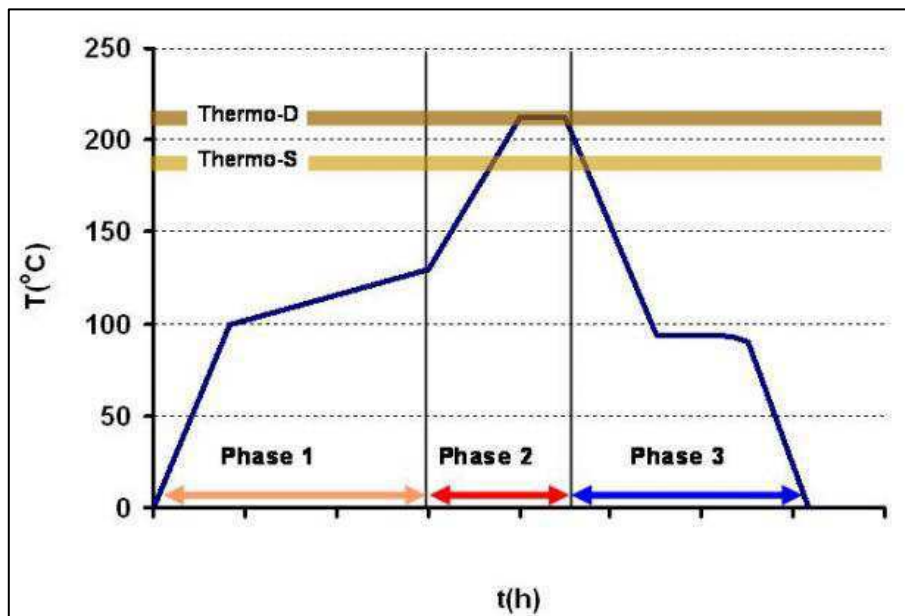
Retificatwood proces ve Francii a nejpoužívanější metoda Thermowood, která byla vyvinuta ve Finsku. Rozdíly mezi jednotlivými metodami spočívají v:

- Době a teplotě v procesu úpravy,
- atmosféře,
- otevřenosti / uzavřenosti systému,
- druhu dřeva,
- systému sušení a klimatizování,
- rozměrech upravovaných těles,
- použití katalyzátoru. (Hill, 2006)

### 3.3.1. ThermoWood

Nejčastěji využívaným procesem termické úpravy je ThermoWood®. Jedná se o licencovaný proces finského VTT, jehož obchodní značku ThermoWood® mohou používat partnerské firmy, za předpokladu dodržení veškerých technologických postupů. Proces úpravy se dělí na tři fáze:

1. Sušení
2. Tepelná úprava
3. Klimatizování



Obrázek 7 Fáze procesu termické úpravy (Thermowood Handbook, 2003)



### **Proces sušení**

Sušení je časově nejnáročnější operací. Proces je nazýván také vysokoteplotním sušením a během něj dochází ke srovnání rozdílů vlhkostí vstupních materiálů, díky tomu nelze přesně stanovit doba sušení, neboť je závislá na počáteční vlhkosti materiálu a na jeho průřezu. Z počátku je rychle dosaženo teploty 100 °C, za stálého působení vlhké páry z důvodu předejití popraskání materiálu, a následně teplota povolna stoupá zhruba na úroveň 130 °C. Jako sušící médium se využívá horký vzduch, případně přehřátá pára. Po skončení první fáze má dřevo vlhkost blízkou nule a následuje proces tepelné úpravy.

### **Proces tepelné úpravy**

Tepelná úprava dřeva probíhá v uzavřeném prostředí, ve kterém je teplota zvýšena na 185-215 °C v závislosti na zvoleném stupni úpravy. Fáze tepelné úpravy probíhá 2-3 hodiny, během kterých dochází k nejpodstatnějším chemickým změnám ve dřevě. V případě ThermoWoodu je během procesu vpouštěna do komory pára a plyny zabraňující vznícení dřeva a ovlivňující chemické změny.

### **Proces klimatizování**

V poslední fázi dochází k postupnému ochlazení materiálu za působení vodních par. Je třeba postupovat obezřetně a zamezit příliš rychlému ochlazení termovaného materiálu při kontaktu s chladným vnějším prostředím. Během klimatizování se materiálu pomocí vodní páry dodává vlhkost, tak aby výsledný produkt měl absolutní vlhkost 5-7 %. V závislosti na stupni tepelné úpravy a druhu dřeva probíhá poslední fáze 5-15 hodin. (Thermowood Handbook, 2003)

#### **3.3.1.1. Třídy ThermoWood**

ThermoWood se dělí na dvě třídy Thermo-S „stabilní a Thermo-D „trvanlivé“. Hlavním rozdílem mezi těmito třídami je teplota druhé fáze, tepelné úpravy.

**Thermo-S** se vyznačuje zvýšenou tvarovou stabilitou. Průměrné tangenciální bobtnání a sesychání z důvodu změny vlhkosti je v případě Thermo-S 6-8 %. Podle hodnocení přirozené trvanlivosti je toto dřevo klasifikováno jako středně trvanlivé, největší využití má v interiéru.

Při úpravě jehličnatého dřeva (nejčastěji smrk a borovice) se využívá teplot 190 °C. Dřevo po úpravě ztmavne, zlepšuje se jeho rozměrová stabilita a odolnost vůči povětrnosti. Pevnost v ohybu zůstává při těchto teplotách téměř nezměněna. U listnatých dřevin se pro úpravu využívá teploty 185 °C, která zajistí podobné změny vlastností jako u dřeva jehličnatého, vyjma odolnosti proti povětrnostním vlivům, která zůstává nezměněna.

Takto upravené dřevo se běžně využívá na výrobu vnitřního i venkovního nábytku, podlahy, sauny, dveře, okna, vnitřní obklady atd.

**Thermo-D** je využíváno především v exteriéru, a to převážně tam, kde nedochází k přílišnému namáhání ohybem. Úprava vyššími teplotními stupni přináší ještě větší tvarovou stabilitu. Průměrná hodnota tangenciálního bobtnání a sesychání je 5-6 %. Zároveň se výrazně zlepšuje odolnost vůči biotickým činitelům, když se takto upravené dřevo řadí do skupiny trvanlivých dřevin.

Pro úpravu jehličnatého dřeva je použita teplota 212 °C. V procesu se v porovnání s Thermo-S mění vlastnosti dynamičtěji, výhody u předchozí metody se prohlubují, ovšem upravené dřevo se vyznačuje horší ohybovou pevností. V případě listnatého řeziva, upravovaného teplotou 200 °C, dochází ke zlepšení odolnosti proti povětrnosti, výrazné změně barvy a bohužel i ke snížení pevnosti v ohybu. (Thermowood Handbook, 2003)

### **3.3.2. Další metody termické úpravy**

#### ***PlatoWood***

Plato®Wood se vyrábí v porovnání s ThermoWood® při relativně nižších teplotách. Proces probíhá v prostředí vodní páry, rozdílem oproti předešlé metodě je zvýšený tlak v procesu Plato®Wood.

Technologický proces výroby sestává ze 4 fází:

1. Hydrotermolýza – hydrotermická úprava dřeva při teplotách 150-190 °C, za tlaku 0,6-1 MPa a probíhá 4 až 5 hodin. V této fázi nedochází k výrazným změnám vlhkosti materiálu. V chemické struktuře dřeva začíná docházet k odbourávání hemicelulózy.
2. Sušení – sušení v sušárně po dobu několika dní na výslednou vlhkost  $w_{abs} = 8-10\%$

3. Vytvrzování – hlavní proces přeměny probíhá ve fázi vytvrzování. Fáze probíhá 12-15 hodin, při atmosférickém tlaku a teplotách 150-190 °C, za omezeného přístupu vzduchu. Ve dřevě dochází k zasíťování makromolekul ligninu.
4. Klimatizování – dřevo vysušené na zhruba 1 % je v této fázi zvlhčeno na vlhkost  $w_{abs} = 4-6 \%$ . (Reinprecht, 2011c)

### ***Retificated Wood***

Výroba retifikovaného dřeva spočívá v působení vysokých teplot ve spojení s dusíkovou atmosférou na upravovaný materiál. Působící teplota se průběžně zvyšuje z 210 °C až na 260 °C. V procesu je velmi důležité udržet inertní prostředí s maximálním podílem kyslíku 2 %, díky tomu dochází jen k malému množství termooxidačních reakcí a dřevo si tak uchovává dobré pevnostní charakteristiky.

### ***OHT – Wood***

Principem této úpravy je aplikace horkých, nejčastěji rostlinných, olejů na dřevěný materiál. V impregnační komoře slouží olej jak k přenosu tepla nutného k termické úpravě, tak k zamezení přístupu kyslíku ke dřevu. Teplota oleje se pohybuje mezi 200 a 220 °C a pro prohřátí dřeva v celém průřezu musí působit několik hodin. Nevýhodou této metody je zvyšování hmotnosti modifikovaného materiálu, vlivem nasáknutí oleje, a následný zápach některých olejů. (Kačíková, 2011)

## 4. Metodika

V této kapitole je popsán praktický výzkum. Jsou zde specifikované vzorky, popis procesů potřebných k dosažení relevantních výsledků a definovány vztahy a metody použité pro výpočty. Informace potřebné k provedení veškerých praktických kroků pocházejí z technických norem, které jsou zde uvedeny.

### 4.1. Příprava vzorků

Materiál na výrobu vzorků pocházel ze Školního lesního podniku, v blízkosti Kostelce nad černými lesy, České zemědělské univerzity. Použito bylo dřevo osmi stromů břízy bělokoré (*Betula pendula* Roth.) z různých stanovišť, pro zajištění variabilnější skladby testovaných vzorků. Byly udělány výřezy oddenkových částí kmenů s průměry zhruba 40 cm. Pro účely testování barvy a tvrdosti bylo z každého kmene vymanipulováno 37 vzorků o rozměrech 20 x 100 x 300 mm (R x T x L). Na každém vzorku bylo vyznačeno 6 míst měření, pro zkoušení vlastností před a po termické úpravě.

### 4.2. Termická úprava

Vzorky byly termicky upravovány v areálu Školního lesního podniku v Kostelci nad Černými lesy. Po naměření zkoušených vlastností v neupraveném stavu byly vzorky rozděleny do pěti skupin a následně byla každá ze skupin upravována v termokomoře za příslušné teploty. Teplota v hlavní fázi termické úpravy byla vždy pro pětinu vzorků 160 °C, 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C. Úprava probíhala ve vysokoteplotní sušárně KHT typ A, vyrobené firmou Katres s.r.o. (Jihlava). Parametry komory jsou: maximální objem materiálu = 0.38 m<sup>3</sup>, maximální váha materiálu = 150 kg, maximální dosažitelná teplota = 250 °C a spotřeba energie = 3 kWh.

Termická úprava probíhala podle finského patentu pro termickou modifikaci dřeva Pat. EP-0759137 (1995). Na rozdíl od finské technologie byla pro udržování vlhkosti využita vodní clona na rozdíl od páry.

### 4.3. Klimatizování

Klimatizování vzorků na vhodnou vlhkost pro měření vlastností dřeva probíhalo v laboratoři v areálu České zemědělské univerzity v Praze-Suchdole. Vzorky byly, z důvodu zajištění stejných vlhkostních podmínek pro všechny vzorky, vždy před měřením zjišťovaných vlastností klimatizovány v klimatizační komoře CLIMACELL 707 od firmy BMT Medical Technology Ltd. (Brno), za relativní vlhkosti vzduchu  $65 \pm 5 \%$  a teplotě vzduchu  $20 \pm 2 \%$ . Vzorky byly klimatizovány po dobu dostatečně dlouhou k dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva (moment, kdy dřevo již nepřijímá, ani neodevzdává vlhkost do okolí). Tento rovnovážný stav byl zjišťován pomocí opětovného vážení. U tepelně neupraveného dřeva dosahuje absolutní vlhkost  $w_{\text{abs}} = 12 \%$ , u tepelně upravených vzorků je rovnovážná vlhkost nižší.

### 4.4. Stanovení hustoty

Měření hustoty stejně jako ostatních mechanicko-fyzikálních vlastností probíhalo v areálu České zemědělské univerzity v Praze-Suchdole.

Měření hustoty probíhalo vždy po klimatizování těles a ustálení jejich rovnovážné vlhkosti. Vzhledem k pravidelnému tvaru vzorků jsme mohli určit hustotu jednotlivých těles jejich zvážením na laboratorní váze značky Kern, s přesností na 0,01 g a změřením jejich rozměrů digitálním posuvným měřítkem značky Kinex s přesností 0,01 mm. Postupovali jsme dle normy ČSN 49 0108. Pro výpočet hustoty byl dle normy použit vzorec:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$\rho_w$ - hustota vlhkého dřeva [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$m_w$ - hmotnost vlhkého dřeva [kg]

$V_w$ - objem vlhkého dřeva [ $m^3$ ]

### 4.5. Stanovení tvrdosti podle Brinella

Při zjišťování tvrdosti zkoušeného materiálu se vycházelo z normy pro zkoušení tvrdosti tuhých nekovových materiálů ČSN 64 0128, stejně jako Borůvka et al. (2018)

a normy pro metody zkoušení tvrdosti dřevěných podlahovin ČSN EN 1534. Ačkoliv norma neupravuje přesné podmínky pro zkoušení materiálů na bázi dřeva metoda zkoušení a vyhodnocení zkoušky fungují na stejném principu pro jakýkoliv materiál. Tvrdost materiálu se vypočítá podle vzorce:

$$H_B = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [MPa]$$

$H_B$  = Brinellova tvrdost [MPa]

F = síla působící na kuličku [N]

D = průměr kuličky [mm]

d = průměr otláčené plochy ve dřevě [mm]

Při zkoušení byla zatlačována ocelová kulička o průměru 10 mm do tangenciální (případně tangenciálně-radiální) plochy zkušebních vzorků. Zkušební tvrdoměr DuraVision-30 od firmy Struers GmbH, (Willich, Německo) vyvíjel na zkoušené těleso tlak po dobu zhruba 50 s, silou 500 N a po provedení zkoušky vyhodnotil tvrdost.

Každé těleso bylo zkoušeno na 6 místech, volených tak, aby neobsahovaly žádné vady. Měření proběhlo u klimatizovaných vzorků před a následně v blízkosti prvního měření i po termické úpravě.

#### 4.6. Měření barvy

Barevnost vzorků byla měřena podobně jako u tvrdosti na 6 místech na každém vzorku. Stejně tak proběhlo měření vždy před a následně po termické úpravě, kdy byl pro největší korektnost výsledku měřen přesně stejný bod na vzorku.

Měření probíhalo pomocí spektrofotometru CM-600d od firmy Konica Minolta (Osaka, Japonsko). Měření probíhalo v barevné soustavě CIELAB, kdy vyhodnocovanými parametry byly světelnost  $L^*$  a barevnosti na osách  $a^*$  a  $b^*$ , které se následně přepočítávali do parametru  $\Delta E^*$ , podle kterého probíhalo porovnávání barevné změny před a po úpravě. Vzorech pro určení barevného rozdílu  $\Delta E^*$  dle normy ČSN EN ISO 11664 – část 4.a 6. je:

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

## 5. Výsledky a diskuze

V této kapitole jsou představeny výsledky práce. V grafické i tabelární podobě jsou zde vyjádřeny pozorované změny tvrdosti, hustoty a barvy u termovaného dřeva břízy. Výsledky byly statisticky zpracovány pomocí programu STATISTICA 13 (Statsoft INC., USA). Pomocí tohoto programu byla provedena základní popisná statistika. Pro vyjádření trendů vlastností závislých na tepelné úpravě byla použita vícefaktorová analýza ANOVA. Pro porovnání závislosti tvrdosti na hustotě byl pomocí programu STATISTICA 13 vytvořen graf lineární regrese s uvedenou rovnicí přímky ( $y$ ), korelačním koeficientem ( $r$ ) a koeficientem determinace ( $r^2$ ). U vybraných vlastností byl proveden duncanův test, který nám ukázal statistickou závislost mezi jednotlivými stupni úpravy. Pro všechny statistické analýzy byl zvolena hladina významnosti  $\alpha = 0,05$  %. Data ze statistické analýzy byla dále zpracována a tabelárně upravena v programu MS Excel 365 (Microsoft Corporation, USA).

Naměřené a spočtené výsledky byly následně porovnány s literaturou. V případě břízy bylo možno porovnávat měřené vlastnosti za identických, případně velmi blízkých stupňů tepelné úpravy u stejného druhu, nebo druhů svým charakterem velmi blízkým bříze. Druhým způsobem bylo porovnávání s odlišnými dřevinami. Srovnání sledovaných vlastností termicky upraveného dřeva břízy s neupravenými i upravenými cennějšími dřevinami bylo provedeno za účelem zjistit, zda by mohlo upravené dřevo břízy být dostupnější náhradou používaných dřevin.

V tabulce (tab. 5) jsou znázorněny základní statistické parametry ke všem zkoumaným vlastnostem dřeva břízy. Referenční hodnoty (REF) byly pro toto porovnání naměřeny ze všech vzorků, které byly následně tepelně upravované. V následující tabulce (tab. 6) jsou přehledně zaneseny procentuální rozdíly jednotlivých měřených parametrů. Procentuální změna u jednotlivých stupňů úpravy je vztažena vždy k jedné sadě vzorků, které byly změřeny před úpravou a následně po ní.

Tabulka 5 Základní statistické údaje pro vybrané vlastnosti.

Vlastnosti	Stupeň úpravy	Počet vzorků [N]	Minimum	Průměrná hodnota	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
<b>Hustota</b> $\rho_{65/20}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	REF	151	550	690	830	49	7.1
	160	23	525	666	754	52	7.8
	170	29	595	670	723	31	4.6
	180	30	590	659	738	38	5.8
	190	35	560	648	725	42	6.4
	200	34	557	641	722	39	6.1
<b>Tvrdość</b> [Mpa]	REF	906	3.0	26.1	65.0	9.0	34.6
	160	138	15.0	44.6	72.0	14.2	31.8
	170	174	13.0	43.4	74.0	13.5	31.2
	180	180	15.0	40.1	75.0	13.6	34.0
	190	210	11.0	32.7	69.0	13.1	40.0
	200	204	14.0	34.0	71.0	12.5	36.9
<b>Barevnost</b> $\Delta E^*$	REF	906	66.3	80.0	86.1	3.5	4.4
	160	138	63.3	71.3	77.1	3.3	4.6
	170	174	59.5	68.4	73.0	2.3	3.4
	180	180	53.2	63.8	71.9	3.4	5.4
	190	210	38.7	54.2	72.9	5.6	10.3
	200	204	31.5	47.6	73.5	8.4	17.6

Stupeň úpravy: REF = bez úpravy, 160 = tepelná úprava na 160 °C, 170 = tepelná úprava na 170 °C, 180 = tepelná úprava na 180 °C, 190 = tepelná úprava na 190 °C, 200 = tepelná úprava na 200 °C.  $\rho_{65/20}$  = rovnovážná hustota, kterou dosáhne dřevo při klimatizování za relativní vlhkosti vzduchu = 65 ± 5 % a teplotě 20 ± 2 %, která u neupraveného dřeva dosahuje 12%.

Tabulka 6 Procentuální změny všech parametrů

	160	170	180	190	200
<b>L*</b>	-11.0	-15.3	-22.9	-36.8	-44.4
<b>a*</b>	10.8	8.7	19.7	44.5	32.5
<b>b*</b>	-5.9	-7.4	-1.0	4.1	-12.5
<b><math>\Delta E^*</math></b>	-10.4	-14.5	-20.8	-32.1	-40.5
<b>Brinellova tvrdość</b>	67.3	58.9	44.8	36.7	32.6
<b>Délka</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Šířka</b>	-3.3	-3.6	-3.7	-3.4	-2.4
<b>Výška</b>	-2.3	-2.5	-2.7	-2.4	6.1
<b>Objem</b>	-5.5	-5.9	-6.3	-5.7	3.5
<b>Hmotnost</b>	-6.6	-7.6	-8.3	-8.5	-11.1
<b>Hustota <math>\rho_{65/20}</math></b>	-1.0	-1.7	-2.2	-3.0	-14.2

160 - 200 = změna v % mezi stupněm úpravy 160 °C - 200 °C a neupravenými vzorky. L\*, a\*, b\*,  $\Delta E^*$  - kolorimetrické parametry.



## 5.1. Hustota

Dřevo břízy se řadí mezi dřeviny o střední hustotě. Autoři uvádějí hustotu  $\rho_{12}$  v rozmezí  $630 \text{ kg/m}^3$  (Matovič, 1993), až  $640 \text{ kg/m}^3$  (Gandelová, 2009). Ovšem hustota dřeva může být velmi ovlivněna podle Požgaje (1993) například věkem stromu, rychlostí růstu, resp. šířkou letokruhů, či podílem letního dřeva.

Při našem měření jsme dospěli při dodržení normou stanovených postupů k výsledům hustoty podstatně vyšším, než jsou uváděny v literatuře. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce (tab. 7).

Tabulka 7 Porovnání hustoty u neupraveného a upraveného dřeva

Hustota $\rho_{65/20}$	Před úpravou $\rho_{65/20}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Po úpravě [kg/m <sup>3</sup> ]	změna po úpravě [%]
<b>160</b>	673	666	-1.0
<b>170</b>	682	670	-1.7
<b>180</b>	673	659	-2.2
<b>190</b>	667	648	-3.0
<b>200</b>	747	641	-14.2

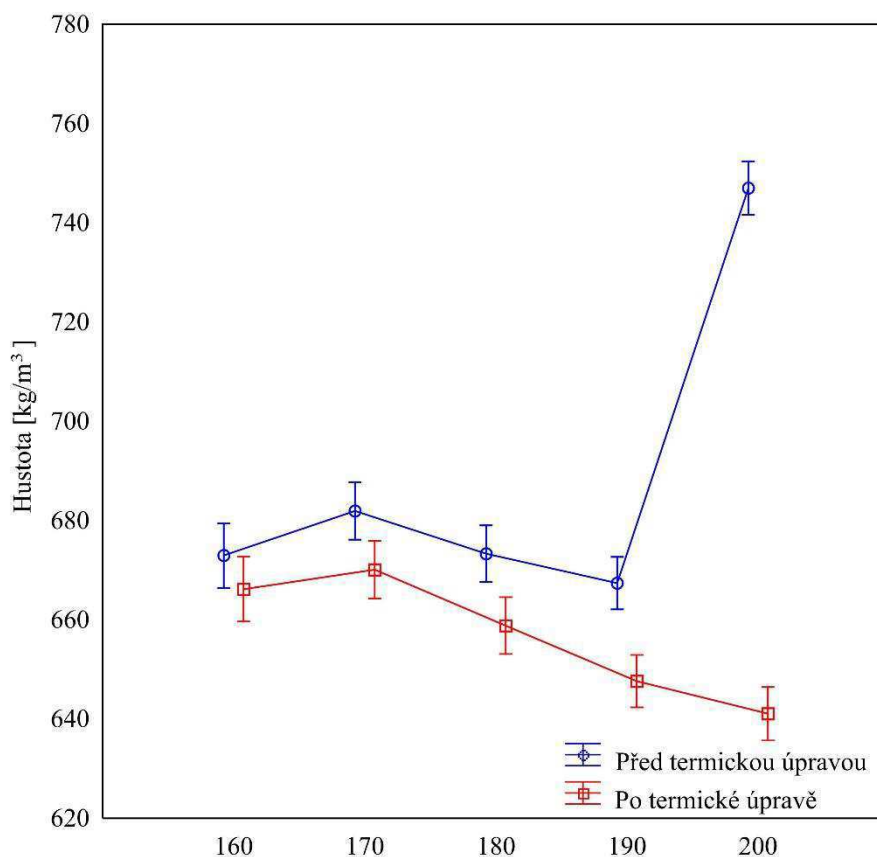
*160 - 200 = vzorky, které byly naměřeny a následně upraveny na teplotní stupeň 160 °C - 200 °C*

Zajímá nás první sloupec, ve kterém jsou uvedeny průměrné hustoty jednotlivých skupin vzorků před úpravou. Je vidět, že naměřené hodnoty se pohybují v rozmezí o zhruba  $40\text{-}50 \text{ kg/m}^3$  vyšším, než uvádí literatura. Pokud porovnáваме hustotu referenčních vzorků s výzkumem ze stejné oblasti, ukazuje se podobný rozdíl. Podle Borůvka et al.(2018) je průměrná hodnota hustoty březového dřeva pocházejícího ze Školního lesního podniku v Kostelci nad Černými lesy  $639 \text{ kg/m}^3$ . Tento rozdíl mezi naměřenými hustotami a hustotami udávanými v literatuře názorně předvádí, jak závisí na konkrétních podmínkách. Tato práce si neklade za cíl upřesnit, či stanovit průměrnou hustotu dřeva břízy. Na takové závěry by bylo třeba násobně zvýšit množství měřených vzorků z většího množství stromů a stanovišť. Cílem pro změření hustoty testovaných vzorků je, ukázat trend vývoje hustoty při termické úpravě a zjistit závislost na tvrdosti.

Z úzkého pásu hustot neupraveného dřeva na první pohled vyčnívá hustota naměřená u vzorků následně upravovaných teplotou  $200 \text{ °C}$ . Vzhledem k faktu, že všechny vzorky pocházely ze stejných výřezů a v každém teplotním stupni byl přibližně stejný počet vzorků ze všech stromů, přičítám takto odlišnou naměřenou

hustotu chybnému měření. Jelikož se v následném měření hustot upraveného dřeva projevil trend zcela v souladu s předpokládaným vývojem viz graf (graf 1), lze předpokládat že vznikla chyba v procesu měření, případně při klimatizování dřeva na požadovanou vlhkost.

Tepelnou úpravou dochází ke zmenšování hustoty modifikovaného dřeva. (ThermoWood Handbook, 2003). Vlivem působení vyšších teplot ztrácí dřevo vlivem chemických změn a úbytkem vázané vody v buněčných stěnách část svého objemu. Tento proces je výrazně pozorovatelný u teplot nad 100 °C. (Millet a Gerhard, 1972). Důsledkem zvýšených teplot je odbourávání určitého podílu hemicelulózy a odbourání nebo prostorová blokáce hydrofilních – OH skupin. (Reinprecht, 2011c). Díky těmto změnám dochází nejen k objemovému, ale také hmotnostnímu úbytku. Byla dokázána korelace mezi příčným sesycháním a ztrátou hmotnosti u tepelně upravovaného dřeva (Chang a Keith, 1972). Jelikož je úbytek hmotnosti vyšší než objemová změna, klesá se zvyšující se teplotou hustota, jak je



Graf 1 Vliv termické úpravy na hustotu

vidět i v grafu (graf 1). Podle Rowella (2012) je úbytek hustoty u břízy při termické úpravě při teplotě 160 °C, 4,7 % a při teplotě 180 °C dokonce 11,4 %. Dle Borůvky et al. (2018) je při teplotě 165 °C pokles hustoty o 1 % a při úpravě na 210 °C dělá rozdíl hustoty 8 %. Z našeho měření vyplývají hodnoty srovnatelné, viz tabulka (tab. 7).

Při pohledu na Duncanův test, viz tabulka (tab. 8), srovnávajícího závislosti jednotlivých měřených skupin vzorků, lze vidět, které stupně úpravy vykazují statisticky významný rozdíl v porovnání s jejich neupravenými podobami. Tabulka (tab. 8) i graf (graf 1) jasně ukazují, že k podstatné změně hustoty došlo, až při úpravě vzorků teplotou 180 °C. U stupňů s vyšší úpravou se rozdíl vůči neupraveným vzorkům zvětšuje.

Tabulka 7 Duncanův test pro změnu hustoty

MS = 1524,6 DF = 1802,0	Před termickou úpravou					Po termické úpravě				
	160	170	180	190	200	160	170	180	190	200
Před termickou úpravou	160									
	170	<b>0.039199</b>								
	180	0.924796	<b>0.038176</b>							
	190	0.207701	<b>0.001035</b>	0.194290						
	200	<b>0.000003</b>	<b>0.000009</b>	<b>0.000011</b>	<b>0.000004</b>					
Po termické úpravě	160	0.137586	<b>0.000399</b>	0.125608	0.768599	<b>0.000004</b>				
	170	0.491509	<b>0.007501</b>	0.465131	0.513528	<b>0.000004</b>	0.375595			
	180	<b>0.001508</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.001257</b>	0.050210	<b>0.000005</b>	0.077129	<b>0.011302</b>		
	190	<b>0.000004</b>	<b>0.000005</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.000006</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.000022</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.006933</b>	
	200	<b>0.000004</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.000005</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.000001</b>	<b>0.000003</b>	<b>0.000004</b>	<b>0.000038</b>	0.115043

Červeně označené hodnoty jsou statisticky významné na  $p < 0,05$ . MS = mean squares (rozptyl), DF = degrees of freedom (stupně volnosti). Hodnoty 160 - 200 udávají na jaký teplotní stupeň v rozmezí 160 °C, až 200 °C byla provedena tepelná úprava.

## 5.2. Tvrdost

Tvrdost byla měřena pomocí tvrdoměru na tangenciálních, či tangenciálně – radiálních rovinách. Podle Požgaje (1993) nejsou rozdíly v radiální a tangenciální rovině jednoznačné. Podstatný rozdíl vykazuje tvrdost měřená v příčné rovině, kde je zhruba 1,6 až 2,5krát vyšší.

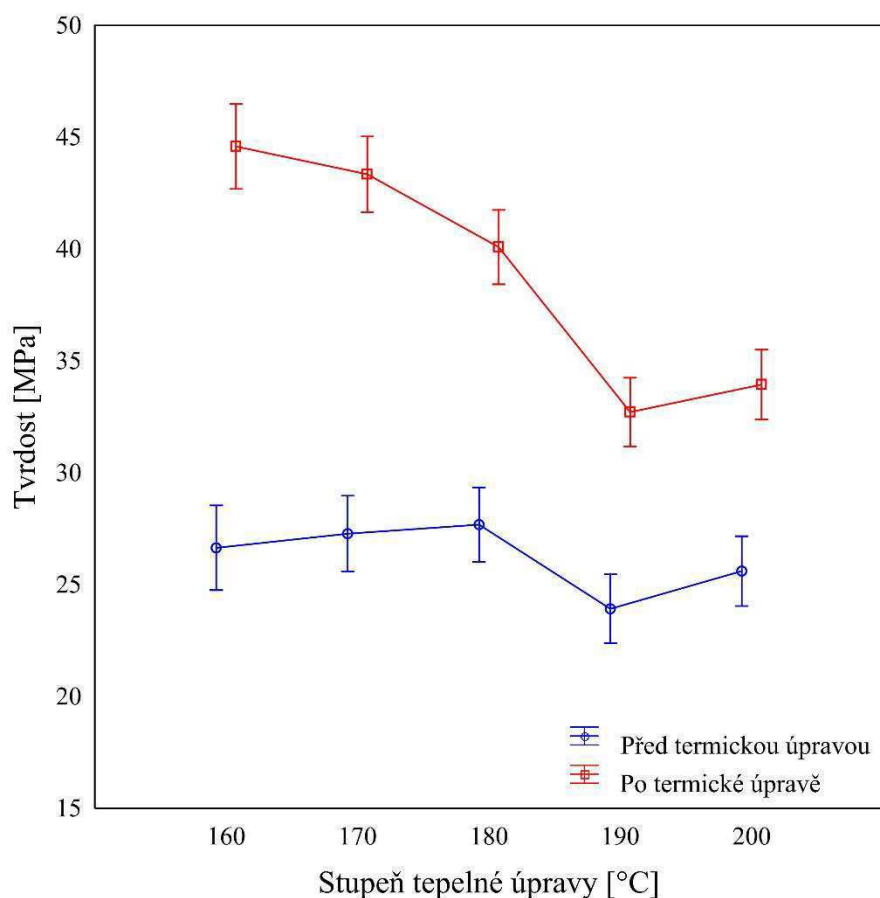
Střední hodnota tvrdosti před úpravou nám vyšla 26,1 MPa, viz tabulka (tab. 5), což odpovídá hodnotám, které jsou uváděny v literatuře při měření tvrdosti pomocí Brinellovy metody. Borůvka et al. (2018) uvádí radiální a tangenciální tvrdost břízy v rozpětí 22, až 27 MPa a v následném měření vychází průměrná hodnota radiální tvrdosti 21,2 MPa a tangenciální 32,8 MPa. Podle Heräjärviho (2004) je průměrná hodnota tvrdosti břízy 23,37 MPa. Ve starší literatuře nalezneme i hodnoty vyšší. Například radiální tvrdost 37 MPa a tangenciální 33

MPa (Matovič, 1993). I zde se, stejně jako při porovnávání hustoty, velmi projevují značné rozdíly způsobené různými růstovými podmínkami stromů.

Podle Reinprechta (2008) se tvrdost dřeva s narůstající teplotou v rozsahu 100–240 °C téměř nemění, nebo mírně roste. Jak je vidět z výsledků měření, může být růst v případě dřeva břízy poměrně významný. Největší zvýšení tvrdosti zaznamenaly vzorky upravované na 160 °C, kde se zvýšila tvrdost o 67,3 %. U narůstajících teplot došlo k postupnému snižování rozdílů tvrdosti, až na 32,6 % u tepelné úpravy při 200 °C, viz tabulka (tab. 9) a graf (graf 2).

Tabulka 9 Porovnání tvrdosti u neupraveného a upraveného dřeva

Tvrđost	Před úpravou [Mpa]	Po úpravě [Mpa]	Změna po úpravě [%]
<b>160</b>	26.7	44.6	67.3
<b>170</b>	27.3	43.4	58.9
<b>180</b>	27.7	40.1	44.8
<b>190</b>	23.9	32.7	36.7
<b>200</b>	25.6	34.0	32.6



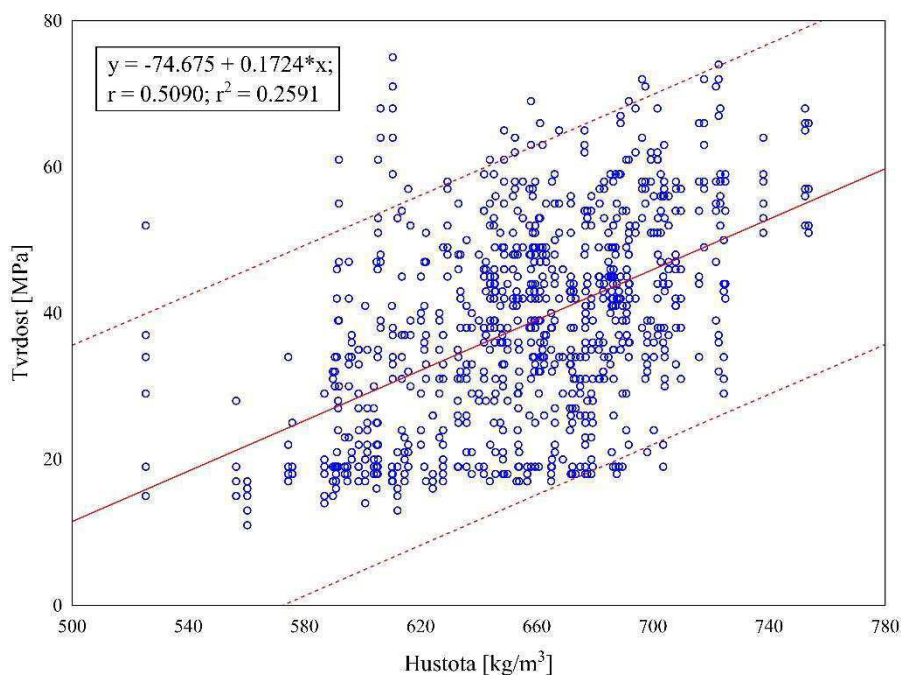
Graf 2 Vliv termické úpravy na tvrdost

Z grafu vlivu stupně termické úpravy na tvrdost a z pohledu na Duncanův test (tab. 10) je vidět že změna tvrdosti při úpravě na 160 °C a 170 °C není statisticky významná. Největší pokles nastává při úpravě na 180 °C, resp. 190 °C.

Tabulka 10 Duncanův test pro změnu tvrdosti

MS = 129 DF = 1802		Před termickou úpravou					Po termické úpravě				
		160	170	180	190	200	160	170	180	190	200
Před termickou úpravou	160										
	170	0.598590									
	180	0.422119	0.739306								
	190	0.031488	0.009274	0.003958							
	200	0.388990	0.192058	0.117545	0.162773						
Po termické úpravě	160	0.000005	0.000004	0.000004	0.000001	0.000001					
	170	0.000004	0.000004	0.000004	0.000001	0.000005	0.302680				
	180	0.000004	0.000004	0.000003	0.000005	0.000004	0.000283	0.006976			
	190	0.000003	0.000020	0.000035	0.000004	0.000004	0.000004	0.000003	0.000011		
	200	0.000004	0.000003	0.000011	0.000004	0.000004	0.000003	0.000011	0.000009	0.307250	

Tvrdost je jako řada jiných vlastností závislá především na hustotě (Thermowood Handbook, 2003). Tato závislost se nám při zkoumání tvrdosti a hustoty potvrdila. Výsledek je dobře zřetelný v grafu (graf 3), kde je vidět zcela zřejmá korelace mezi hustotou a tvrdostí u termicky modifikovaného dřeva. V grafu jsou zaneseny veškeré naměřené hodnoty tvrdosti upraveného dřeva, bez ohledu na stupeň úpravy. Výsledné grafy jednotlivých teplotních stupňů jsou uvedeny v příloze, viz (příloha 1).



Graf 3 Závislost hustoty a tvrdosti po úpravě

### 5.3. Barva

Při tepelné úpravě dochází k zabarvení dřeva do žluto-hnědých, až hnědo černých odstínů, podle Reinprechta (2008) se zvýšením teploty dosáhne tmavších odstínů. Tento předpoklad se potvrdil, když se nejvíce na celkové změně barvy  $\Delta E^*$  promítla změna parametru  $L^*$ , udávajícího světlost, viz tabulka (tab. 6) a graf (příloha 2).

Zatím co při úpravě dřeva na 160 °C byla barevná změna velmi malá, v některých případech až neznatelná, tak při úpravách vyššími teplotami docházelo k výraznému ztmavnutí barvy. Rozdíl oproti neupravenému dřevu je vidět na obrázku (obr. 8), v tabulce (tab. 11) a grafu (graf. 4).

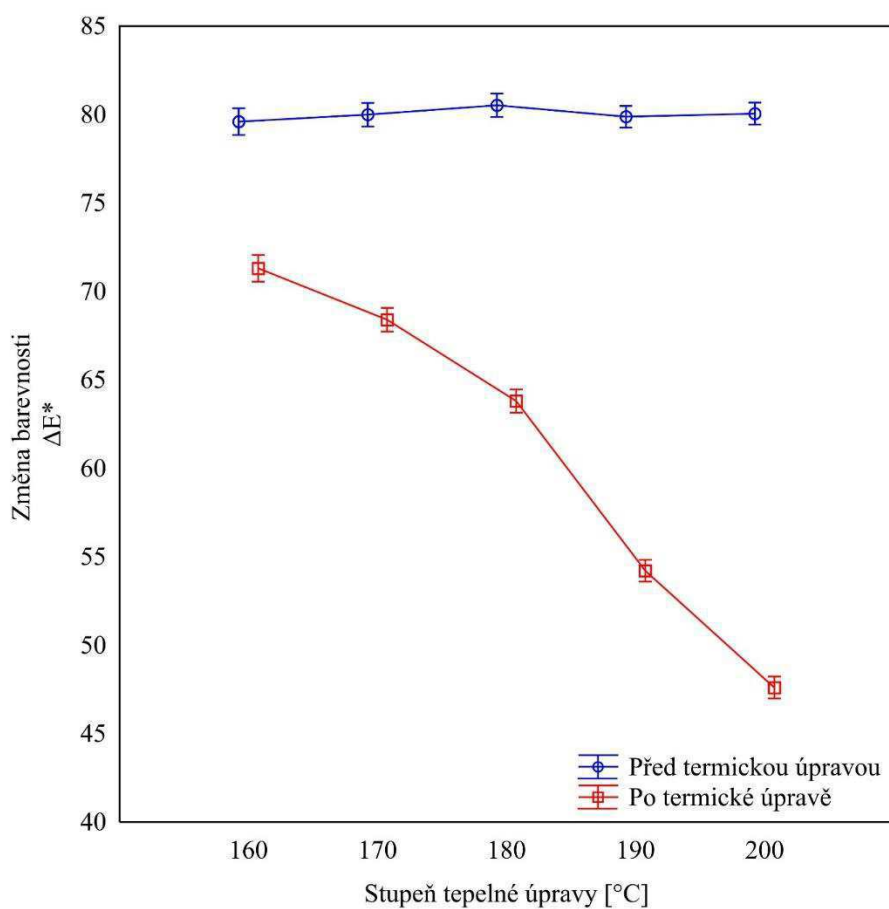


Obrázek 8 Barva březového dřeva v závislosti na stupni úpravy. (Borůvka et al.,2019)

Hodnoceným parametrem byla barevná změna  $\Delta E^*$ , která určuje celkovou změnu barevnosti a skládá se z parametrů  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . Podle Pánka (2005) se řadí barevná změna mezi referenčními vzorky a vzorky upravenými na 160 °C a 170 °C (-8.3; -11.6) do kategorie vysoké barevné změny. Ostatní stupně jsou již dle zmiňovaného rozdělení brány jako zcela odlišná barva. viz (obr 8).

Tabulka 11 Porovnání barevné změny mezi neupraveným a upraveným dřevem.

Barva	Před úpravou $\Delta E^*$	Po úpravě $\Delta E^*$	Změna po úpravě (%)
<b>160</b>	79.6	71.3	-10.4
<b>170</b>	80.0	68.4	-14.5
<b>180</b>	80.5	63.8	-20.8
<b>190</b>	79.9	54.2	-32.1
<b>200</b>	80.1	47.6	-40.5



Graf 4 Vliv termické úpravy na barvu

Změna jednotlivých parametrů  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  u jednotlivých stupňů termické úpravy je vidět v příloze č. 2. Při pohledu na duncanův test, tabulka (tab. 12), lze konstatovat statistickou závislost všech změn barevnosti nastalých vlivem jednotlivých tepelných úprav.

Tabulka 12 Duncanův test pro změnu barevnosti

MS = 20,269		Před termickou úpravou					Po termické úpravě				
DF = 1802,0		160	170	180	190	200	160	170	180	190	200
Před termickou úpravou	160										
	170	0.446176									
	180	0.082147	0.287357								
	190	0.558836	0.817232	0.217228							
	200	0.392239	0.889991	0.318667	0.730792						
Po termické úpravě	160	<i>0.000009</i>	<i>0.000003</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000011</i>	<i>0.000004</i>					
	170	<i>0.000011</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000003</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000009</i>				
	180	<i>0.000003</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000005</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000011</i>	<i>0.000009</i>			
	190	<i>0.000004</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000001</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000005</i>	<i>0.000003</i>	<i>0.000011</i>	<i>0.000009</i>		
	200	<i>0.000004</i>	<i>0.000005</i>	<i>0.000001</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000001</i>	<i>0.000004</i>	<i>0.000003</i>	<i>0.000011</i>	<i>0.000009</i>	



## 6. Závěr

V teoretické části práce byla popsána veškerá problematika potřebná k pochopení následného praktického výzkumu. Byly popsány charakteristiky břízy, fyzikálně-mechanické vlastnosti dřeva i metodika k praktickému výzkumu. Poznatky vyplývající z praktické části, jsou shrnuty níže.

Vlivem termické úpravy u dřeva břízy docházelo ke změnám všech zkoumaných vlastností v relativně vysoké míře. Vybrané vlastnosti: hustota, tvrdost, barva a druhotně rozměry se měnily v závislosti na stupni tepelné úpravy.

Hustota klesala s rostoucí teplotou v řádech jednotek procent, a to především z důvodu snižování hmotnosti, zapříčiněné z velké míry snižováním rovnovážné vlhkosti. Ačkoliv u termovaného dřeva dochází i k rozměrovým změnám, to především ke zmenšování rozměrů v příčných směrech, pokles váhy je větší, a tudíž i hustota má sestupnou tendenci. Při zkoumání mechanických vlastností může mít tato skutečnost velký význam u vlastností, jejichž hodnoty neklesají s přibývajícím teplotou během termické úpravy. Vzhledem ke snížené hustotě můžeme díky procesu termické úpravy dostat materiál, který bude mít některé mechanické vlastnosti vztažené k hustotě materiálu lepší než dřevo neupravené. V této práci je takovou vlastností tvrdost, která při úpravě dřeva na teploty 160 °C a 170 °C výrazně vzrostla a vyjádřena k jednotce hustoty dosahuje ještě výraznějšího rozdílu oproti neupravenému materiálu.

Zvýšení tvrdosti bylo zaznamenáno u všech stupňů tepelných úprav. Se zvyšující se teplotou ovšem není rozdíl mezi neupraveným a upraveným dřevem tak výrazný, vlivem probíhajících chemických změn. Zvýšená tvrdost termicky modifikovaného dřeva může být přínosem například při aplikaci na podlahy, rámy oken, či terasy. V zásadě všude tam, kde je žádoucí ochránit celistvý povrch výrobku před vrypy. Ovšem smysluplně lze využít pouze tam, kde nebude termicky modifikované dřevo rizikové s ohledem na některé zhoršené mechanické vlastnosti. Na druhou stranu zvýšená tvrdost znesnadňuje opracovatelnost. Jako výhodné řešení se mi jeví nejdříve provést tvarovou úpravu a až následně termicky modifikovat na nižší tepelné stupně, zajišťující dobrý poměr zvýšení tvrdosti a

malého snížení, případně i lehkého zvýšení například pevnosti v ohybu a dalších vlastností.

Barva je vlastností obtížně hodnotitelnou. Při procesu hodnocení a výběru barevného odstínu hraje podstatnou roli estetické cítění, které může mít každý jedinec odlišné. Kolorimetrické parametry nám číselně vyjádřily jednotlivé barvy a ukázaly trend tmavnutí dřeva břízy v závislosti na zvyšování teploty v procesu termické úpravy. V praxi může tato skutečnost znamenat možnost přizpůsobení barvy levnějších dřevin dřevinám vyhledávanějším a více ceněným.

Tato práce přinesla zhodnocení vlastností hustoty, tvrdosti a barvy u dřeva břízy ( *Betula pendula* Roth.) před a následně po termické úpravě, která proběhla za působení teplot 160 °C, 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C. Výsledky práce pomohou s rozšířením znalostí o této dřevině, která je v České republice často velmi špatně využívána a skrývá v sobě potenciál, který se může projevit například aplikací procesu termické úpravy.

## 7. Použité zdroje

### Literatura

BLAŽEJ, Anton. *Chémia dreva*. Bratislava: Alfa, 1975.

CHANG, C.I. and KEITH, C.T. Properties of heat-darkened wood. II. Mechanical properties, 1978

and gluability. Report, Eastern Forest Products Laboratory, Canada, No. OPX214E.

ČUNDERLÍK, Igor. *Štruktúra dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009, 135 s. ISBN 978-80-228-2061-5.

GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-807-3753-122.

HILL, Callum A. S. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. Hoboken, NJ: John Wiley, c2006. ISBN 04-700-2172-1.

KAČÍKOVÁ, Danica a František KAČÍK. Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.

KOLLMANN, Franz. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. vyd. Berlin: Springer-Verlag, 1050 s., 1951.

MATOVIČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-715-7086-9.

MILLETT, M.A. and GERHARDS, G.C., Accelerated aging: residual weight and flexural properties of wood heated in air at 115 °C to 175 °C. *Wood Science*, 4(4), 1972, 193–201.

MUSIL, Ivan a Jana MÖLLEROVÁ. *Lesnická dendrologie*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2005. 216 s. ISBN 80-213-1367-6.

PÁNEK, Miloš a kol. Nátěry na dřevo a jejich testování. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2015. 111 s. ISBN 978-80-213-2548-7

POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993, 486 s. ISBN 80-07-00600-1.

REINPRECHT, Ladislav a Miloš PÁNEK. *Trvanlivost a ochrana dřeva*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2660-6.

REINPRECHT, Ladislav a Zuzana VIDHOLDOVÁ. *Termodrevo: Thermowood*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008, 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7.

ROWELL, Roger M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2, ilustrované vydání. University of Wisconsin, Madison.: CRC Press, 2012, 703 s. ISBN 9781439853818.

ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. *Stavba dřeva*. Dotisk 2005. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002. ISBN 80-715-7636-0.

ÚRADNÍČEK, Luboš a Petr MADĚRA. *Dřeviny České republiky*. Písek: Matice lesnická, 2001. 333 s. ISBN 80-86271-09-9.

ZEIDLER, Aleš a Vlastimil BORŮVKA. *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin – podklady pro cvičení*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. 89 s. ISBN 978-80-213-2674-3.

Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky: Report on the state of forests and forestry in the Czech Republic. Praha: Ministerstvo zemědělství v nakladatelství Lesnická práce, 2017, 2016. 128 s. ISBN 978-80-7434-389-6.

### **Elektronické dokumenty**

BORŮVKA, Vlastimil, Aleš ZEIDLER, Tomáš HOLEČEK a Roman DUDÍK, Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood. *Forests* [online]. 2018, 9(4) [cit. 2019-03-28]. DOI: 10.3390/f9040197. ISSN 1999-4907. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1999-4907/9/4/197>

BORŮVKA, Vlastimil, Roman DUDÍK, Aleš ZEIDLER a Tomáš HOLEČEK. Influence of Site Conditions and Quality of Birch Wood on Its Properties and Utilization after Heat Treatment. Part I—Elastic and Strength Properties, Relationship to Water and Dimensional Stability. *Forests* [online]. 2019, roč. 10, č. 2, s. 189. ISSN 1999-4907. [cit. 2019-03-28] Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/2/189/htm>

CHEN, Yao, et al. The effect of heat treatment on the chemical and color change of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood flour. *BioResources* [online]. 2012, 7(1), 1157-1170 [cit.2019-02-01]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-effect-of-heat-treatment-on-thechemical-and-color-change-of-black-locust-robinia-pseudoacacia-wood-flour/> . ISSN 19302126.

HERÄJÄRVI, Henrik. VARIATION OF BASIC DENSITY AND BRINELL HARDNESS WITHIN MATURE FINNISH *BETULA PENDULA* AND *B. PUBESCENS* STEMS. *WOOD AND FIBER SCIENCE* [online]. Joensuu, Finland, 2004(2), 12 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/207>

REISNER, Jan a Aleš ZEIDLER. Možnosti využití dřeva břízy. *Lesnická práce* [online]. 2010, 89(12/10) [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <http://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-89-2010/lesnicka-prace-c-12-10/moznosti-vyuziti-dreva-brizy>

*Thermowood Handbook* [online]. Helsinki, 2003 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>. Finnish Thermowood Association.

Zařazení v systému. BioLib [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.biolib.cz/cz/taxonposition/id3433/>

### **Technické normy**

ČSN EN 350 (490081): Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva. 2019, 60 s.

ČSN 49 0108: Zisťovanie hustoty. 1993

ČSN 49 0101: Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky. 1980

ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškách. 1979

ČSN 67 3075 (673075) Stanovení povrchové tvrdosti nátěru tužkami. 2013

ČSN 64 0128. Zkoušky Tuhých Nekovových Materiálů. Tvrdost Podle Brinella); Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: Praha, Česká republika. 1953

ČSN EN 1534 (492124). Dřevěné podlahoviny – Stanovení odolnosti proti vtisku – Metoda zkoušení. 2011

ČSN EN ISO 11664-4. Kolorimetrie – Část 4: Kolorimetrický prostor CIE 1976 L\*a\*b\*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, Česká republika. 2011

ČSN EN ISO 11664-6 (011720): Kolorimetrie – Část 6: CIEDE2000 vzorce výpočtu barevného rozdílu. 2017

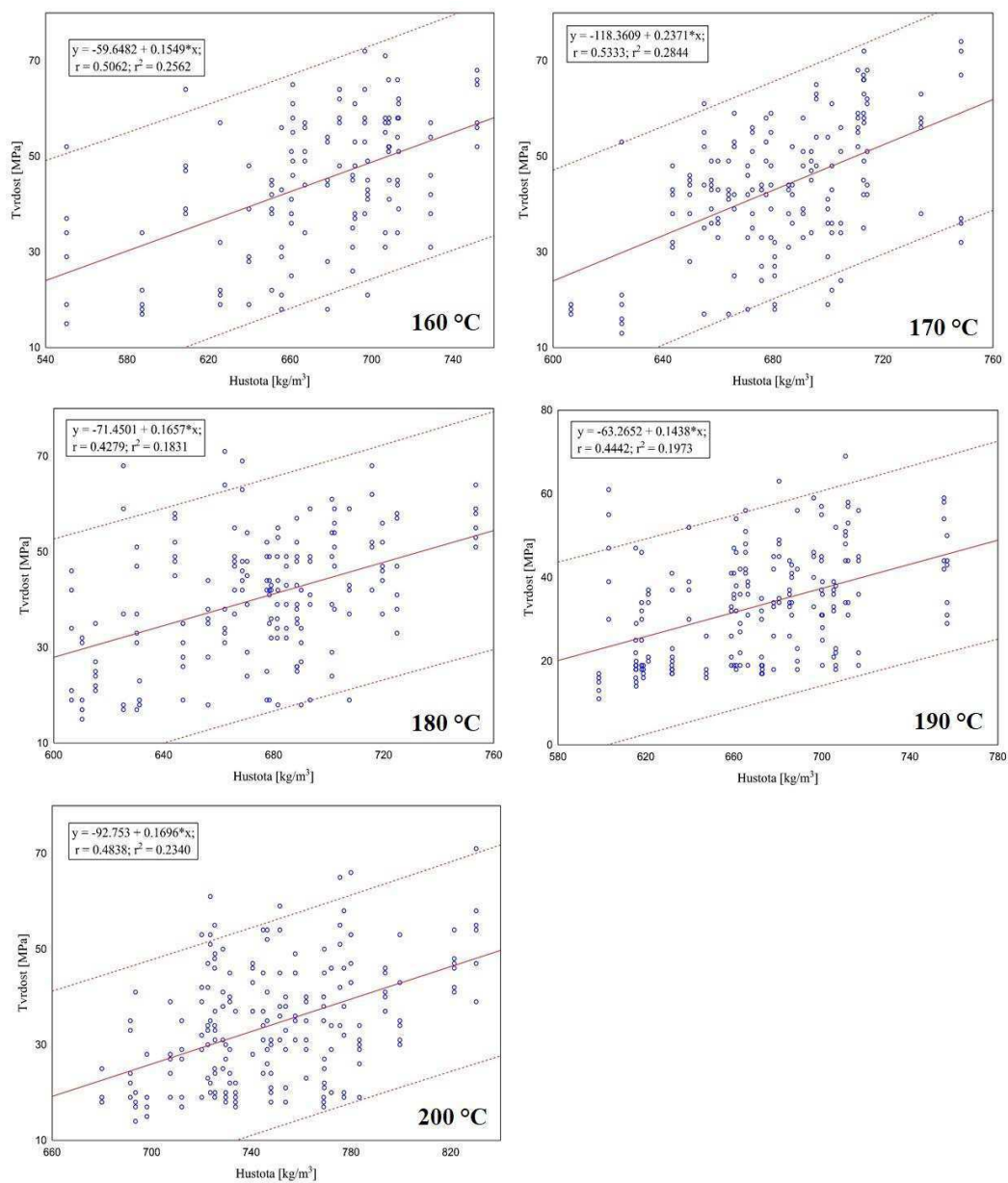
### **Patenty**

VIITANIEMI, P.; RANTA-MAUNUS, A.; JÄMSÄ, S.; Ek, P. Method for Processing of Wood at Elevated Temperatures. Patent EP-0759137 VTT, 1995.

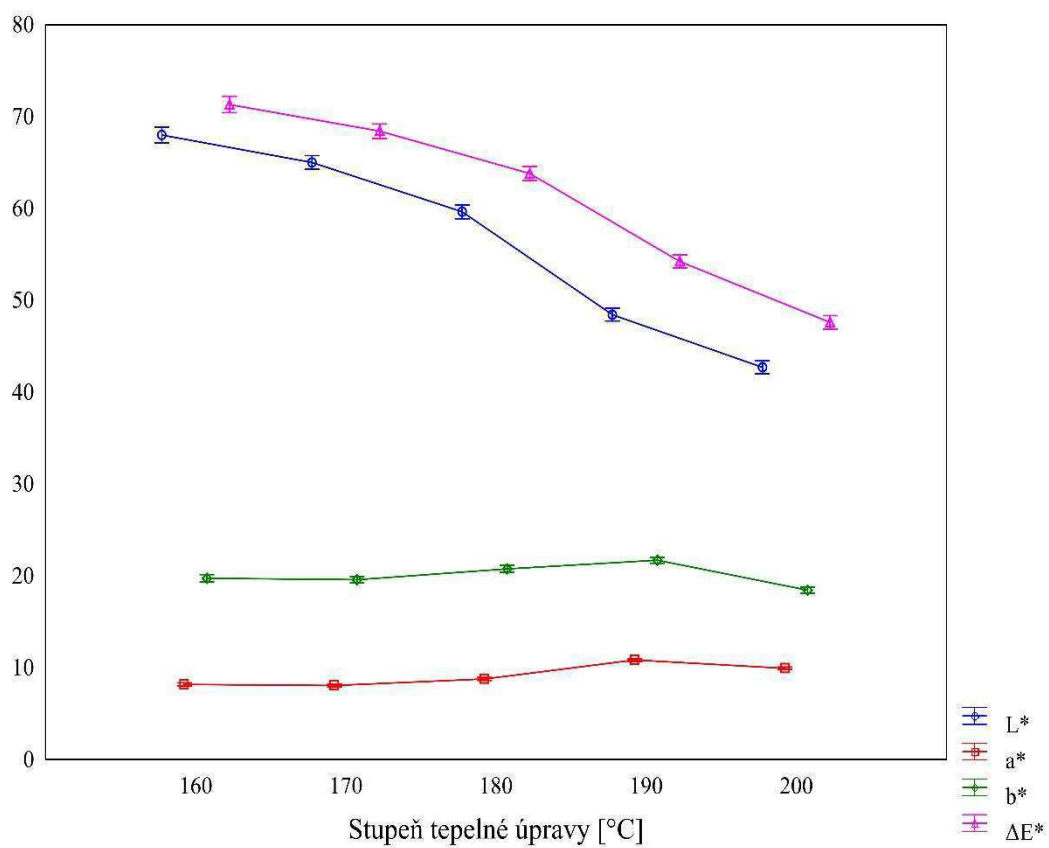
### **Seznam příloh**

Příloha 1 Závislost tvrdosti na hustotě u jednotlivých stupňů termické úpravy ...	47
Příloha 2 Změny jednotlivých kolorimetrických parametrů v závislosti na stupni termické úpravy.....	48

## 8. Přílohy



Příloha 1 Závislost tvrdosti na hustotě u jednotlivých stupňů termické úpravy



Příloha 2 Změny jednotlivých kolorimetrických parametrů v závislosti na stupni termické úpravy