

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Česká  
zemědělská  
univerzita  
v Praze

**POSOUZENÍ VLIVU TERMICKÉ MODIFIKACE NA TEPELNOU  
KONDUKTIVITU A DIFUZIVITU DŘEVA JEDLE OBROVSKÉ**

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF HEAT-TREATMENT ON THE THERMAL  
CONDUCTIVITY AND DIFFUSIVITY OF GRAND FIR WOOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

FILIP JANOUŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. VLASTIMIL BORŮVKA, PhD.

PRAHA 2022

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Filip Janoušek

Dřevařství  
Zpracování dřeva

Název práce

**Posouzení vlivu termické modifikace na tepelnou vodivost a difuzivitu dřeva jedle obrovské**

Název anglicky

**Assessment of the effect of heat-treatment on the thermal conductivity and diffusivity of Grand fir wood**

---

### Cíle práce

Cílem práce je posoudit vliv tepelné úpravy (180 °C a 200 °C) na součinitele tepelné a teplotní vodivosti dřeva jedle obrovské (*Abies grandis* Lindl.) z lokalit České republiky, i z pohledu jeho užitkových vlastností.

### Metodika

- 1) Zpracovat literární rešerši o dané dřevině, tepelné úpravě a posuzovaných vlastnostech.
- 2) Odebrat reprezentativní vzorníky z vybraných lokalit a připravit zkušební tělesa.
- 3) Přístrojem ISOMET 2114 (s použitím plošné sondy) změřit tepelné charakteristiky na zkušebních tělesech a poté provést jejich termickou úpravu procesem ThermoWood®. Následně opět realizovat měření tepelných charakteristik. Experimenty v každém případě zahrnují stanovení hustoty a vlhkosti před úpravou a po ní, a doporučuje se i zařazení měření barvy a lesku.
- 4) Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.
- 5) Pokusit se analyzovat rozdíly v tepelných charakteristikách dřeva před a po termické úpravě, jejich možné příčiny pro danou dřevinu, a to i z pohledu užitkových vlastností.

Harmonogram práce:

leden 2021 až duben 2021 – oficiální zadání práce do aplikace UIS

květen 2021 až prosinec 2021 – práce na literární rešerši

červenec 2021 až únor 2022 – příprava materiálu a experimentální část (měření a získávání dat)

listopad 2021 až březen 2022 – statistické vyhodnocení dat

únor 2022 až březen 2022 – stanovení závěrů a zhodnocení

březen 2022 až duben 2022 – finalizace práce a odevzdání práce do aplikace UIS

## **Doporučený rozsah práce**

40 – 50 stran (bez příloh)

## **Klíčová slova**

dřevo, tepelná úprava, jedle obrovská, tepelná vodivost, teplotní vodivost, objemová tepelná kapacita, variabilita vlastností

---

## **Doporučené zdroje informací**

BORŮVKA, V., BABIAK, M. (2016). Vlastnosti dřeva v příkladech, 1. vyd. Praha ČZU. 139 s.

BUCUR, V. (2003). Nondestructive Characterization and Imaging of Wood, Springer-Verlag, Germany. 354 s.

ČSN EN 12664. (2001). Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku – Suché a vlhké výrobky o středním a nízkém tepelném odporu.

ČSN EN 12667. (2001). Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku – Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu.

HILL, C.A.S. (2006). Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes, John Wiley & Sons: London, UK. 260 s.

ITA (International Thermowood Association). (2003). Thermowood Handbook; International

Thermowood Association: Helsinki, Finland; Dostupné online: [http://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw\\_handbook\\_080813.pdf](http://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf)

(přístupné k 1.2.2021).

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda. 485 s.

REINPRECHT, L. (2016). Wood Deterioration, Protection and Maintenance, John Wiley & Sons, Oxford, United Kingdom. 376 s.

ROHSENOW, W.M., HARTNETT, J.P., CHO, Y.I. (Ed.). (1998). Handbook of Heat Transfer, 3. vydání, McGraw-Hill Education: New York. 1520 s.

TSOUMIS, G. (1991). Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall. 497 s.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 1. 5. 2021

**Ing. Radek Rinn**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 01. 03. 2022

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „**Posouzení vlivu termické modifikace na tepelnou konduktivitu a difuzivitu dřeva jedle obrovské**“ 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 dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne .....

.....

Filip Janoušek

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za vstřícný přístup a poskytnutí četných doporučení a informací, ze kterých jsem čerpal v průběhu zpracování práce. Dále patří mé poděkování panu Ing. Davidu Novákovi za přípravu vzorků a panu Ing. Tomáši Holečkovi za provedení termické modifikace.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce popisuje změny ve vybraných tepelných a optických vlastnostech dřeva Jedle obrovské (*Abies grandis* Lindl.) po termické modifikaci metodou Thermowood při teplotách 180 °C a 200 °C s délkou hlavní fáze úpravy 3 hodiny. Vzorky dřeva pochází výhradně ze stromů vypěstovaných v českých podmínkách. Provedená měření zahrnovala koeficient tepelné vodivosti, koeficient teplotní vodivosti, objemovou tepelnou kapacitu, světlost, barvu, lesk a hustotu. Všechny tyto parametry byly termickou úpravou významně ovlivněny, přičemž výraznější dopad měl vyšší stupeň úpravy. Výsledky měření ukázaly pokles koeficientu tepelné vodivosti o 12 % při úpravě 180 °C a 16 % při 200 °C. Koeficient teplotní vodivosti naopak vykázal nárůst o 6 %, resp. 10 %. Objemová tepelná kapacita klesla až o čtvrtinu z původní hodnoty. Světlost, lesk i hustota shodně s teplotou klesaly a barva se přesouvala do hnědého spektra.

**Klíčová slova:** dřevo, tepelná úprava, jedle obrovská, tepelná vodivost, teplotní vodivost, objemová tepelná kapacita, variabilita vlastností

## **Abstract**

The bachelor thesis describes changes in selected thermal and optical properties of Grand fir wood (*Abies grandis* Lindl.) after thermal modification by Thermowood method at temperatures of 180 ° C and 200 ° C with the 3 hours long main phase. The wood samples come exclusively from trees grown in Czech conditions. The performed measurements included thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric heat capacity, brightness, colour, gloss, and density. All these parameters were significantly affected by the heat treatment, while with increasing heat treatment temperature the shift of the average values increased. The measurement results showed a decrease in the thermal conductivity by 12% when treated at 180 ° C and 16% at 200 ° C. On the other hand, the thermal diffusivity coefficient showed an increase of 6% and 10%, respectively. The specific heat capacity decreased by up to a quarter of the original value. The brightness, gloss and density decreased with the temperature and the colour shifted to the brown spectrum.

**Key words:** wood, heat treatment, Grand fir, thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric heat capacity, variability of properties



## Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Cíle práce .....	13
3.	Rozbor problematiky.....	14
3.1.	Jedle obrovská.....	14
3.2.	Tepelná modifikace dřeva.....	16
3.3.	Tepelné charakteristiky .....	20
3.4.	Optické charakteristiky .....	24
4.	Metodika .....	27
4.1.	Příprava vzorků.....	27
4.2.	Měření skupiny vzorků v surovém stavu .....	27
4.3.	Termická úprava metodou Thermowood.....	29
4.4.	Měření skupiny vzorků po úpravě .....	30
4.5.	Vyhodnocení získaných dat .....	30
5.	Výsledky a diskuse.....	31
5.1.	Koeficient tepelné vodivosti .....	32
5.2.	Koeficient teplotní vodivosti .....	34
5.3.	Objemová tepelná kapacita .....	35
5.4.	Barva .....	36
5.5.	Lesk.....	39
5.6.	Hustota .....	41
6.	Závěr .....	43
7.	Citovaná literatury.....	44
8.	Přílohy .....	48

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Přirozený výskyt jedle obrovské .....	14
Obrázek 2: Jedle obrovská – arboretum Bukovina, Sedmihorky.....	14
Obrázek 3: Dřevo jedle obrovské.....	15
Obrázek 4: Dřevo jedle obrovské, příčný řez, zvětšeno 10x.....	15
Obrázek 5: Barevné změny při různých teplotách úpravy metodou ThermoWood...	17
Obrázek 6: Vizualizace barevného prostoru CIELab.....	25
Obrázek 7: Měření tepelných charakteristik .....	28
Obrázek 8: Ukázka barevných změn.....	39

## Seznam grafů

Graf 1: Příklad průběhu teplot při modifikaci Thermowood .....	19
Graf 2: Vliv teploty a vlhkosti dřeva na tepelnou vodivost .....	21
Graf 3: Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě a vlhkosti dřeva .....	23
Graf 4: Průběh teplot v tepelné komoře .....	29
Graf 5: Vliv tepelné modifikace na koeficient tepelné vodivosti .....	33
Graf 6: Vliv tepelné modifikace na koeficient teplotní vodivosti.....	35
Graf 7: Vliv tepelné modifikace na objemovou tepelnou kapacitu.....	36
Graf 8: Vliv tepelné modifikace na světlost (parametr L) .....	37
Graf 9: Vliv tepelné modifikace na barvu.....	39
Graf 10: Vliv tepelné modifikace na lesk .....	40
Graf 11: Vliv tepelné modifikace na hustotu .....	42

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání měrné tepelné kapacity pro 0 °C a 50 °C. ....	22
Tabulka 2: Procentuální porovnání výsledků s referenčními hodnotami .....	31
Tabulka 3: Výsledné hodnoty koeficient tepelné vodivosti.....	32
Tabulka 4: Udávané hodnoty tepelné vodivosti pro jehličnaté dřeviny.....	32
Tabulka 5: Výsledné hodnoty koeficient teplotní vodivosti .....	34
Tabulka 6: Výsledné hodnoty objemová tepelná kapacita.....	35
Tabulka 7: Výsledné hodnoty světlost .....	37
Tabulka 8: Výsledné hodnoty barva .....	38
Tabulka 9: Výsledné hodnoty lesk.....	40
Tabulka 10: Výsledné hodnoty hustota.....	41

## Seznam příloh

Příloha 1: Vývoj koeficientu teplotní vodivosti po tepelné modifikaci .....	48
Příloha 2: Vývoj koeficientu tepelné vodivosti po tepelné modifikaci.....	48
Příloha 3: Vývoj objemové tepelné kapacity po tepelné modifikaci .....	48
Příloha 4: Vývoj hustoty po tepelné modifikaci .....	48
Příloha 5: Vývoj lesku po tepelné modifikaci.....	49
Příloha 6: Vývoj světlosti po tepelné modifikaci.....	49
Příloha 7: Vývoj barvy po tepelné modifikaci .....	49

## Seznam zkratk

resp.	respektive
např.	například
viz.	rozkazovací způsob slovesa vidět
tzv.	tak zvaný
příp.	případně
apod.	a podobně
aj.	a jiné
et al.	a kolektiv
mj.	mimo jiné
°C	Celsiův stupeň
K	Kelvin – jednotka termodynamické teploty
m	metr
mm	milimetr
kg	kilogram
g	gram
m <sup>3</sup>	kubický metr
m <sup>2</sup>	čtvereční metr
$\rho$	ró – hustota
V	objem
$\alpha$	alfa – koeficient tepelné vodivosti
$\lambda$	sigma – koeficient teplotní vodivosti
W	watt
J	joule
ha	hektar

## 1. Úvod

Jedle obrovská (*Abies grandis* Lindl.) je k nám introdukovaná dřevina s nejvyšším potenciálem produkce ve střední Evropě. Ve vhodných podmínkách svou rychlostí růstu dokáže předčít i douglasku tisolistou, která je považována za dřevinu s největším ročním přírůstkem dřeva. Její růstové možnosti, vliv na přírodu a možnosti využití dřeva se u nás zkoumají již několik desetiletí. (Zeidler et al. 2010; Fulín et al. 2013). Dřevo jedle obrovské má nízkou hustotu a pevnost v tahu, nicméně dobrá pevnost v ohybu a tlaku umožňuje jeho využití pro stavební účely (Hofman 1963). Zároveň má toto dřevo velmi nízký obsah pryskyřice a je tak vhodným kandidátem pro termickou úpravu.

Termická modifikace dřeva je vědecky zkoumaná od 30. let minulého století. Původ této metody dohledáme v Německu a dnes se nejvíce prosazuje ve Finsku, Nizozemsku a Francii. Byly patentovány různé metody úpravy s odlišnými postupy, z nichž dnes je nejrozšířenější metoda ThermoWood, původem z Finska (ITA 2003). Všechny metody však mají společný princip – pomocí vysoké teploty dosáhnout určitých chemických změn ve dřevě za účelem snížení rovnovážné vlhkosti dřeva, zvýšení odolnosti především vůči biotickým činitelům a případně změny estetických vlastností (Hill 2006). Mezi časté použití tepelně modifikovaného dřeva patří obklady stěn, saunové obklady, nebo terasové podlahy. V těchto aplikacích nás mimo jiné zajímá schopnost dřeva vést, resp. izolovat teplo a zároveň jak je dřevo „teplé“ na dotyk. (ITA 2021, Hill 2006)

Toto chování popisujeme třemi tepelnými charakteristikami. Tepelná vodivost určuje, kolik tepla projde materiálem, objemová tepelná kapacita popisuje, kolik tepla je materiál schopný v sobě akumulovat a teplotní vodivost říká, jak rychle materiál vyrovnává teplotní změny. Především zjištěním těchto charakteristik u termicky modifikovaného dřeva se tato práce bude zabývat.

Předpokladem je, že tepelná modifikace zapříčiní snížení průchodu tepla dřevem, tedy že dojde k významnému poklesu tepelných charakteristik. Rovněž se očekává snížení hustoty a zhnědnutí dřeva, tedy pokles světlosti a posun barvy ve směru k červenožluté.

## 2. Cíle práce

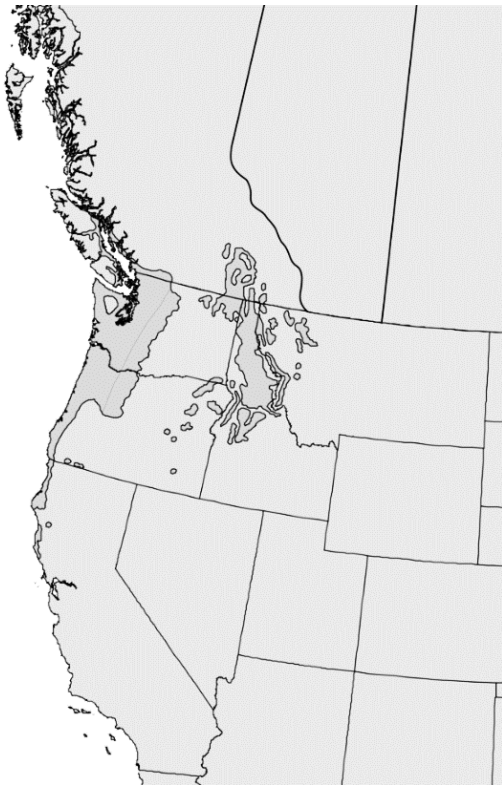
Primárním cílem bakalářské práce je změření součinitele tepelné vodivosti, součinitele teplotní vodivosti a objemové tepelné kapacity dřeva jedle obrovské (*Abies grandis* Lindl.) v neupraveném stavu a po termické modifikaci při 180 °C a 200 °C. Následně bude ze získaných dat vytvořeno grafické znázornění změn těchto veličin v závislosti na teplotě úpravy. Vedlejšími hodnocenými veličinami jsou parametry barvy, lesk a hustota (termo)dřeva.

### 3. Rozbor problematiky

#### 3.1. Jedle obrovská

Jedle patřila po staletí mezi nejdůležitější evropské dřeviny. Na našem území historicky dominovala Jedle bělokorá (*Abies alba* Mill.), která však od 18. století začala z našich lesů postupně mizet. Mezi hlavní důvody patřila zvýšená těžba dřeva pro potřeby průmyslu, nižší konkurenceschopnost jedle vůči jiným dřevinám a velmi nízký zájem o výsadbu jedle (Fulín 2016). Ústup jedle dále sílil v 19. a 20. století, mezi lety 1950-1990 byl podíl jedle bělokoré v lesích ČR pouze 0,2 % (Apltaufer 2018). V tomto období se z důvodu obav o zachování diverzity lesů a příznivých vlastností jedle dostala do popředí otázka výsadby některých cizokrajných druhů jedlí, mimo jiné právě jedle obrovské. Nicméně v posledních letech zažívá jedle bělokorá renesanci a dnes se chlubí 4% zastoupením v nově vysazených českých lesích (Apltaufer 2018).

První zmínky o jedli obrovské (*Abies grandis* Lindl.) se objevují kolem roku 1805, kdy byla poprvé pozorována badateli Lewisem a Clarkem. Jejich objev však nebyl zachován, a tak tuto jedli v roce 1830 znovu objevil David Douglas. (Fulín 2016; Úředníček 2014). Nakonec v roce 1833 tuto jedli zkoumal a popsal John Lindley a pojmenoval ji Grand fir, tedy jedle obrovská (Beran 2006).



Obrázek 1: Přirozený výskyt Jedle obrovské (Elbert L. Little 1971)



Obrázek 2: Jedle obrovská – arboretum Bukovina, Sedmihorky (Jan Pokorný 2006)

Jedle obrovská (*Abies grandis* (Douglas ex D.Don) Lindl.) je jehličnatá dřevina rodu *Abies*. Přírodní výskyt této jedle se rozprostírá na severozápadním pobřeží severní Ameriky, v pěti státech USA a v Britské Kolumbii v Kanadě, rozlohu území výskytu jedle obrovské zachycuje obrázek 1. (Beran 2006). Do českých zemí byla jedle obrovská dovezena v roce 1839, a to do zámeckého parku Sychrov. Dále byla vysazována jako okrasná dřevina do parků a zahrad (např. arboretum Bukovina (viz. obrázek 2), Kostelec nad Černými lesy, Řícmanice, a Křtiny). Od dvacátých let minulého století se Jedle obrovská začala zapojovat i do lesnické praxe (Úředníček 2014). Od roku 1961 se na našem území provádějí provenienční pokusy. Doposud bylo založeno 11 testovacích ploch o celkové rozloze 5,88 ha (Fulín et al. 2013).

Jedle obrovská se řadí mezi nejvyšší stromy světa, na přirozeném území dosahují tyto stromy výšky 60-70 m, výjimečně až 100 m, v českých podmínkách však dorůstají pouze kolem 45 m (Úředníček 2014). Průměr kmene dosahuje 1-1,2 metru. Tento druh jedle se zároveň pyšní vysokou rychlostí růstu, oproti smrku má až trojnásobnou objemovou produkci a výškový přírůst v mladých letech může v ideálních podmínkách přesáhnout jeden metr (Lukášek 2012; Úředníček 2014).

Dřevo jedle obrovské je bez znatelného jádra, bez pryskyřičných kanálek i smolníků, má světlou barvu, od téměř bílé až ke hnědošedé (viz. obrázek 3). Zóna bělového dřeva je barevně odlišitelná pouze krátce po skácení díky vyšší vlhkosti jádra. Dřevo je měkké



Obrázek 3: Dřevo jedle obrovské (Meier 2015)



Obrázek 4: Dřevo jedle obrovské, příčný řez, zvětšeno 10x (Meier 2015)

a lehké, díky čemuž se snadno suší a opracovává, také je lehce štípatelné a je hodnoceno jako netrvanlivé. Letokruhy bývají široké s pozvolnými přechody, na obrázku 4 je zachycen příčný řez v desetinásobném zvětšení. (Hofman 1963). Hustota dřeva se v původních lokalitách pohybuje kolem  $370 \text{ kg/m}^3$ , v českých podmínkách dosahuje průměrně  $415 \text{ kg/m}^3$  při 12% vlhkosti, Meier (2015) uvádí hustotu suchého dřeva dokonce až  $450 \text{ kg/m}^3$ . (Úřadníček 2014; Hofman 1963; Meier 2015)

V oblastech přirozeného výskytu je dřevo jedle obrovské nejčastěji využíváno pro výrobu papíru a buničiny, zejména pro nízký obsah pryskyřice, délku dřevního vlákna kolem 3,2 mm a světlou barvu dřeva (Hofman 1963). Díky absenci pryskyřičných kanálek a rovnoměrnému průběhu vláken dosahuje dřevo jedle obrovské dobrých výsledků při lepení a povrchových úpravách. Mimo to lze dřevo využít i pro stavební účely, oproti našim domácím dřevinám sice vykazuje jedle obrovská nižší pevnost v tahu ( $60,3 \text{ MPa}$ ) a rázu, avšak pevnost v tlaku je srovnatelná s našimi dřevinami ( $35,9 \text{ MPa}$ ) a modul pružnosti v ohybu může být dokonce vyšší ( $10,55 \text{ GPa}$ ). (Meier 2015; Zeidler, Borůvka 2016; Hofman 1963)

### 3.2. Tepelná modifikace dřeva

Termická modifikace je jednou z nejjednodušších a relativně nejlevnějších způsobů ochrany dřeva. Tímto procesem můžeme značně snížit sorpční schopnosti dřeva, tedy snížit rovnovážnou vlhkost dřeva při konstantních vnějších podmínkách. Díky tomu se sníží rozměrové změny dřeva vlivem vlhkosti až o polovinu a zároveň se zvýší odolnost vůči biotickým činitelům (Požgaj et al. 1993; Reinprecht 2016).

*„Tepelná úprava dřeva je založena na tepelných a hydrotermálních úpravách dřeva při vysokých teplotách od 160 do 260 °C. Při vysokých teplotách dřevěné polymery, zejména hemicelulózy, mění svou strukturu v důsledku hydrolytických, dehydratačních a síťovacích reakcí. Ve dřevě vznikají různé hydrofobní, ve vodě nerozpustné látky, ale i látky s toxickým nebo repelentním účinkem na biologické škůdce.“* (Reinprecht 2016)

Jednou z největších výhod této metody je její ekologická nezávadnost. Pro samotnou úpravu nejsou zapotřebí žádné chemikálie a dřevo takto upravené můžeme na konci životnosti zlikvidovat bez většího zatížení životního prostředí, než by mělo nemodifikované dřevo. Další nespornou výhodou je trvanlivost této modifikace díky tomu, že změny v chemických vazbách probíhají v celém průřezu dřeva, naproti tomu povrchové úpravy (např. nátěry) časem degradují (Hill 2006). V neposlední řadě dochází ke ztmavnutí dřeva v celém objemu, takže se tato metoda využívá i s estetickými záměry,



neboť nemůže dojít k poškození barvy např. broušením. Při působení UV záření však barva šedne stejně jako u neupraveného dřeva, byť pomaleji. Vliv různých teplot na barvu dřeva zachycuje obrázek 5. Jednou z hlavních nevýhod tepelné modifikace je pak snížení mechanických vlastností úměrně k použité teplotě, rázová houževnatost a pevnost v ohybu se sníží obvykle o 10-30 %. Mez pevnosti klesá o 5-30 %, naopak modul pružnosti se může zvýšit až o 15 %. (Reinprecht, Vidholdová 2008; Reinprecht 2016; ITA 2021).



*Obrázek 5: Barevné změny při různých teplotách úpravy metodou ThermoWood (ITA 2003)*

V procesu termické modifikace dřeva vystupují tři základní parametry – teplota, čas a typ prostředí. Teplota se pohybuje běžně od 160 do 260 °C. Teplota nižší než 140 °C způsobuje jen malé změny v materiálu a celý proces se stává neefektivním, naproti tomu teploty blízké se k 300 °C způsobují významnou degradaci materiálu (Hill 2006). Při teplotách kolem 150 °C začíná dřevo zřetelně hnědnout a uvolňují se plyny CO<sub>2</sub> a hořlavý CO. Zároveň začíná probíhat pyrolýza hemicelulózy. Při dosažení 200 °C začíná dřevo uhelnatět a je snadno zapalitelné, ke samovznícení však dochází teprve kolem teplot 260 až 290 °C. Celulóza se začíná rozkládat při teplotách nad 240 °C, lignin nad 280 °C. Po překročení 400 °C již dřevo zcela ztrácí pevnost z důvodu rozkladu vláknité struktury. (Borůvka, Babiak 2016)

Čas působí podobně jako teplota, tedy se zvyšujícím se časem se zvyšuje i intenzita modifikace, tyto dva parametry se tak mohou do značné míry zastupovat. Běžně se časy hlavní fáze úpravy pohybují od 15 minut do 24 hodin (Reinprecht 2016). Prostředí, ve kterém se proces odehrává, má pak zásadní vliv na rychlost přenosu tepla do dřeva, a především zabraňuje přístupu kyslíku a s tím spojené oxidaci dřeva. Jen zřídka se tedy pracuje v atmosféře. Nejčastěji se setkáme s vodní parou, mezi další možnosti patří

vakuum, tekuté kovy, dusík, nebo olej, který může navíc do dřeva navázat určité látky podporující odolnost vůči biotickým i abiotickým činitelům. (Hill 2006)

Termicky modifikované dřevo získává odolnost zejména vůči celulózo- a ligninovým houbám a plísním, vůči hmyzu bývá zvýšení odolnosti menší, ba dokonce může dojít ke snížení odolnosti (např. vůči termitům). Přesto je však obecně toto dřevo hodnoceno třídou 1, tedy velmi trvanlivé, nebo 2 – trvanlivé. Termodřevo není vhodné pro kontakt se zemí, byť i zde dosahuje výrazně lepších výsledků v porovnání s neupraveným dřevem. Odolnost vůči ohni se výrazně nemění. (Hill 2006; Reinprecht 2016)

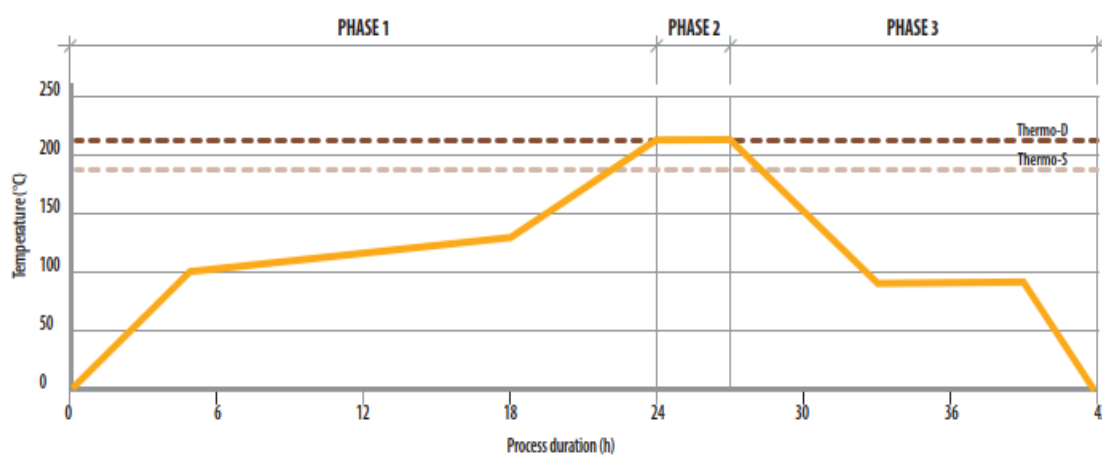
V dnešní době bylo vyvinuto mnoho patentovaných postupů, které se liší i dalšími parametry krom výše zmíněných (např. vstupní vlhkostí dřeva). Mezi nejvýznamnější řadíme tyto: ThermoWood<sup>®</sup>, Plato<sup>®</sup> Wood, OHT a Rectification<sup>®</sup>. V této práci bylo dřevo upraveno metodou Thermowood, k ostatním tedy pouze stručně.

*PlatoWood* je původem z Nizozemí a sestává ze čtyř fází. V první fázi je dřevo po dobu 4 až 5 hodin vystaveno ve vodní páře teplotám 150 až 190 °C a dochází k hydrotermolýze. Druhou fází je sušení dřeva na vlhkost 8 až 10 %, což může trvat několik dní. Ve třetí fázi je dřevo stabilizováno v suchém prostředí opět při 150 až 190 °C po dobu 12 až 14 hodin. Poslední fází je aklimatizace dřeva na rovnovážnou vlhkost, což trvá obvykle 3 dny. Ošetřené dřevo má lepší přídržnost standardních lepidel (PVAC, PU atd.) a vyšší odolnost alkydových nátěrů. (Hill 2006; Reinprecht 2016)

*OHT* bylo vyvinuto v Německu a jeho podstatou je úprava dřeva v olejové lázni. Nejčastěji se používá lněný a řepkový olej ohříváný na 200 až 220 °C. Takto extrémně vysoké teploty jsou možné díky téměř nulovému přístupu kyslíku, a tedy nízké termooxidaci dřeva. Dřevo je udržováno na cílové teplotě 2 až 4 hodiny a celý proces včetně ohřívání a chlazení trvá kolem 18 hodin v závislosti na rozměrech dřeva. Zajímavých výsledků je dosahováno s modifikovanými oleji, které mohou částečně proniknout do buněčných stěn a dodatečně zvýšit odolnost dřeva. Modifikované dřevo má sametově hnědou barvu bez anomálií. (Hill 2006; Reinprecht 2016)

*Rectification* je technologie z Francie. Dřevo vysušené na 12% vlhkost je modifikováno v prostředí dusíku při teplotě 210 až 260 °C. Při těchto teplotách dochází k částečné pyrolýze, avšak bez termooxidačních reakcí. Pevnost dřeva se snižuje pouze mírně, kromě pevnosti v ohybu, která klesá až o 40 %. Vlivem intenzivního vylučování pryskyřice je však výrazně snížena adheze nátěrových hmot. (Hill 2006; Reinprecht 2016)

*ThermoWood* je původem z Finska a dnes je nejrozšířenější metodou úpravy dřeva. Tato technologie využívá prostředí vodní páry, pomocí které se udržuje obsah kyslíku na 3 až 5 %. Celý proces má tři fáze: sušení, modifikace a ochlazení. Průběh teplot v těchto fázích ukazuje graf 1. Ve fázi sušení je teplota za přítomnosti páry rychle zvýšena na hranici 100 °C, poté se teplota zvedá velmi pomalu až ke 130 °C. Tato fáze je časově nejnáročnější a jejím výsledkem je dřevo usušené téměř na nulovou vlhkost. V průběhu rychlého sušení je pomocí páry regulována rychlost odpařování vody pro zamezení poškození dřeva. Ve druhé fázi teplota opět prudce stoupá až na cílovou teplotu 185 °C, nebo 230 °C, na této teplotě je dřevo udržováno po dobu 2 až 3 hodin. V poslední fázi je teplota snížena na 80 až 90 °C, kdy se pomocí rozprašování vody zvyšuje vlhkost dřeva na 4 až 7 % a dřevo se dále ochlazuje. (ITA 2003; Reiprecht 2016; Hill 2006)



*Graf 1: Příklad průběhu teplot při modifikaci Thermowood (ITA 2021)*

Rychlost změn teplot i vlhkosti musí být pečlivě nastaven pro konkrétní dřevinu, rozměry dřeva a počáteční vlhkost, aby se předešlo praskání či jinému poškození dřeva (ITA 2003). V technologii Thermowood byly vyvinuty dva standardy, Thermo-S a Thermo-D, které se liší především cílovou teplotou modifikace. Thermo-S (stability) je zaměřený na interiérové výrobky a cílem této úpravy je omezit rozměrové změny dřeva vlivem vlhkosti. Cílová teplota je přibližně 185 °C, což způsobuje pouze menší změny ve dřevě. Používá se např. na podlahy, obklady, nebo kuchyňský nábytek. Thermo-D (durability) se zaměřuje na odolnost dřeva. Teplota hlavní fáze může dosáhnout až 215 °C, což způsobuje vyšší odolnost vůči hnilobě i houbám, zároveň však dochází k výraznějšímu ztmavnutí a snížení mechanických vlastností. Takové dřevo je možné bez dalších úprav použít v exteriéru, ne však v kontaktu se zemí, např. okna, dveře, sauny, dětská hřiště (ITA 2003; Hill 2006).

### 3.3. Tepelné charakteristiky

Teplo ve dřevě ovlivňuje mnoho procesů a vlastností – hygroskopicitu, vlhkostní bobtnání i sesychání, mechanické vlastnosti, akustické a elektrické vlastnosti i další. Mimo to rozlišujeme ve dřevě i vlastnosti, které souvisí výhradně s teplem, např. teplotní roztažnost, zápalnost, výhřevnost a pro tuto práci především důležitou tepelnou vodivost, teplotní vodivost a měrnou tepelnou kapacitu. (Tsoumis 1991)

Obecně rozlišujeme tři způsoby přenosu tepla: vedení (kondukce), proudění (konvece) a sálání (radiace). Vedení představuje přenos energie hmotným prostředím, jehož objemové elementy zůstávají v klidu. Proudění probíhá rovněž v hmotném prostředí, avšak jednotlivé elementy vykonávají translační pohyb. Sálání nepotřebuje hmotné prostředí a může tak jako jediné probíhat i ve vakuu, tepelná energie je přenášena zářením. Ve dřevě se proudění a sálání projevuje velmi málo, a tak je můžeme zanedbat bez větší odchylky. Díky tomuto zjednodušení můžeme pohyb tepla ve dřevě při stacionárních podmínkách vyjádřit tzv. Fouriérovým zákonem ve tvaru:

$$q = -\lambda \nabla t$$

kde  $q$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) je hustota tepelného toku,  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) je koeficient tepelné vodivosti a  $\nabla t$  ( $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ ) je gradient teplot na délce. (Borůvka, Babiak 2016; Požgaj et al. 1993)

#### Tepelná vodivost

Tepelná vodivost (označována též jako tepelná konduktivita) vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo, přesněji řečeno popisuje množství tepla, které projde jednotkovou plochou za jednotku času, když na jednotkové délce je stálý teplotní rozdíl 1 K. Tepelnou vodivost vyjadřujeme tzv. koeficientem tepelné vodivosti ( $\lambda$ ) s jednotkou  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tento koeficient popisuje stacionární podmínky, v praxi to znamená např. tepelné ztráty dřevěné stěny, pokud je venku i uvnitř konstantní teplota (únik tepla kompenzujeme vytápěním). (Borůvka, Babiak 2016; Požgaj et al. 1993)

Tepelná vodivost je ovlivňována mnoha faktory, např. stavbou dřeva (zejména sklonem mikrofibril od podélné osy a podílem jarního a letního dřeva), hustotou, obsahem vody a extraktiv, výskytem vad. Výrazně ji ovlivňuje i teplota a směr, ve kterém měříme, v podélném směru je tepelná vodivost dvakrát vyšší oproti příčným směrům z důvodu vláknité struktury dřeva. Odlišnost radiálního a tangenciálního směru není významná, byť v radiálním směru může tepelná vodivost nabývat lehce vyšších hodnot (5-10 %) díky dřeňovým paprskům. (Tsoumis 1991; Borůvka, Babiak 2016)

Při teplotě 20 °C uvádí Tsoumis (1991) průměrné hodnoty pro všechny dřeviny:

v podélném směru	0,191-0,284 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ,
v radiálním směru	0,104-0,151 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ,
v tangenciálním směru	0,090-0,140 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> .

Číselně můžeme vyjádřit koeficient tepelné vodivosti  $\lambda$  (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) podle Borůvky a Babiaka (2016) takto:

$$\lambda = \rho_r(0,2 + 0,0038w) + 0,024$$

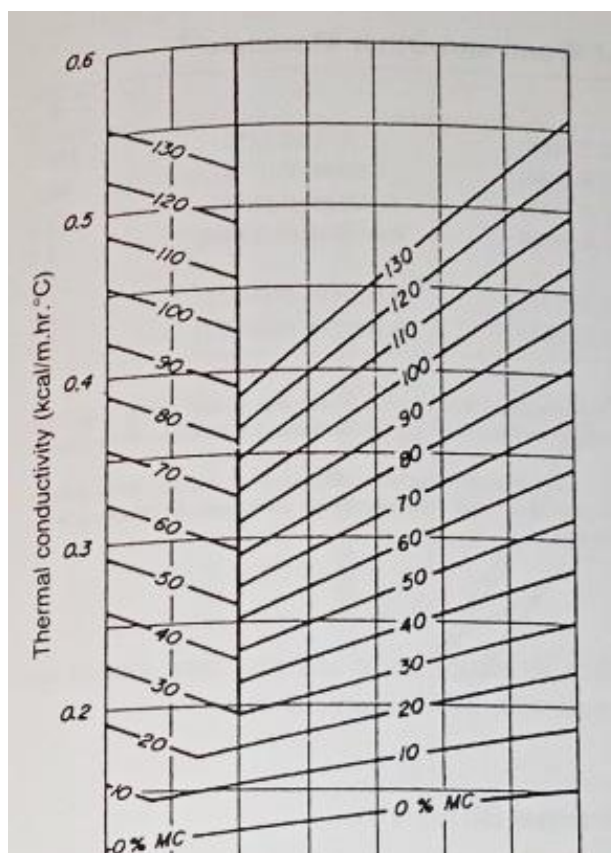
kde  $\rho_r$  (g.cm<sup>-3</sup>) je redukovaná hustota dřeva a  $w$  (%) je vlhkost dřeva, přičemž tento vztah platí, pokud je vlhkost dřeva nižší než 40 %, pro ostatní případy násobíme vlhkost  $w$  koeficientem 0,0052 namísto 0,0038.

Tsoumis (1991) udává pro výpočet tepelné vodivosti vzorec:

$$\lambda = \rho_0(1,39 + 0,038w) + 0,165$$

kde  $\lambda$  (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) je koeficient tepelné vodivosti,  $\rho_0$  (g.cm<sup>-3</sup>) je hustota absolutně suchého dřeva a  $w$  (%) je vlhkost dřeva.

Tepelná vodivost roste úměrně s hustotou, vlhkostí a teplotou, přičemž tento vztah je lineární. Vliv teploty a vlhkosti dřeva zachycuje graf 2.



Graf 2: Vliv teploty a vlhkosti dřeva na tepelnou vodivost (bříza, radiální směr, hustota 515 Kg/m<sup>3</sup>) (Tsoumis 1991)

## Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita, někdy označována jako specifická tepelná kapacita vyjadřuje množství tepla, které musíme materiálu o jednotkové hmotnosti dodat (resp. odebrat), aby se jeho teplota změnila o 1 K. Značíme ji  $c$  a jednotku má  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Pro výpočet platí jednoduchý vzorec:

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}$$

kde  $Q$  (J) je množství tepla,  $m$  (kg) hmotnost dřeva a  $\Delta t$  (K) je rozdíl teplot. (Borůvka, Babiak 2016; Požgaj et al. 1993)

Pokud je dřevo absolutně suché, rovná se hmotnost dřeva hmotnosti dřevní substance, jejíž měrná tepelná kapacita je podobně jako hustota pro všechny dřeviny konstantní. Měrná tepelná kapacita závisí pouze na teplotě a vlhkosti dřeva. Pro závislost na teplotě bylo v historii provedeno mnoho experimentů, jejíž hodnoty se někdy výrazně lišily. Obecný vzorec vypadá vždy následovně:

$$c_0 = A + B \cdot t$$

kde koeficient  $A$  představuje měrnou tepelnou kapacitu při 0 °C a koeficient  $B$  následně určuje strmost linie,  $t$  je teplota ve °C. Tabulka 1 porovnává koeficienty  $A$  a  $B$  a výsledky této rovnice podle různých výzkumů. Vztah teploty a tepelné kapacity je lineární, takže střední hodnota měrné tepelné kapacity při určitém rozsahu teplot je rovna hodnotě teploty uprostřed tohoto rozsahu, např. při rozsahu 0-100 °C odpovídá výsledná kapacita teplotě 50 °C. (Borůvka, Babiak 2016; Požgaj et al. 1993; Radmanović et al. 2014).

*Tabulka 1: Porovnání měrné tepelné kapacity pro 0 °C ( $A$ ) a koeficient přírůstku na 1 °C ( $B$ ),  $C_0$  je výsledek z předchozí rovnice pro interval teplot 0-100 °C. Data převzata od Radmanović et al. (2014) a Požgaj et al. (1993)*

<b>Autor</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b><math>C_0</math> (50 °C), <math>\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}</math></b>
Volbehr (1896)	1,084	0,00506	1,337
Dunlop (1912)	1,114	0,00486	1,356
Kanter (1957)	1,549	0,00502	1,800
Perelygin (1965)	1,571	0,00277	1,710
Kolmann (1968)	1,117	0,00487	1,361
Koch (1969)	1,110	0,00420	1,320

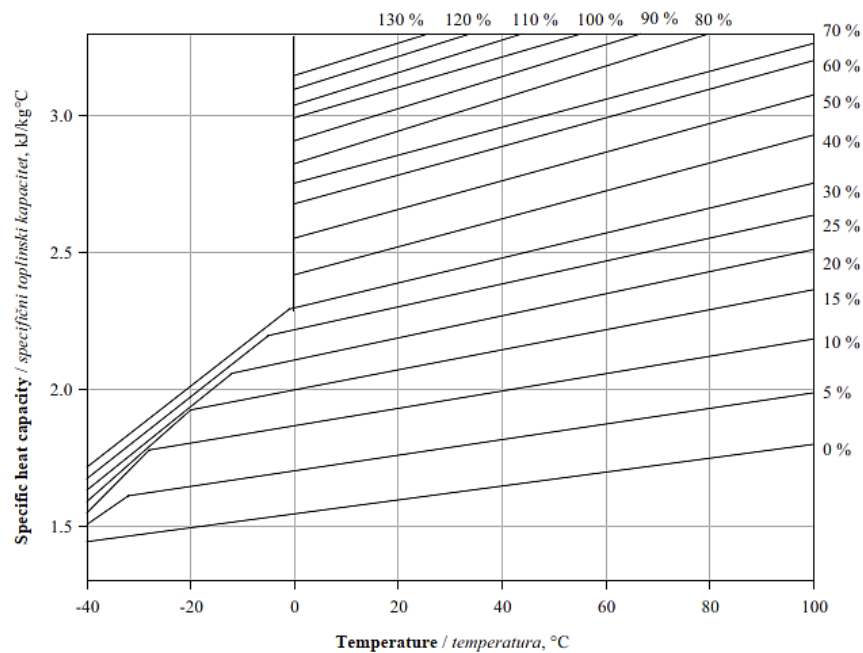
Jak je vidět z tabulky 1, většina hodnot je jen lehce odlišná, přičemž jako nejrelevantnější jsou brány hodnoty Dunlopa a Kolmanna. Oproti tomu Kanter

a Perelygin uvádějí výrazně odlišné hodnoty, což bylo způsobeno odlišnou metodikou měření. (Radmanović et al. 2014)

Měrnou tepelnou kapacitu vlhkého dřeva ( $c_w$ ) zjišťujeme z měrné tepelné kapacity suchého dřeva a vody podle směšovacího pravidla:

$$c_w = \frac{c_0 + w \cdot c_v}{1 + w}$$

kde  $C_v$  je měrná tepelná kapacita vody ( $4,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) a  $w$  značí absolutní vlhkost dřeva v  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ . Jak měrnou tepelnou kapacitu ovlivňuje teplota a vlhkost dřeva zachycuje graf 3. (Borůvka, Babiak 2016; Požgaj et al. 1993, Radmanović et al. 2014)



Graf 3: Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě a vlhkosti dřeva (Radmanović et al. 2014)

Vedle měrné tepelné kapacity můžeme alternativně zjišťovat tzv. objemovou tepelnou kapacitu, což je měrná tepelná kapacita vztažená na jednotku objemu. Značíme ji  $c_{ob}$ , jednotku má  $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$  a s měrnou tepelnou kapacitou má platný vztah:

$$c_{ob} = \rho \cdot c$$

kde  $\rho$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) je hustota materiálu a  $c$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je měrná tepelná kapacita. Druhým způsobem výpočtu je vydělit tepelnou kapacitu tělesa jejím objemem ( $c_{ob} = C \cdot V^{-1}$ ).

Objemová tepelná kapacita je vhodná pro materiály, které se běžně měří objemem spíše než hmotností, zároveň je však třeba počítat s tím, že je odlišná pro každé skupenství látky, neboť se při fázových přechodech výrazně mění objem. Problémem pak je tepelná roztažnost všech běžných materiálů, a tedy proměnlivá hodnota objemové tepelné kapacity, obzvlášť výrazný je tento fakt u plynných látek. V chemii se pak můžeme setkat

ještě s třetí možností vyjádření tepelné kapacity, a sice molární tepelnou kapacitou, která je vztažena na počet molů ve vzorku látky, její jednotka je  $J.K^{-1}.mol^{-1}$ . (Radmanović et al. 2014; Borůvka et al. 2021)

### **Teplotní vodivost**

Pokud při prostupu tepla materiálem neudržíme na obou stranách konstantní podmínky, můžeme pozorovat, jak rychle dojde k vyrovnání teplot na obou stranách. To vyjadřujeme tzv. koeficientem teplotní vodivosti, jinak také tepelnou difuzivitou. Přesněji řečeno koeficient teplotní vodivosti vystihuje rychlost, jakou se v materiálu vyrovnávají teplotní rozdíly. Značíme ho  $a$  s jednotkou  $m^2.s^{-1}$  a vzorec pro jeho výpočet svazuje všechny tři dříve zmiňované veličiny:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

kde  $\lambda$  ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) je koeficient tepelné vodivosti,  $\rho$  ( $kg.m^{-3}$ ) je hustota dřeva. Jak je patrné, oba parametry ve jmenovateli můžeme nahradit výše zmíněnou objemovou tepelnou kapacitou  $c_{ob}$ . (Borůvka, Babiak 2016; Požgaj et al. 1993)

Koeficient teplotní vodivosti dřeva je v porovnání s ostatními materiály relativně nízký, tedy dřevo přebírá teplo z okolí pomaleji, než např. ocel, a právě díky tomu je dřevo na dotyk pocitově teplé. Na teplotní vodivost mají opět vliv vlhkost a hustota. Jak se tyto faktory zvyšují, teplotní vodivost se snižuje, hustota má však v porovnání s vlhkostí výrazně nižší vliv. (Tsoumis 1991)

## **3.4. Optické charakteristiky**

### **Barva**

Barvou rozumíme zrakový vjem, který vzniká na sítnici oka prostřednictvím specifického spektrálního složení odražených (příp. vyzářených) světelných paprsků. Zbarvení dřeva způsobují látky obsažené v buněčných stěnách a lumenech, zejména lignin, třísloviny, pryskyřice, příp. barviva. Dřevo dosahuje barev převážně v hnědém spektru, ale napříč dřevinami se může velmi lišit světlostí, může přecházet od téměř bílé, jakou má bělové dřevo mnoha dřevin, až po uhlí černou, např. Tomel ebenový (*Diospyros ebenum*). Dále se barva výrazně liší v rámci jednoho druhu dřeviny (podle klimatických podmínek, složení půdy atd.), nebo dokonce i v rámci jednoho stromu, např. letní/jarní dřevo, bělové/jádrové dřevo. Díky tomu je barva významným faktorem při určování dřeviny a anatomické stavby, např. výskyt dřeňových paprsků, suků či tlakového reakčního dřeva. Některé druhy mohou být díky extraktivním látkám dokonce



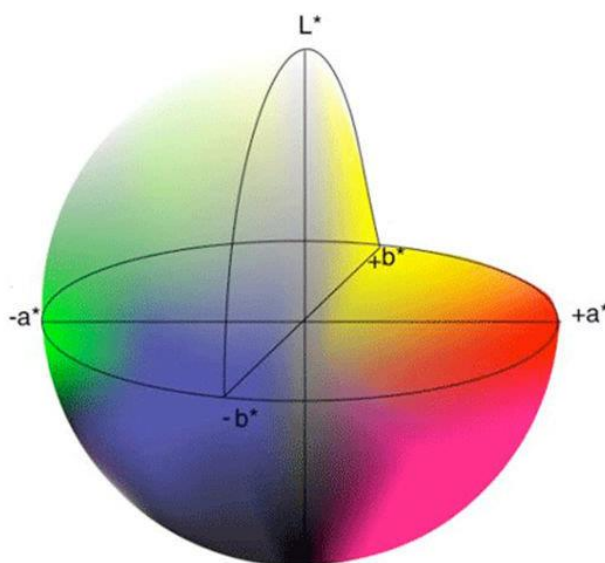
fluorescentní, např. dřezovec trojtrnný (*Gleditsia triacanthos*), nebo trnovník akát (*Robinia pseudoacacia*). (Požgaj et al. 1993; Borůvka, Babiak 2016; Tsoumis 1991)

Barva dřeva není stabilní, barevné změny bývají průvodním jevem oxidačních procesů, zvýšené vlhkosti, napadení dřeva hnilobou, atmosférického stárnutí dřeva, a dalších degradací. Obecně lze říci, že vlivem těchto činitelů dřevo tmavne, jedinou výjimkou je působení povětrnostních vlivů, které lignin a extraktivní látky ze dřeva uvolňují a dřevo tak bělá, resp. šedne z důvodu usazování prachových částic. Změny barvy mohou být trvalé, např. oxidační a termické procesy, nebo pouze dočasné a vratné, např. při zvýšení vlhkosti. (Borůvka, Babiak 2016; Čunderlík 2009)

Podle barvy dělí Čunderlík (2009) dřeviny do čtyř skupin:

- bledé dřevo: smrk, jedle, habr aj.
- hnědé dřevo: dub, jasan, jilm, ořech aj.
- červené dřevo: borovice, modřín, dub cerový, třešeň aj.
- zelené dřevo: akát aj.

Barva je obvykle první vjem, který při kontaktu se dřevem získáme a sice jde o vjem značně subjektivní, silně závisící na kvalitě a intenzitě osvětlení. Pro objektivní měření a popis barvy bylo vyvinuto několik barevných systémů a k nim adekvátních přístrojů, které barvu rozkládají na jednotlivé kvantifikovatelné složky. Nejběžněji používaným barevným prostorem je CIELab. V tomto systému je barva rozdělena do tří složek, které vytvářejí osy v prostorovém grafu, viz. obrázek 6. Barva je poté popsána třemi souřadnicemi v tomto prostoru. (Tsoumis 1991; Borůvka, Babiak 2016)



Obrázek 6: vizualizace barevného prostoru CIELab (Moghaddam 2013)

Světlost barvy udává parametr  $L$ , který může nabývat hodnot od 0 (černá) až do 100 (bílá), jinými slovy se jedná o procentuální vyjádření celkové odrazivosti.

Parametr  $a$  označuje posun odstínu mezi zelenou (-60) a červenou (+60) a poslední parametr  $b$  udává odstín mezi modrou (-60) až žlutou (+60) barvou. Můžeme říci, že parametrem  $b$  udáváme teplotu barvy. Měřením barvy se zabývá obor kolorimetrie a přístroje k tomu používané nazýváme kolorimetry, které obecně fungují na principu ozáření určitého bodu světlem o přesném spektrálním složení a snímání odraženého světla na kalibrovaném světločivném čipu. (Borůvka, Babiak 2016; Ly et al.2020)

### **Lesk**

U dřeva stejně tak jako u jakéhokoli jiného pevného materiálu můžeme pozorovat lesk. Lesk v přirozeném stavu ovlivňují faktory anatomické, mj. struktura dřevních pletiv, výskyt dřevných paprsků, obsah pryskyřic, olejů a extraktivních látek. Významný vliv má pórovitost dřeva, neboť logicky póry světlo odráží dovnitř dřeva. Dobře vypovídající o pórovitosti dřeva je jeho hustota, neboť vyšší hustota znamená méně pórů, a tedy vyšší lesk. Toto pravidlo však není bez výjimek, např. habrové či ebenové dřevo má vysokou hustotu, ale přesto se leskne jen velmi málo. (Čunderlík 2009; Požgaj et al. 1993)

V případě zpracovaného dřeva se významněji projevují faktory technologické, např. směr řezu, kvalita opracování a použitý nástroj. Lesk na příčném řezu je zpravidla velmi nízký kvůli vysoké pórovitosti, oproti tomu nejvyšší lesk bývá na radiálním řezu a to především, pokud má dřevo výrazné dřevné paprsky, neboť ty vynikají velmi vysokým leskem (odtud jejich hovorové označení zrcátka). Podle toho se také v Německu označuje radiální plocha jako Spiegelschnitt, v doslovném překladu zrcadlový řez. (Tsoumis 1991; Dubovský et. al. 2001)

Z našich dřev je nejlepším příkladem vlivu dřevných paprsků buk a mezi lesklá dřeva řadíme např. javor, dub, jilm, smrk, jasan, platan, lípu, topol, akát a třešeň. Tropická dřeva mívají často lesklý povrch díky olejům obsaženým ve dřevě, např. olivovník, guajak, teak a tisovec. (Čunderlík 2009; Tsoumis 1991, Požgaj et al. 1993)

Pro měření lesku využíváme tzv. leskoměr, což je relativně jednoduché zařízení, které vyše soustředěný paprsek viditelného světla pod určitým úhlem tak, aby se od povrchu měřeného předmětu odrazil a dopadl přesně na světločivný čip, který měří procentuální ztrátu intenzity. Pro měření jsou standardizované tři úhly. Pro vysoce lesklé povrchy se využívá úhel  $20^\circ$ , pro hluboce matné povrchy je vhodný úhel  $80^\circ$ , jako univerzální považujeme střední úhel  $60^\circ$ .

## 4. Metodika

### 4.1. Příprava vzorků

Výzkum započal přípravou testovacích vzorků. Ze školního lesního podniku v Kostelci nad Černými lesy bylo vybráno několik vhodných stromů jedle obrovské (*Abies grandis* Lindl.). Z oddenkové části kmenů byly vyřezány fošny, které byly ponechány v hraních k vyschnutí na vzduchu. Po poklesu vlhkosti bylo odebráno několik fošen, které byly podélně rozříznuty na dvě shodně tlustá prkna. Z každého prkna byla vyhotovena čtyři zkušební tělesa – dvě pro úpravu při 180 °C a dvě pro 200 °C, přičemž byla zachována paralelnost vzorků z těchto dvou skupin.

Celkem bylo pro toto měření použito 24 vzorků o rozměrech 300×100×20 mm, tedy 12 vzorků pro každou testovanou teplotu. Vzhledem k faktu, že všechny plánované zkoušky jsou neinvazivní, nebyly připravovány referenční vzorky, neboť na každém vzorku proběhnou měření před i po termické úpravě. Při výrobě byl kladen důraz na vytrídění vadných vzorků (např. výskyt velkých suků a dalších abnormalit, prasklin, nebo nerovný povrch). Po přípravě byly vzorky klimatizovány při 20 °C a 65% vzdušné vlhkosti až do dosažení rovnovážné vlhkosti, tj. do ustálení hmotnosti.

### 4.2. Měření skupiny vzorků v surovém stavu

Po na-klimatizování vzorků přibližně na 12% vlhkost, byla zahájena první série měření, přičemž všechny vzorky, na kterých právě neprobíhalo aktivní měření, byly uchovávány v klimatizační komoře. Před hlavním měřením byla zjišťována hmotnost vzorků s přesností 0.01 g, dále byly měřeny rozměry pomocí posuvného měřidla s přesností 0.01 mm, a to vždy na pěti místech v každém směru. Jako doplňkový parametr byla následně vypočítána hustota zkušebních těles. Naměřené hodnoty byly pro každý směr zprůměrovány aritmetickým průměrem. Hustota  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) byla následně vypočtena podle vzorce:

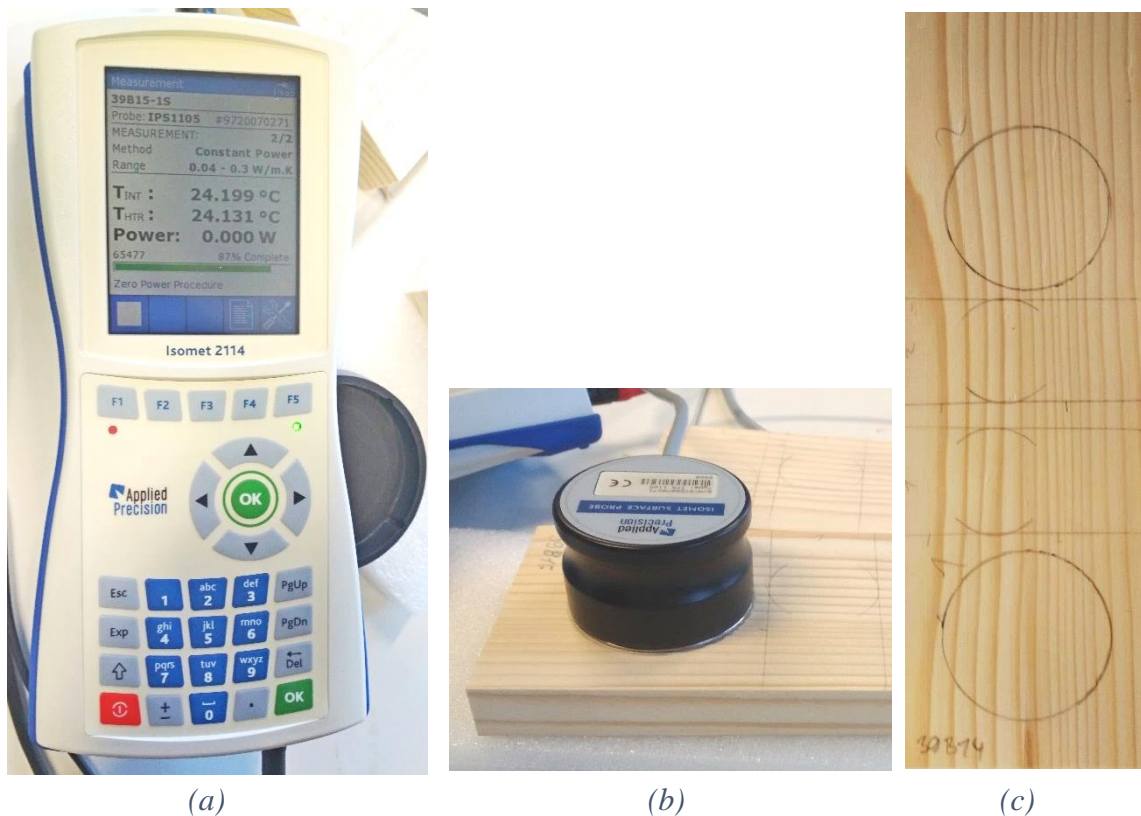
$$\rho = \frac{m}{\bar{L} \times \bar{a} \times \bar{b}}$$

kde  $m$  (kg) je hmotnost vzorku a  $\bar{L}$ ,  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  (m) jsou průměry jednotlivých rozměrů.

Měření tepelných charakteristik probíhalo pomocí přístroje ISOMET 2114 s využitím plošné sondy od výrobce Applied Precision, viz. obrázek 7. Tento přístroj využívá nestacionární metodu měření, která dovoluje dosáhnout kratších měřících časů oproti stacionárnímu měření. Teplo je generováno elektrickým odporem přímo v sondě, která je

v přímém kontaktu s povrchem materiálu. Sonda zaznamenává tepelnou odezvu materiálu a dokáže měřit všechny tři tepelné charakteristiky současně. Na každém vzorku probíhalo měření na třech odlišných místech a na každém tomto místě byla spuštěna dvě měření. Z jednoho vzorku tedy bylo získáno celkem šest výsledků. Časový odstup dvou měření na jedné pozici byl nastaven na 100 sekund, rozdíl teplot při měření na 10,0 K.

Pozice jednotlivých měření byly pečlivě zaznamenány, aby měření po termické modifikaci mohla proběhnout na identických plochách. Příklad značení ukazuje obrázek 7c. Jedno měření probíhalo přibližně 20 minut, jeden vzorek byl tedy hotov po dvou hodinách. Měření probíhalo v laboratoři s konstantní teplotou a vlhkostí vzduchu.



Obrázek 7: Měření tepelných charakteristik;  
(a) přístroj ISOMET 2114  
(b) plošná sonda  
(c) značení pozic měření

Na pozadí hlavního měření tepelných vlastností byly zkoumány i optické parametry barvy a lesku. Tato měření probíhala na pěti místech, odlišných od těch, kde probíhalo měření tepelných charakteristik. Polohy měření byly opět zaznamenány pro relevantní opakování měření po termické modifikaci (viz. obrázek 7c).

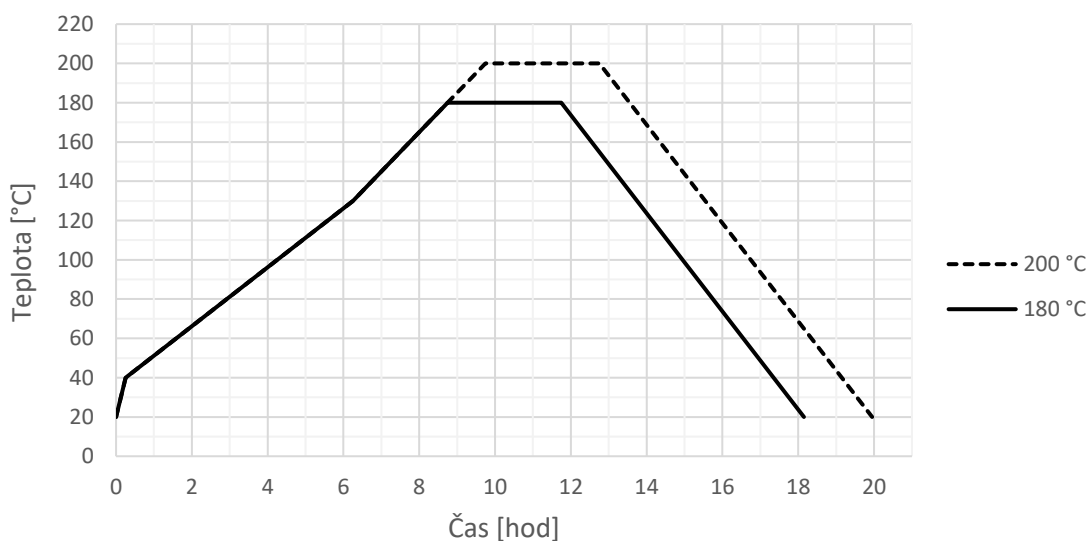
Lesk byl měřen pomocí leskoměru KSJ MG268-F2. Měření probíhalo pod úhlem 60°. Dále byla měřena barva pomocí spektrofotometru CM-600d od firmy Konica Minolta,

který měří barvu v trichromatické soustavě CIELab. Všechna měření byla prováděna na tangenciálních plochách.

### 4.3. Termická úprava metodou Thermowood

Po provedení měření výchozích (referenčních) hodnot bylo přistoupeno k termické modifikaci. Jak bylo uvedeno dříve, vzorky byly rozděleny na dvě skupiny pro úpravu při 180 °C a 200 °C. Tyto teploty byly zvoleny na základě informací v odborné literatuře a dřívějších výzkumů provedených zde na katedře zpracování dřeva a biomateriálů. Termická úprava probíhala v Kostelci nad Černými lesy v laboratorní vysokoteplotní komoře KHT-A od firmy Katres. Před samotným procesem byla snížena vlhkost vzorků vyschnutím na vzduchu v interiéru na hodnotu přibližně 8-10 %. Vzorky byly rozděleny na dvě skupiny podle konečné teploty termické modifikace a každá skupina byla upravována samostatně. Do dvou vzorků v každé sadě byly zavrtány teplotní sondy, jedna v horní a druhá v dolní části komory.

Počáteční ohřev probíhal rychlostí 80 °C/hod, a to na teplotu 40 °C, dále byla teplota zvyšována strmostí 15 °C/hod až na 130 °C. Konečné teploty 180 °C, resp. 200 °C bylo dosaženo s rychlostí 20 °C/hod. Celá fáze ohřevu trvala 9 hodin (180 °C), resp. 10 hodin (200 °C). Na konečné teplotě byly obě sady vzorků drženy shodně tři hodiny, poté následovala fáze ochlazování. Teplota byla snižována rychlostí 25 °C/hod, přičemž od teploty 130 °C byla do komory přiváděna pára pro zvýšení vlhkosti dřeva. Celý proces je znázorněn v grafu 4.



Graf 4: Průběh teplot v tepelné komoře

#### **4.4. Měření skupiny vzorků po úpravě**

Po termické úpravě byly vzorky přesunuty do klimatizační komory, kde byly opět při 20 °C a 65% vzdušné vlhkosti ponechány do ustálení hmotnosti. Po aklimatizaci vzorků bylo přistoupeno k druhé sérii měření, které probíhalo za přesně stejných postupů, jako měření první. Zároveň byla po dobu měření v místnosti udržována stejná teplota a vlhkost vzduchu. Díky zaznamenání pozic plošné sondy mohla být všechna měření provedena na identických plochách. Povrch zkušebních těles nebyl nijak dodatečně upraven, neboť vlivem tepelné úpravy nedošlo ke vzniku významných trhlin ani průhybu materiálu. Druhé měření tak mohlo být maximálně přesné.

#### **4.5. Vyhodnocení získaných dat**

Výsledky experimentu byly tabelárně a graficky zpracovány v programu Statistica. Použita byla základní popisná statistika a dvoufaktorová analýza rozptylu ANOVA na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Touto metodou lze demonstrovat trend naměřených hodnot a zda je vliv zkoumaného faktoru statisticky významný.

## 5. Výsledky a diskuse

Na následujících stranách jsou zobrazeny výsledky experimentu. Všechny parametry vykazují statisticky významný posun. Tabulka 2 shrnuje procentuální změny jednotlivých sledovaných vlastností, výsledné hodnoty jsou porovnávány s referenčními vzorky z dané skupiny, tj. jsou porovnávány pouze měření na identických plochách.

Velikost změn se u všech sledovaných parametrů zvětšovala se zvyšující se teplotou, pouze barevný parametr *b* vzrostl při 180 °C více, než při 200 °C. Z toho je patrné, že se barva při nižší teplotě úpravy přiblížila ke žlutému spektru více než při teplotě vyšší. Nejvýraznější změnu lze pozorovat v parametru světlosti.

Posun koeficientu teplotní vodivosti vyšel v případě teploty 180 °C těsně pod hranici statistické významnosti, jelikož však s vyšší teplotou rozdíl dále rostl ve stejném směru, lze ho považovat rovněž za významný.

*Tabulka 2: Procentuální porovnání výsledků sledovaných parametrů s hodnotami neupraveného dřeva*

	180 °C / REF	200 °C / REF
<b>tepelná vodivost</b>	-12	-16
<b>teplotní vodivost</b>	6	11
<b>objemová tepelná kapacita</b>	-18	-25
<b>světlost (L)</b>	-23	-52
<b>barva (a)</b>	71	96
<b>barva (b)</b>	28	13
<b>lesk (60°)</b>	-12	-32
<b>hustota</b>	-5	-7

Pro každý zkoumaný parametr je na dalších stranách uvedena tabulka základních statistických ukazatelů, jmenovitě aritmetický průměr, variační koeficient, směrodatná odchylka, minimum a maximum. Tabulkový výpis je doplněn o grafické znázornění změn.

Jelikož jsou většinou rozdíly mezi referenčními skupinami minimální, v příloze jsou k nahlédnutí grafy z jednofaktorové analýzy ANOVA, které zachycují postupný vývoj trendu se zvyšující se teplotou úpravy. V těchto grafech jsou obě referenční skupiny sloučeny do jedné.

Pro korektní porovnání výsledných hodnot je potřeba brát v úvahu vliv vlhkosti dřeva, neboť všechny vzorky byly při měření aklimatizovány shodně při 20 °C a 65% vzdušné vlhkosti, což u referenčních vzorků odpovídá přibližně 12% absolutní vlhkosti, zatímco

termicky modifikované vzorky mohou mít vlhkost pouze 5-8 %. (Reinprecht 2016; ITA 2003; Borůvka et al. 2021)

### 5.1. Koeficient tepelné vodivosti

Koeficient tepelné vodivosti byl nejdůležitější veličinou, kvůli které byl experiment prováděn. Před tepelnou modifikací se pohyboval kolem  $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Po úpravě při  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  klesl koeficient tepelné vodivosti o 12 % na hodnotu  $0,088 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a po úpravě při  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  klesl o 16 % na hodnotu  $0,081 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  (viz. tabulka 3). Směrodatná odchylka vyšla střední až nízká, a tak z pouhého krabicového grafu (viz. graf 5) lze vyčíst, že oba posuny byly statisticky významné.

Tabulka 3: Výsledné hodnoty koeficient tepelné vodivosti

	REF*	REF**	180	200
	72	72	72	72
	0,100	0,097	0,088	0,081
Tepelná vodivost ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	směrodatná odchylka	0,012	0,009	0,006
	variační koeficient	12,157	9,273	6,868
	minimum	0,081	0,081	0,072
	maximum	0,131	0,113	0,107

\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při  $180 \text{ }^\circ\text{C}$

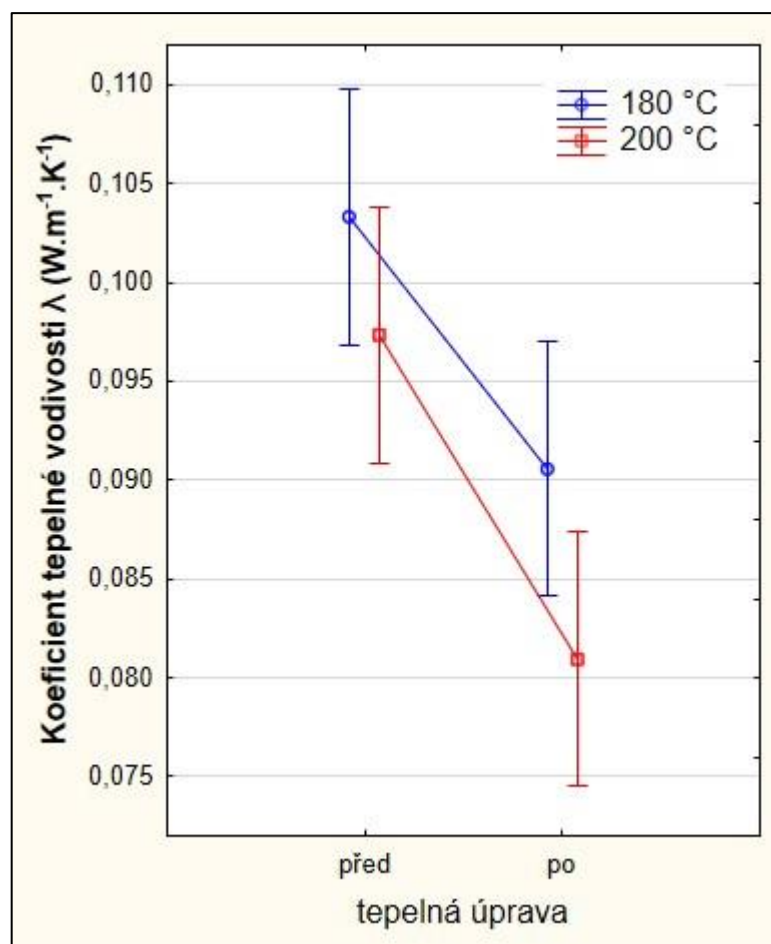
\*\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při  $200 \text{ }^\circ\text{C}$

Naměřené hodnoty tepelné vodivosti jedle obrovské jsou nižší než u našich běžných jehličnatých dřevin, viz. tabulka 4. Borůvka et al. (2021) při použití stejné metody na vzorcích břízy bělokore došel k výsledné hodnotě před modifikací  $0,135 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Tabulka 4: Udávané hodnoty tepelné vodivosti v tangenciálním směru pro jehličnaté dřeviny (Zeidler, Borůvka 2016)

dřevina	$\lambda$ ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
Smrk ztepilý	0,110
Borovice lesní	0,140
Jedle bělokora	0,125
Douglaska	0,120
Modřín opadavý	0,120
Vejmutovka	0,120





Graf 5: Vliv tepelné modifikace na koeficient tepelné vodivosti

Změny tepelné vodivosti po termické modifikaci odpovídají očekávání a shodují se s dostupnou literaturou. Podle ITA (2003) klesá tepelná vodivost po modifikaci při 230 °C o 20 až 25 %. Stejnou hodnotu udává i Hill (2006), avšak bez specifikace teploty. Hortobágyi et al. (2021) v experimentu se smrkem naměřil pokles o 9 % při teplotě 180 °C a dokonce 28 % po modifikaci při 200 °C. K podobným výsledkům dospěl i Pásztory et al. (2017), taktéž pro smrkové dřevo. Kol a Sefil (2011) provedli pokus na dřevu jedle bornmüllerové a zaznamenali pokles pouze o 5 % a o 7 %. Borůvka et al. (2021) s využitím identických postupů dospěl ke snížení hodnot tepelné vodivosti na dřevu břízy bělokoré o 17 % při teplotě 180 °C a 23 % při teplotě 200 °C.

Jak vidíme, variabilita od dřeviny je značná, společný trend je však zřejmý a sice že tepelná úprava vodivost ovlivňuje a že se zvyšující se teplotou modifikace koeficient tepelné vodivosti klesá. Tyto změny můžeme zdůvodnit především nižší rovnovážnou vlhkostí dřeva (Požgaj et al. 1993).

## 5.2. Koeficient teplotní vodivosti

Teplotní vodivost vychází nejproblematictější ze všech sledovaných charakteristik. Ponecháme-li stranou parametry barvy, jedná se o jediný parametr, který po termické modifikaci vzrostl a choval se tedy jinak, než bylo očekáváno. Důvodem pro takovou změnu je fakt, že objemová tepelná kapacita klesla více než koeficient tepelné vodivosti. Dobrým výsledkem však je, že změny mají stálý trend (viz. graf 6).

Tabulka 5: Výsledné hodnoty koeficient teplotní vodivosti

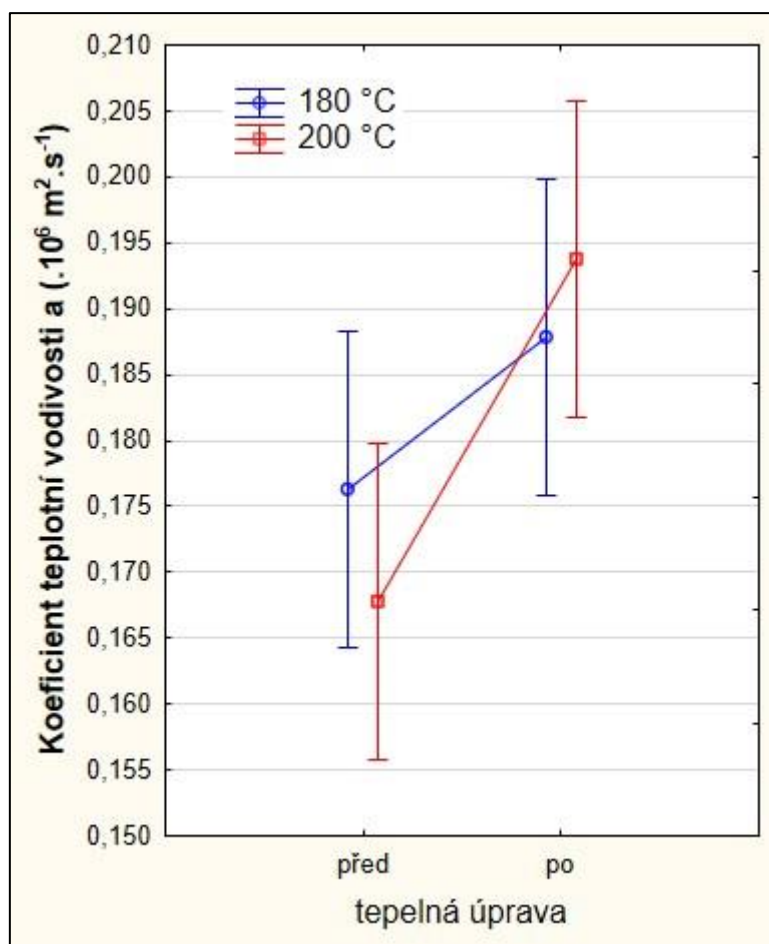
	REF*	REF**	180	200
	počet měření	72	72	72
Teplotní vodivost .10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	aritmetický průměr	0,174	0,171	0,184
	směrodatná odchylka	0,018	0,017	0,016
	variační koeficient	10,387	9,926	8,633
	minimum	0,130	0,114	0,149
	maximum	0,245	0,214	0,240

\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 180 °C

\*\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 200 °C

Jak ukazuje tabulka 5, výchozí hodnoty před modifikací se pohybovaly kolem 0,172.10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. Po modifikaci došlo k nárůstu o 6 % při 180 °C a o 11 % při 200 °C. Bohužel se měření potýkalo s poměrně vysokou odchylkou, kvůli čemuž byla první jmenovaná změna těsně pod hranicí statistické významnosti. Vzhledem k pokračujícímu trendu při druhé teplotní skupině lze ale považovat i první posun za směrodatný.

Z literatury můžeme uvést Borůvku et al. (2021), který naměřil na bříze bělokoré před modifikací hodnotu 0,179.10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>, což velmi přesně odpovídá hodnotám tohoto experimentu. Po termické modifikaci pak zaznamenal Borůvka pokles teplotní vodivosti přibližně o 8 % v obou testovaných teplotách.



Graf 6: Vliv tepelné modifikace na koeficient teplotní vodivosti

### 5.3. Objemová tepelná kapacita

Objemová tepelná kapacita, stejně jako většina ostatních parametrů, vykazovala znatelný pokles hodnot v obou testovaných teplotách termické modifikace. Při teplotě 180 °C poklesla o 18 % a při teplotě 200 °C o 25 % (viz graf 7). Měření objemové tepelné kapacity bylo zatíženo poměrně vysokou směrodatnou odchylkou, přesto však jsou změny velmi výrazné, a tedy statisticky významné. Výsledky ukazuje tabulka 6.

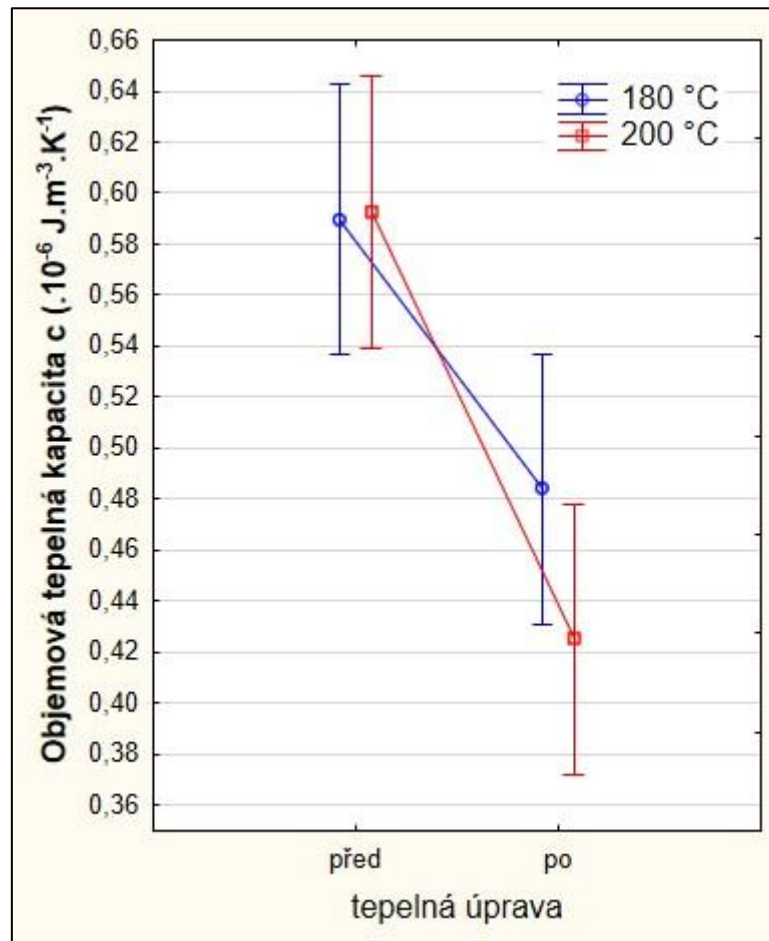
Tabulka 6: Výsledné hodnoty objemová tepelná kapacita

	REF*	REF**	180	200
<b>počet měření</b>	72	72	72	72
<b>aritmetický průměr</b>	0,585	0,572	0,481	0,430
<b>směrodatná odchylka</b>	0,101	0,097	0,070	0,054
<b>Objemová tep. kapacita .10<sup>-6</sup> (J.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>				
<b>směrodatná odchylka</b>	0,101	0,097	0,070	0,054
<b>variační koeficient</b>	17,260	16,962	14,523	12,544
<b>minimum</b>	0,407	0,392	0,354	0,306
<b>maximum</b>	0,836	0,870	0,630	0,526

\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 180 °C

\*\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 200 °C

Měřením objemové tepelné kapacity se zabýval např. Czajkowski et al. (2020), který na vzorcích buku naměřil při teplotě 180 °C pokles o 1,7 % a při 220 °C pokles o 7,1 %. Porovnání s těmito výsledky je však poměrně problematické, neboť dřevo buku má výrazně odlišnou strukturu a také Czajkowski provedl hlavní fázi termické modifikace pouze po dobu jedné hodiny. Borůvka (2021) dělal termickou modifikaci podle stejných postupů jako tento experiment a na vzorcích březového dřeva naměřil při 180 °C pokles hodnot o 9,5 % a při 200 °C o 16,3 %.



Graf 7: Vliv tepelné modifikace na objemovou tepelnou kapacitu

#### 5.4. Barva

Vývoj barvy byl už zprvu dobře očekávatelný a opravdu zde nenastala žádná překvapení. Výsledky jsou v tabulce 7. Podle předpokladu v závislosti na teplotě úpravy velmi významně klesala světlost (parametr L), po úpravě při 180 °C klesla o 23 % a při teplotě 200 °C dokonce o více než polovinu, 52 % (viz graf 8). Odchytky měření byly velmi malé, barva dřeva byla tedy konzistentní.

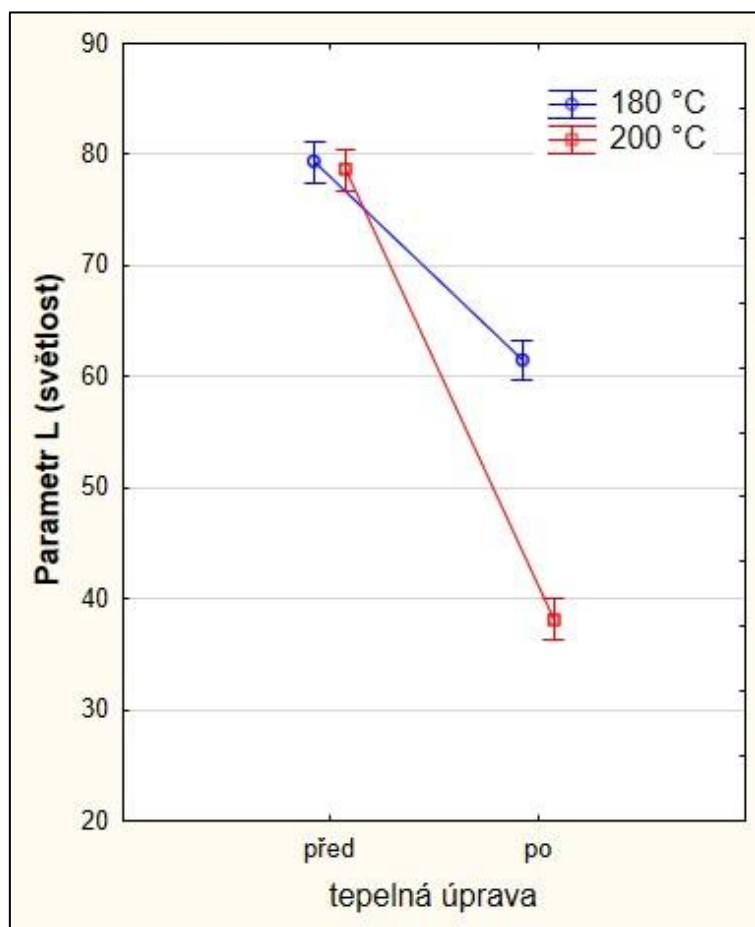
Tabulka 7: Výsledné hodnoty světlost

	REF*	REF**	180	200
	60	60	60	60
	79,61	78,61	61,66	38,01
<b>Světlost</b> <b>(parametr L)</b>	3,32	4,76	3,37	3,58
	4,18	6,05	5,46	9,43
	70,27	50,06	54,38	30,84
	97,07	83,70	66,63	48,27

\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 180 °C

\*\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 200 °C

Porovnání s literaturou potvrzuje zjištěné trendy. ITA (2003) udává pro borovici pokles světlosti o 19 % při nižší teplotě a 33 % při vyšší teplotě. Straže et al. (2018) naměřil ztmavnutí dřeva jedle bělokoré o 23 % při 170 °C, 36 % při 190 °C a 42 % při teplotě 210 °C. Kanát (2020) provedl měření taktéž na jedli a při teplotách modifikace 180 a 200 °C zaznamenal snížení hodnot o 36 % a dokonce 58 %, pro smrk naměřil obdobné hodnoty, 33 % a 55 %. Borůvka (2021), který dělal pokusy s teplotami od 160 do 200 °C zjistil, že výrazná změna světlosti přichází na hranici mezi 170 a 180 °C, dále



Graf 8: Vliv tepelné modifikace na světlost (parametr L)

je tmavnutí dřeva se zvyšováním teploty velmi rychlé. Pro břízu bělokorou při 180 a 200 °C naměřil pokles světlosti o 19 % a 44 %.

Barevné parametry *a*, *b* poukazují na přesun barvy do hnědého spektra, resp. do žlutého a červeného (viz. tabulka 8). Při první teplotě výrazně narostl parametr *b*, tedy barva byla více do žluté, s vyšší teplotou se pak ale opět lehce snížil a přiblížil se výchozí hodnotě. Parametr *a* rostl při obou teplotách konstantně. Poměrově k referenčním hodnotám vzrostl parametr *a* při první teplotě o 71 % a při druhé teplotě o 96 %, parametr *b* se zvýšil o 28 % a 13 %, viz. graf 9.

*Tabulka 8: Výsledné hodnoty barva*

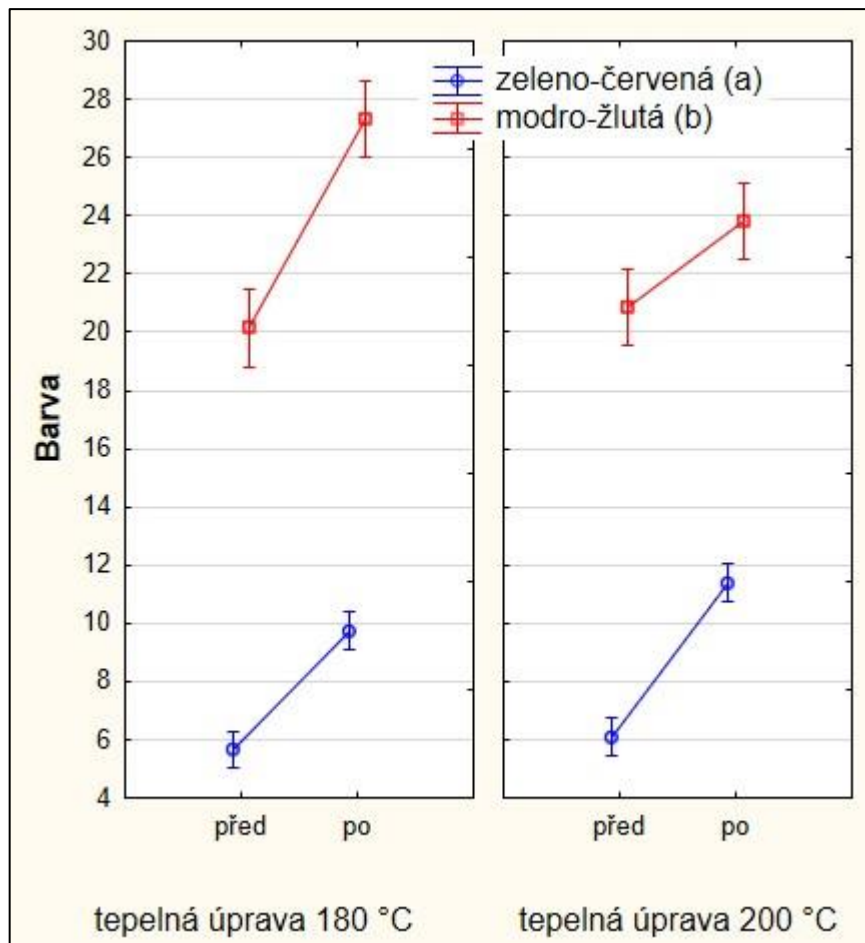
		REF*	REF**	180	200
<b>Barva (a)</b>	<b>počet měření</b>	60	60	60	60
	<b>aritmetický průměr</b>	5,66	5,73	9,67	11,24
	<b>směrodatná odchylka</b>	1,13	1,21	0,91	0,99
	<b>variační koeficient</b>	19,89	21,06	9,36	8,83
	<b>minimum</b>	3,57	3,11	8,09	9,61
	<b>maximum</b>	9,91	10,60	12,73	15,50
<b>Barva (b)</b>	<b>počet měření</b>	60	60	60	60
	<b>aritmetický průměr</b>	20,37	20,62	28,31	23,59
	<b>směrodatná odchylka</b>	1,85	1,95	8,32	2,69
	<b>variační koeficient</b>	9,07	9,45	29,38	11,39
	<b>minimum</b>	16,99	16,50	24,70	16,42
	<b>maximum</b>	27,46	27,38	90,84	28,52

\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 180 °C

\*\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 200 °C

Straže et al. (2018) naměřil na dřevu jedle bělokoré při teplotách 170, 190 a 210 °C posun parametru *a* v pořadí o 116 %, 95 % a 93 % a posun parametru *b* o 25 %, -1 %, -6 %.

Barevné změny jsou způsobeny především termooxidačními reakcemi ve dřevě. Výraznost barevných změn tudíž závisí nejen na teplotě a délce modifikace, ale velmi důležitým parametrem je množství kyslíku v kontaktu se dřevem, např. modifikace v olejové lázni mohou pracovat při výrazně vyšších teplotách při stejném ztmavnutí dřeva. (Hill 2006; Reinprecht 2016)



Graf 9: Vliv tepelné modifikace na barvu

Pro lepší představu a porovnání změn byly vytvořeny příklady barev podle získaných parametrů. Tyto barvy jsou zachyceny na obrázku 8.



Obrázek 8: Ukázka barevných změn

### 5.5. Lesk

Lesk byl měřen jako doplňková veličina, v mnoha experimentech se s měřením lesku nesetkáme. Získané hodnoty v tabulce 9 zcela jednoznačně ukázaly na pokles lesku se zvyšující se teplotou modifikace, při 180 °C poklesl lesk o 12 %, při 200 °C o 32 %, viz graf 10. Směrodatná odchylka vychází poměrně nízká a změny jsou tedy s určitostí statisticky významné.

Literatura se vlivem tepelné modifikace na lesk dřeva příliš nezabývá. Můžeme jmenovat experiment Borůvky (2021) s dřevem břízy bělokoré, který naměřil při 60 °

pokles lesku o 16 % při 180 °C a 23 % při 200 °C. Borůvka měřil lesk v pěti skupinách teplot úpravy od 160 °C do 200 °C a jeho výsledky ukazují rovnoměrný pokles lesku se zvyšující se teplotou.

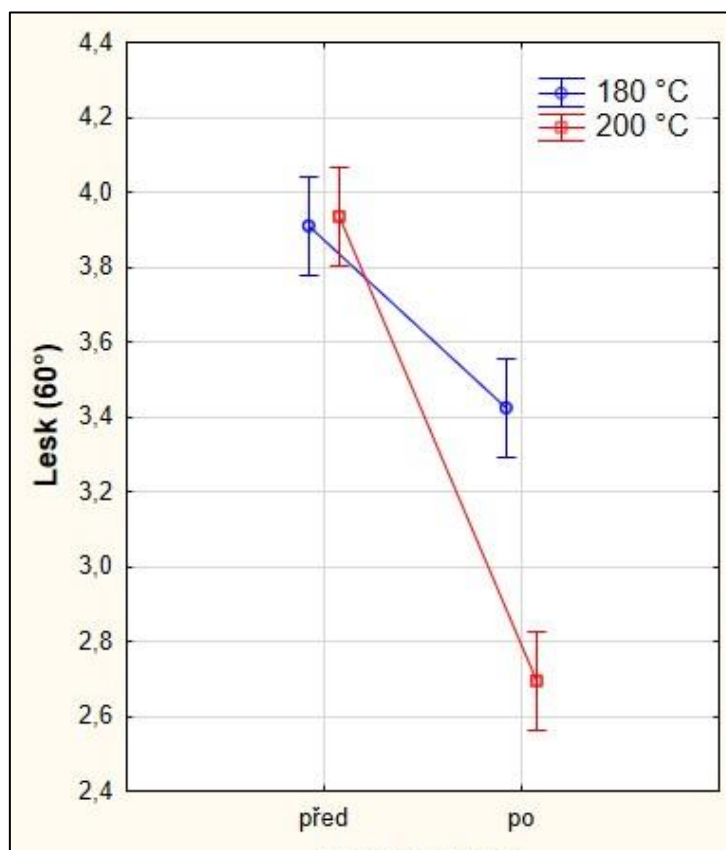
Tabulka 9: Výsledné hodnoty lesk

		REF*	REF**	180	200
<b>Lesk (60°)</b>	<b>počet měření</b>	60	60	60	60
	<b>aritmetický průměr</b>	3,9	3,9	3,4	2,7
	<b>směrodatná odchylka</b>	0,4	0,6	0,5	0,6
	<b>variační koeficient</b>	11,1	14,1	13,8	22,5
	<b>minimum</b>	2,8	2,5	2,4	1,3
	<b>maximum</b>	4,8	5,3	4,4	4,2

\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 180 °C

\*\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 200 °C

Snížení lesku může být způsobeno změnami strukturálními a chemickými, např. degradací hemicelulóz, zároveň mohla být povrchová vlákna dřeva poškozena intenzivním odpařováním vody a produktů termooxidačních reakcí. Redukce lesku tak může být pouze lokální a po provedení opětovného povrchového opracování by mohlo být možné dosáhnout původního lesku. (Hill 2016, Reinprecht 2016)



Graf 10: Vliv tepelné modifikace na lesk



## 5.6. Hustota

Poslední měřenou vlastností byla hustota, která v při obou teplotách klesla, přičemž po úpravě při 200 °C byla nižší. Jak ukazuje tabulka 10, první skupina, modifikovaná při 180 °C, dosáhla průměrné hodnoty 421 kg.m<sup>-3</sup> a druhá skupina, upravená při 200 °C, dosáhla 410 kg.m<sup>-3</sup>. Oproti referenčním hodnotám došlo ke snížení hustoty o 5 %, resp. 7 %. Bohužel kvůli malému počtu vzorků vznikla relativně vysoká směrodatná odchylka. Přesto však z grafu ANOVA (viz. graf 11) není pochyb o tom, že změny jsou statisticky významné. Navíc díky paralelnosti testovaných vzorků jsou referenční hodnoty obou skupin takřka identické a je tedy velmi relevantní jednofaktorová analýza (viz. příloha 4).

Tabulka 10: Výsledné hodnoty hustota

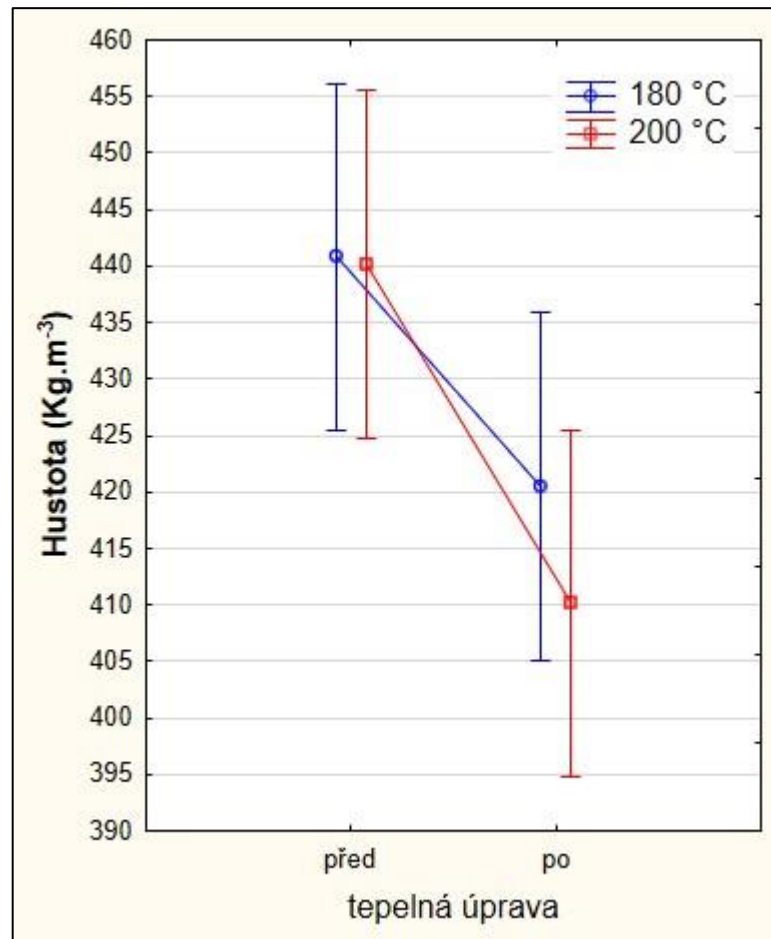
		REF*	REF**	180	200
<b>Hustota</b> <b>(Kg.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>počet měření</b>	12	12	12	12
	<b>aritmetický průměr</b>	441	440	421	410
	<b>směrodatná odchylka</b>	23	24	21	35
	<b>variační koeficient</b>	5	6	5	9
	<b>minimum</b>	401	398	385	374
	<b>maximum</b>	479	481	460	507

\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 180 °C

\*\* referenční hodnoty pro skupinu modifikovanou při 200 °C

Prvním faktorem, který určuje hustotu, je hmotnost. Ta se snížila o 10,2 %, a to především díky nižšímu obsahu vody. Dále se ze dřeva v průběhu tepelné modifikace odpařila část extraktiv a reakčních produktů, především hemicelulózy (Reinprecht 2016). Druhým faktorem ovlivňujícím hustotu, je objem, který u měřených těles klesl v průměru o 4,5 %. V podélném směru byla změna rozměrů nevýznamná a oba zbylé směry byly tangenciální, takže změny jejich rozměrů byly poměrově stejné. Přestože Hill (2006) říká, že dřevo se vlivem termické modifikace nejvíce zmenšuje právě v tangenciálním směru, ztráta hmotnosti byla větší, než změna rozměrů dřeva a z toho důvodu klesá hustota.

Lukášek (2012), který také měřil hustotu jedle obrovské z černokostečka, dospěl k rozmezí hodnot 387 až 434 kg.m<sup>-3</sup>. Oproti experimentu Lukáška vyšla hustota vyšší, 441 kg.m<sup>-3</sup>, a blíží se tak hodnotě, kterou uvádí Meier (2015). Na jedli obrovskou jde o neobvykle vysokou hustotu, která je shodná s hustotou jedle bělokoré a smrku ztepilého, jak je uvádí Zeidler a Borůvka (2016).



Graf 11: Vliv tepelné modifikace na hustotu

Pokles hustoty po termické modifikaci odpovídá obecným předpokladům. Kanát (2020) udává pro odpovídající teploty i délku modifikace pokles hustoty o 3,7 % a 5,4 % pro jedli bělokorou a 3,3 %, resp. 5,5 % pro smrk ztepilý. Kol a Sefil (2011) prováděli měření na jedli bornmüllerově a došli k hodnotám 5,1 % a 9,9 %. Straže et al. (2018) naměřil na jedli bělokoré menší změny, pouze 2,4 %, resp. 6,6 %. ITA ve svých příručkách (2003 a 2021) udává pro teplotu 185 °C pokles hustoty o 1,8 až 6,6 % a pro 215 °C 5,4 až 8,7 %. Tyto hodnoty uvádí pro smrk a borovici.

## 6. Závěr

Experiment dokázal, že pomocí termické modifikace lze snížit vedení tepla dřevem. Vývoj tepelných charakteristik téměř odpovídal očekávání a shodoval se s literaturou. V porovnání s referenčními hodnotami neupraveného dřeva došlo k poklesu koeficientu tepelné vodivosti. Současně poklesla i objemová tepelná kapacita, což může mít v praxi negativní efekt, neboť se tím snižuje akumulární schopnost materiálu. Pouze koeficient teplotní vodivosti zaznamenal nárůst. Vývoj tohoto faktoru je těžké dopředu odhadnout, neboť z metody výpočtu může stoupat i klesat. Nárůst koeficientu teplotní vodivosti nám pouze říká, že pokles objemové tepelné kapacity byl větší v porovnání s nárůstem koeficientu tepelné vodivosti. Dřevo tak rychleji vyrovnává tepelné rozdíly a je na dotyk studenější.

Při celkovém pohledu výsledné hodnoty ukazují, že dřevo jedle obrovské nabízí velmi dobré izolační schopnosti. Naše nejpoužívanější dřeviny mají koeficient tepelné vodivosti v neupraveném stavu přibližně o polovinu vyšší než dřevo jedle obrovské po termické modifikaci (Zeidler, Borůvka 2016). Podle některých zdrojů jsou izolační schopnosti takového dřeva srovnatelné např. s dřevovláknitými či korkovými deskami (Laboutka, Suchánek 2001).

Barva se také vyvíjela podle odhadu. Došlo ke zhnědnutí dřeva a výraznému poklesu světlosti. Lesk rovněž poklesl, avšak po opětovném opracování povrchu by nejspíš bylo možné dosáhnout původního i vyššího lesku.

U všech sledovaných parametrů byla zjištěna závislost na teplotě termické modifikace, zvyšováním teploty se rovněž zvětšovala velikost pozorovaných změn. Změny tepelných charakteristik jsou způsobeny z největší části poklesem vlhkosti, což je hlavní předností termodřeva.

Přínos této práce byl především v naměření unikátních dat k problematice, která u dané dřeviny nebyla doposud důkladně prozkoumána, tj. vývoj tepelných charakteristik termicky modifikovaného dřeva jedle obrovské. Zjištěné změny korespondují s dříve provedenými experimenty s jinými dřevinami a celý pokus tak můžeme označit za úspěšný.

## 7. Citovaná literatura

APLTAUER, Jan, 2018. Dřevinná skladba našich lesů dle roku jejich založení. Lesnická práce. Kostelec nad Černými lesy, 97(3), 18-21.

BERAN, F. 2006. Některé poznatky z hodnocení mezinárodního provenienčního pokusu s jedlí obrovskou – *Abies grandis* (Douglas) LIND. In NEUHÖFEROVÁ, P. (ed.) *Douglaska a jedle obrovská – opomíjené giganti*. 1. vyd. Praha: Sborník referátů konference v Kostelci nad Černými lesy 12.–13. 10. 2006, ČZU, 2006, s. 17–27. ISBN 80-213-1532-6.

BORŮVKA, Vlastimil a Marián BABIAK, 2016. *Vlastnosti dřeva v příkladech*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 139 s. ISBN 978-802-1326-187.

BORŮVKA, Vlastimil, Přemysl ŠEDIVKA, David NOVÁK, Tomáš HOLEČEK a Jiří TUREK, 2021. Haptic and Aesthetic Properties of Heat-Treated Modified Birch Wood. *Forests*. 12(1081). Dostupné z doi: 10.3390/f12081081

CZAJKOWSKI, Łukasz, Wiesław OLEK a Jerzy WERES, 2020. Effects of heat treatment on thermal properties of European beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 78(3), 425-431. ISSN 0018-3768. Dostupné z doi: 10.1007/s00107-020-01525-w

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

DUBOVSKÝ, Ján, Marián BABIAK a Igor ČUNDERLÍK. *Textúra, štruktúra a úžitkové vlastnosti dreva: návody na cvičenia*. Zvolen: Technická univerzita, 2001. ISBN 80-228-1014-2.

FULÍN, Martin, 2016. *Růst a environmentální vlivy pěstování jedle obrovské v podmínkách České republiky*. Praha. Disertační práce. ČZU v Praze. Vedoucí práce Prof.ing. Vilém Podrázský, Csc.

FULÍN, Martin, Jiří REMEŠ a Pavel TAUCHMAN, 2013. Růst a produkce jedle obrovské (*Abies grandis* Lindl.) Ve srovnání s jinými jehličnany. *Zprávy lesnického výzkumu*. Praha: ČZU v Praze, 58(2), 186-192.

HILL, Callum A.S., 2006. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Bangor: John Wiley, 249 s. ISBN 10 0-470-02172-1.

HOFMAN, J. Pěstování jedle obrovské. 1. vyd. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1963. 116 s

HORTOBÁGYI, Áron, Elena PIVARČIOVÁ a Pavol KOLEDA, 2021. Holographic Interferometry for Measuring the Effect of Thermal Modification on Wood Thermal Properties. Applied Sciences. 11(6). ISSN 2076-3417. Dostupné z doi: 10.3390/app11062516

KANÁT, Vojtěch, 2020. Porovnání tepelně upraveného dřeva jedle a smrku z pohledu jeho užitkových vlastností. Praha. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

KOL, Hamiyet Şahin a Yusuf SEFIL, 2011. The thermal conductivity of fir and beech wood heat treated at 170, 180, 190, 200, and 212°C. Journal of Applied Polymer Science. 121(4), 2473-2480. ISSN 00218995. Dostupné z doi: 10.1002/app.33885

LABOUTKA, Karel a Tomáš SUCHÁNEK, 2001. Výpočtové tabulky pro vytápění. Praha: Společnost pro techniku prostředí. ISBN 80-02-01466-9.

LUKÁŠEK, Jiří, 2012. Posouzení variability vybraných vlastností dřeva jedle obrovské (*abies grandis* (douglas) lindl.) Z oblasti černokostelecka. Praha. Disertační práce. ČZU v Praze. Vedoucí práce Štefan Barcík.

LY, Bao Chau K., Ethan B. DYER, Jessica L. FEIG, Anna L. CHIEN a Sandra DEL BINO, 2020. Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry. Journal of Investigative Dermatology. 140(1), 3-12.e1. ISSN 0022202X. Dostupné z doi: 10.1016/j.jid.2019.11.003

MEIER, Eric, 2015. WOOD! Identifying and Using Hundreds of Woods Worldwide. The Wood Database. ISBN 978-0-9822460-3-0

PÁSZTORY, Zoltán, Norbert HORVÁTH a Zoltán BÖRCSÖK, 2017. Effect of heat treatment duration on the thermal conductivity of spruce and poplar wood. European

Journal of Wood and Wood Products. 75(5), 843-845. ISSN 0018-3768. Dostupné z doi: 10.1007/s00107-017-1170-2

POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK, 1993. Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava: Príroda. ISBN 80-070-0600-1.

RADMANOVIĆ, Kristijan, Igor ĐUKIĆ a Stjepan PERVAN, 2014. Specific Heat Capacity of Wood. Drvna industrija. 65(2), 151-157. ISSN 00126772. Dostupné z doi: 10.5552/drind.2014.1333

REINPRECHT, L., VIDHOLDOVÁ, Z. (2008). Termodrevo – Príprava, vlastnosti a aplikácie. TU Zvolen 2008, ISBN: 978-80-228-1920-6.

REINPRECHT, Ladislav, 2016. Wood Deterioration, Protection and Maintenance. Oxford: JohnWiley&Sons, 357 s. ISBN 9781119106531.

STRAŽE, Aleš, Gorazd FAJDIGA a Bojan GOSPODARIČ, 2018. Nondestructive Characterization of Dry Heat-Treated Fir (Abies Alba Mill.) Timber in View of Possible Structural Use. Forests. 9(12). ISSN 1999-4907. Dostupné z doi: 10.3390/f9120776

TSOUMIS, George, 1991. *Science and Technology of Wood: Structure, Properties, Utilization*. New York: Van Nostrand Reinhold, 494 s. ISBN 0442239858.

ÚŘADNÍČEK, Luboš, 2014. Jedle obrovská. Lesnická práce. Kostelec nad Černými lesy, 93(12), 42-43. ISSN 0322-9254.

ZEIDLER, Aleš a Vlastimil BORŮVKA, 2016. Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin – podklady pro cvičení. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 89 s. ISBN 978-802-1326-743.

ZEIDLER, Aleš, Vladimír GRYC, Hanuš VAVRČÍK a Jiří LUKÁŠEK, 2010. Dřevo jedle obrovské. Lesnická práce. Kostelec nad Černými lesy, 89(12), 29. ISSN 0322-9254.

## Internetové zdroje

ITA (International ThermoWood Association), 2003. ThermoWood® Handbook [online]. Helsinki, Finland: International ThermoWood Association [cit. 2022-03-16].

Dostupné z: (přístupné k 16.3.2022)

[https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw\\_handbook\\_080813.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf)

ITA (International ThermoWood Association), 2021. ThermoWood® Handbook [online]. Helsinki, Finland: International ThermoWood Association [cit. 2022-03-16].

Dostupné z: (přístupné k 16.3.2022)

[https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/web\\_thermowood\\_handbook.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/web_thermowood_handbook.pdf)

LITTLE, Elbert L. Abies grandis range map. In: *Wikipedia Commons* [online]. 1971 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: (přístupné k 16.3.2022)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Abies\\_grandis\\_range\\_map\\_3.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Abies_grandis_range_map_3.png)

POKORNÝ, Jan. Abies Grandis: Jedle obrovská. In: Botanická fotogalerie [online]. 4.5.2006 [cit. 2022-03-16]. Sedmihorky (okr. Semily): Arboretum Bukovina, 1 km JZ od obce. Dostupné z: (přístupné k 16.3.2022)

[https://www.botanickafotogalerie.cz/fotogalerie.php?lng=cz&latName=Abies%20grandis&czName=jedle%20obrovsk%C3%A1&title=Abies%20grandis%20%7C%20jedle%20obrovsk%C3%A1&showPhoto\\_variant=photo\\_description&show\\_sp\\_descr=true&spec\\_syntax=species&sortby=lat](https://www.botanickafotogalerie.cz/fotogalerie.php?lng=cz&latName=Abies%20grandis&czName=jedle%20obrovsk%C3%A1&title=Abies%20grandis%20%7C%20jedle%20obrovsk%C3%A1&showPhoto_variant=photo_description&show_sp_descr=true&spec_syntax=species&sortby=lat)

MEIER, Eric. Grand fir. In: The Wood Database [online]. 2015 [cit. 2022-03-31].

Dostupné z: (přístupné k 31.3.2022) <https://www.wood-database.com/grand-fir/>

MEIER, Eric. Grand fir (endgrain 10x). In: The Wood Database [online]. 2015 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: (přístupné k 31.3.2022)

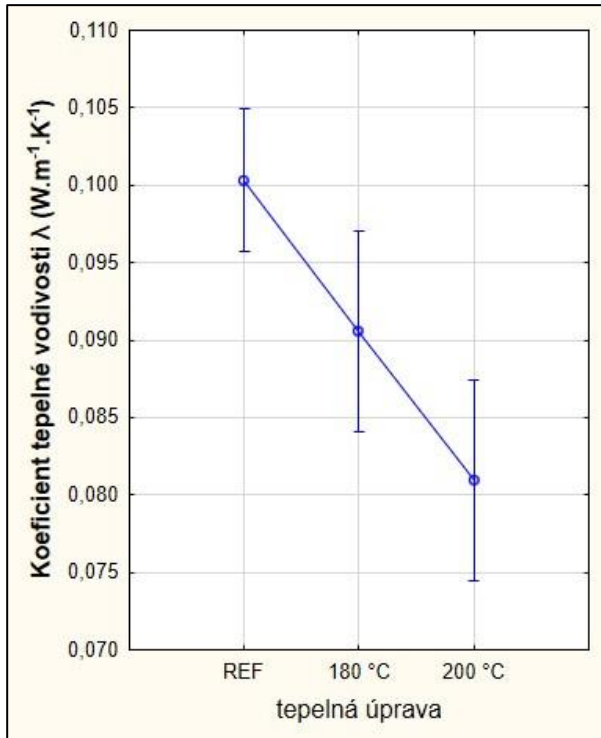
<https://www.wood-database.com/grand-fir/#pics>

MOGHADDAM, Reza Farrahi, Shaohua CHEN, Rachid HEDJAM a Mohamed CHERIED. CIELab color space. In: Researchgate.net [online]. 2013 [cit. 2022-04-05].

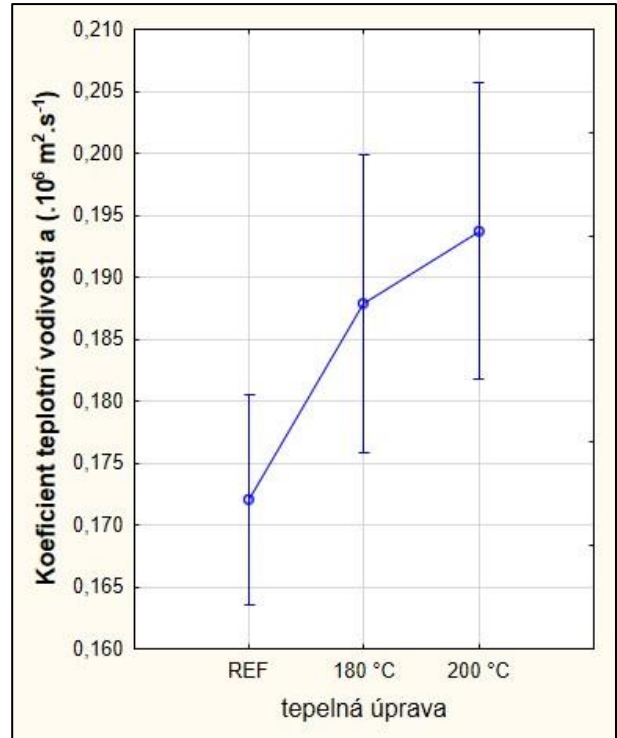
Dostupné z: (přístupné k 5.4.2022)

[https://www.researchgate.net/publication/241689388\\_A\\_maximal-information\\_color\\_to\\_gray\\_conversion\\_method\\_for\\_document\\_images\\_Toward\\_an\\_optimal\\_grayscale\\_representation\\_for\\_document\\_image\\_binarization](https://www.researchgate.net/publication/241689388_A_maximal-information_color_to_gray_conversion_method_for_document_images_Toward_an_optimal_grayscale_representation_for_document_image_binarization)

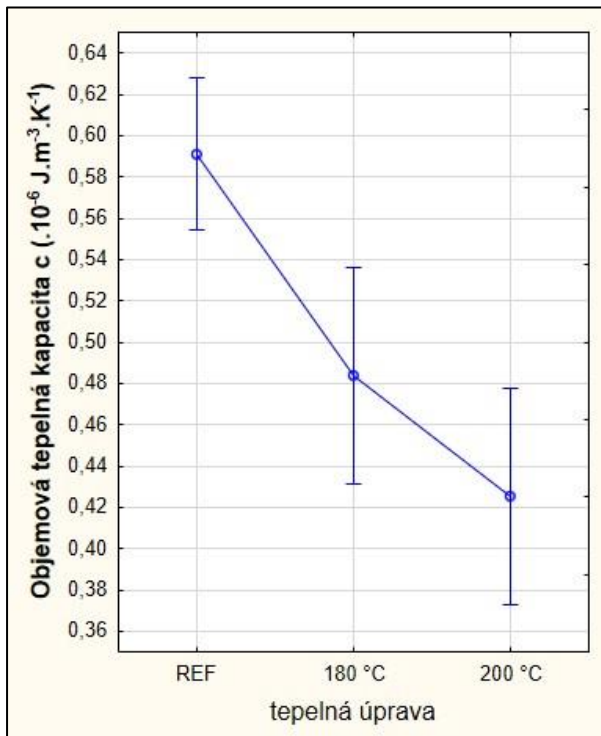
## 8. Přílohy



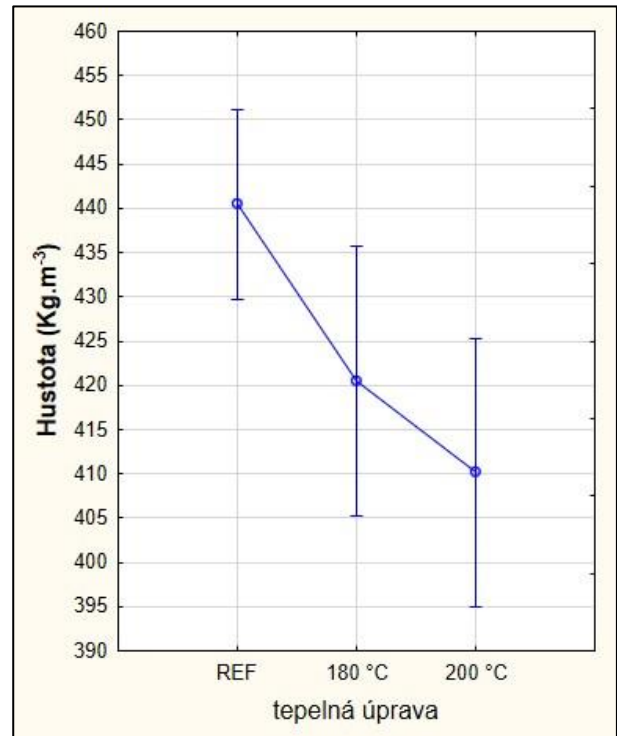
Příloha 1: Vývoj koeficientu tepelné vodivosti po tepelné modifikaci



Příloha 2: Vývoj koeficientu teplotní vodivosti po tepelné modifikaci

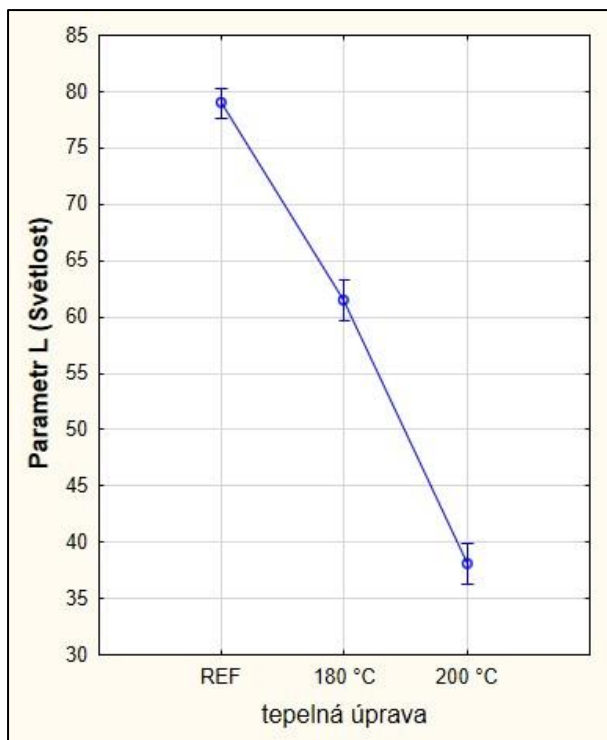


Příloha 3: Vývoj objemové tepelné kapacity po tepelné modifikaci

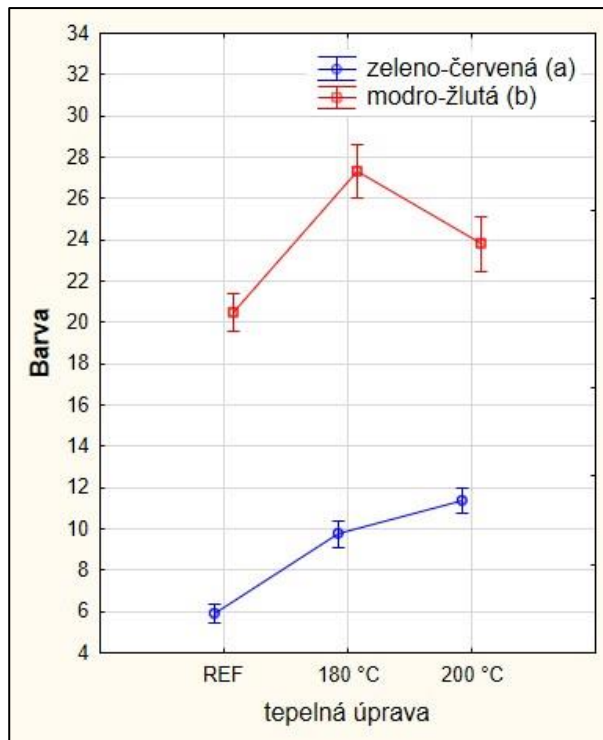


Příloha 4: Vývoj hustoty po tepelné modifikaci

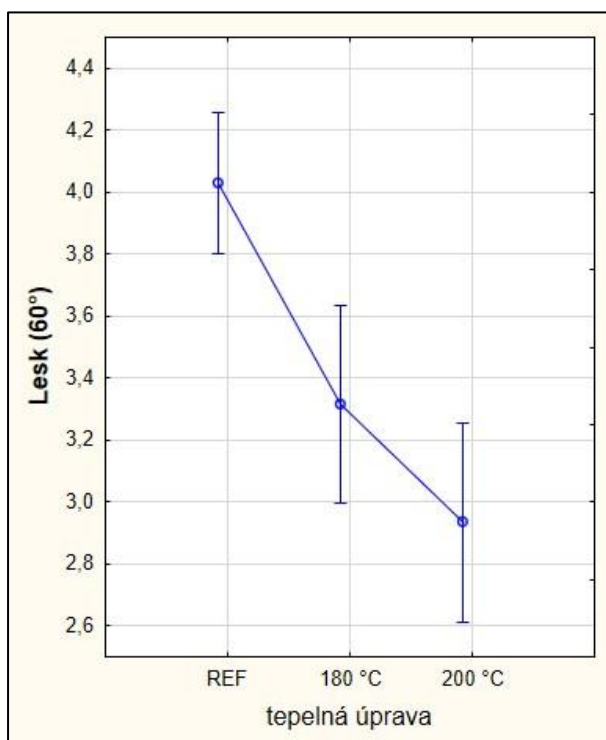




*Příloha 5: Vývoj světlosti po tepelné modifikaci*



*Příloha 6: Vývoj barvy po tepelné modifikaci*



*Příloha 7: Vývoj lesku po tepelné modifikaci*