

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**

**VLIV ROZDÍLNÉ TEPLoty TERMICKÉ MODIFIKACE DŘEVA
NA VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI**

Praha 2021

Jiří Švejda

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VLIV ROZDÍLNÉ TEPLoty TERMICKÉ MODIFIKACE
DŘEVA NA VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ
VLASTNOSTI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:

Dřevařství

Pracoviště (katedra/ústav):

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2021

Jiří Švejda

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce:	Jiří Švejda
Studijní program:	Dřevařství
Obor:	Dřevařství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Garantující pracoviště:	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Jazyk práce:	Čeština
Název práce:	Vliv rozdílné teploty termické modifikace dřeva na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti
Název anglicky:	Influence of different temperature of thermal modification of wood on selected physical and mechanical properties
Cíle práce:	Cílem práce je analyzovat poznatky se zaměřením na dané téma. Následně experimentálním způsobem zjistit vliv jednotlivých stupňů termické úpravy vybraného druhu dřeviny na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky. Předpokládaným výstupem práce by mělo být zhodnocení účinku termické modifikace na sledované charakteristiky.
Metodika:	<ol style="list-style-type: none">1. Úvod (říjen 2020).2. Analýza problematiky (listopad 2020).3. Experimentální část (listopad 2020).4. Měření (prosinec 2020).5. Vyhodnocení (leden 2021).6. Přínosy a doporučení (únor 2021).7. Závěr (březen 2021).
Doporučený rozsah práce:	80 stran
Klíčová slova:	Termická úprava, dřevina, teplota tepelné úpravy, thermo wood

Doporučené zdroje informací:

1. Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. (2013). "Effects of thermal treatment on chemical, mechanical, and colour traits in Norway spruce wood," *Bioresource Technology* 144, 669. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
2. Martinka, J., Chrebet, T., Král, J., and Balog, K. (2013 a). "An examination of the behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions," *Wood Research* 58(4), 599-606.
3. REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. *Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikácie*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.
4. Stark, N. (1997). Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites, *Functional Fillers for Thermoplastics and Thermosets*, Le Meridien at Coronado, San Diego, CA, pp. 2-22.
5. Tabarsa, T., Chui, H., 1996.: Účinok lisovania za tepla na vlastnosti dreveniny WHITE SPRUCE. *COMPOSITES END MANUFACTURED PRODUCTS – FOREST PRODUCTS JOURNAL* 1996.
6. Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," *Journal of Fire Sciences* 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/073490419401200401.
7. Walker, J. C. F., Butterfield, B. G., Langrish, T. A. G., Harris, J. M., and Uprichard, J. M. (1993). *Primary Wood Processing*. Chapman and Hall, London. 595 p.

Předběžný termín 2020/21 LS – FLD
obhajoby:

Elektronicky schváleno: 14. 7.
2020
Ing. Radek Rinn
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno: 21. 10.
2020
prof. Ing. Róbert Marušák,
PhD.
Děkan

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv rozdílné teploty termické modifikace dřeva na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti“, vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, 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.....dne.....

.....

Jiří Švejda

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za vedení, dále bych rád poděkoval panu Ing. Petrovi Paulovi za vstřícný přístup a panu prof. RNDr. Františkovi Kačíkovi, PhD., za pomoc a zapůjčení odborné literatury.

Abstrakt ve státním jazyce

Autor: Jiří Švejda

Téma: Vliv rozdílné teploty termické modifikace dřeva na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti.

Tato práce pojednává o vlivu rozdílné teploty při termické modifikaci dřeva akátu (*Robinia pseudoacácia*) na změnu v základních chemických komponentech dřeva a vlivu těchto změn na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Pro zkušební vzorky byly zvoleny tři stupně teploty termické modifikace, 160 °C, 180 °C a 210 °C. Jedna sada vzorků byla ponechána bez úprav, jako referenční. Na vzorcích, byl experimentálním způsobem, ověřen vliv různé teploty termické modifikace na změnu barvy, tvrdosti podle Brinella a změnu rázové houževnatosti dřeva. Výsledky byly porovnány s referenčními vzorky a prokázalo se, že teplota při termické modifikaci má zásadní vliv na zkoumané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.

Klíčová slova: Termická úprava, dřevina, teplota tepelné úpravy, termodřevo

Abstrakt v cizím jazyce

Author: Jiří Švejda

Theme: Influence of different temperature of thermal modification of wood on selected physical and mechanical properties.

This thesis deals with the influence of different temperatures in thermal modification of acacia wood (*Robinia pseudoacácia*) on the change in the basic chemical components of wood and the influence of these changes on selected physical and mechanical properties of wood. Three thermal modification temperature grades, 160 °C, 180 °C and 210 °C, were selected as the test samples. One set of samples was left unmodified as a reference. The effect of different temperatures of thermal modification on color change, Brinell hardness and change in impact strength of wood was experimentally tested on the samples. The results were compared with reference

samples and it was shown that the temperature during thermal modification has a fundamental effect on the tested physical and mechanical properties of wood.

Keywords: Thermal treatment, woody plant, temperature modification of wood, thermowood

Obsah

Seznam ilustrací	11
Seznam tabulek	13
Seznam zkratk a značek	14
Slovník termínů.....	15
Úvod	16
1 Cíl práce.....	17
2 Analýza literárních poznatků k předmětné problematice	18
2.1. Modifikace dřeva jako ochrana.....	18
2.2. Termická modifikace dřeva	18
2.3. Technologie na výrobu Termodřeva.....	19
2.3.1. ThermoWood	21
2.3.2. PlatoWood.....	22
2.3.3. RetificatedWood	23
2.3.4. OHT – Wood.....	23
3 Struktura dřeva a její změna při termické modifikaci	24
3.1. Účinek termické modifikace na chemickou strukturu dřeva	24
3.2. Změny v anatomii termicky modifikovaného dřeva.....	25
4 Základní znaky dřeva – fyzikálních a mechanických vlastností	27
4.1. Anizotropie dřeva.....	28
4.2. Pórovitost dřeva	28
4.3. Hygroskopicitá dřeva	29
4.4. Nehomogenita dřeva	29
5 Důležité fyzikální vlastnosti z pohledu termicky upraveného dřeva.	30
5.1. Hustota dřeva	30
5.2. Vlhkost dřeva	31
5.3 Navlhavost a nasákivost dřeva.....	33
5.4. Hygroskopicitá.....	33
5.5. Rozměrová stabilita	34
5.6. Bobtnání a sesychání dřeva.....	34
5.7. Barva a povrch dřeva	35
5.8. Tepelné vlastnosti dřeva	37

5.9. Akustické vlastnosti dřeva	37
6 Důležité mechanické vlastnosti z pohledu termicky upraveného dřeva	39
6.1. Mechanické vlastnosti.....	39
6.2. Mechanické namáhání	40
6.3. Pevnost dřeva	42
6.4. Pružnost dřeva a moduly pružnosti.....	43
6.5. Tlak, tah a smyk.....	45
6.6. Smyk a krut.....	47
6.7. Plastičnost dřeva	48
6.8. Houževnatost dřeva.....	49
6.9. Tvrdost dřeva	49
6.10. Faktory ovlivňující pevnost a pružnost dřeva	50
7 Metodika	52
8 Metodika praktické části.....	53
8.1. Výběr dřeviny	53
8.2. Výroba a příprava těles pro praktické zkoušky.....	53
8.3. Značení, měření rozměrů a vážení	56
8.4. Praktické měření	58
8.4.1. Barva.....	58
8.4.2. Tvrdost podle Brinella	60
8.4.3. Rázová houževnatost	64
8.4.4. Chemická analýza	67
8.5. Zpracování výsledků v softwaru Statistica 12	67
9 Výsledky a diskuze.....	68
9.1. Zpracování výsledků vlivu teploty termické úpravy na barevné změny	68
9.2. Zpracování výsledků vlivu teploty termické úpravy na tvrdost.....	72
9.3. Zpracování výsledků vlivu teploty termické úpravy na rázovou houževnatost.....	75
9.4. Analýza účinků teploty termické modifikace na hodnoty chemických komponentů.....	77
10 Závěr	88
10.1. Chemická analýza	88
10.2. Barva.....	89
10.3. Tvrdost podle Brinella	90
10.4. Rázová houževnatost	91

10.5. Shrnutí.....	91
11 Seznam použité literatury	93

Seznam ilustrací

Obr. 1 Mezinárodní produkce termodřeva registrovaných firem	20
Obr. 2 Podíl jednotlivých dřevin na výrobě termodřeva	20
Obr. 3 Schéma výrobního procesu	22
Obr. 4 Pokles polymerizačního stupně celulózy	25
Obr. 5 Prostorové vyobrazení Borovice (<i>Pinus sylvestris</i>)	27
Obr. 6 Prostorové vyobrazení Jasan (<i>Fraxinus excelsior</i>)	28
Obr. 7 Nomogram pro převod relativní a absolutní vlhkosti dřeva	32
Obr. 8 Křivka sorpce a desorpce	34
Obr. 9 Termicky upravené dřevo	36
Obr. 10 Anizotropní model vlastností dřeva	40
Obr. 11 Pracovní diagram	41
Obr. 12 Vliv teploty na ohybovou pevnost, Borovice	43
Obr. 13 Rozložení napětí po výšce nosníku	44
Obr. 14 Vliv teploty na modul pružnosti, Borovice	45
Obr. 15 Zobrazení působení smykových sil na těleso	48
Obr. 16 Vliv teploty na tvrdost podle Brinella, Borovice	50
Obr. 17 Rozměry zkušebních těles na zkoušky tvrdosti a barevných změn.....	54
Obr. 18 Rozměry zkušebních těles pro měření rázové houževnatosti.....	54
Obr. 19 Termokomora Katres, kde se uskutečnila výroba zkušebních vzorků	55
Obr. 20 Graf termické úpravy akátu	56
Obr. 21 Vzorky akátu	57
Obr. 22 Posuvné měřidlo KINEX ICONIC	57
Obr. 23 Laboratorní váha KERN PSB/PBJ	58
Obr. 24 Spektrofotometr Konica Minolta CM – 700 d	58
Obr. 25 Barevný prostor CIE L*a*b*	59
Obr. 26 Brinellova metoda tvrdosti	61
Obr. 27 Tvrdoměr DuraVision-30	62
Obr. 28 Detail upnutí vzorku do tvrdoměru DuraVision-30	63
Obr. 29 Charpyho kladivo nákres	65
Obr. 30 Charpyho kladivo Instron 450 MPX-J2	65
Obr. 31 Ukázka rozhraní softwaru Bluehill Impact	65
Obr. 32 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty souřadnice L* a její změna v průběhu termické modifikace	69

Obr. 33 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na hodnoty souřadnice a^* a její změna v průběhu termické modifikace	70
Obr. 34 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na hodnoty souřadnice b^* a její změna v průběhu termické modifikace	71
Obr. 35 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na hodnoty celkové změny barvy ΔE a její změna v průběhu termické modifikace	72
Obr. 36 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na hodnoty tvrdosti podle Brinella.....	73
Obr. 37 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na hodnoty rázové houževnatosti.....	76
Obr. 38 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na hodnoty celulózy	79
Obr. 39 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na doprovodných látek	80
Obr. 40 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na hemicelulózy	82
Obr. 41 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na holocelulózy	83
Obr. 42 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnoticí účinek teploty termické modifikace na ligninu	85

Seznam tabulek

Tab. 1 Moduly pružnosti vybraných dřev při vlhkosti 12 %	44
Tab. 2 Poissonova čísla vybraných dřev	45
Tab. 3 Mechanické vlastnosti akátu	53
Tab. 4 Termické modifikace akátu	56
Tab. 5 Vyhodnocení celkové změny barvy ΔE^*	60
Tab. 6 Parametry měření tvrdosti BRINELL	62
Tab. 7 Celková barevná změna ΔE^* a změna jednotlivých souřadnic CIE $L^*a^*b^*$	68
Tab. 8 Statistické posouzení vlivu teploty na barevnou změnu souřadnice L^*	69
Tab. 9 Statistické posouzení vlivu teploty na barevnou změnu souřadnice a^*	70
Tab. 10 Statistické posouzení vlivu teploty na barevnou změnu souřadnice b^*	71
Tab. 11 Vyhodnocení celkové změny barevného prostoru ΔE^*	72
Tab. 12 Průměrné hodnoty naměřené tvrdost podle Brinella	73
Tab. 13 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na tvrdost podle Brinella	74
Tab. 14 Ověření vlivu teploty termické úpravy na tvrdost podle Brinella, Duncan test	74
Tab. 15 Průměrné naměřené hodnoty rázové houževnatosti	75
Tab. 16 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na rázovou houževnatost	76
Tab. 17 Ověření vlivu teploty termické úpravy na rázovou houževnatost, Duncan test	77
Tab. 18 Chemická analýza základních složek dřeva akátu	78
Tab. 19 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na celulózu	78
Tab. 20 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na doprovodné látky	80
Tab. 21 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na hemicelulózu	81
Tab. 22 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na holocelulózu	83
Tab. 23 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na lignin	84
Tab. 24 Korelační koeficient v závislosti na chemických složek dřeviny akátu na tvrdost podle Brinella	86
Tab. 25 Korelační koeficient v závislosti na chemických složek dřeviny akátu na rázovou houževnatost	86
Tab. 26 Korelační koeficient v závislosti na chemických složek dřeviny akátu na změnu barvy	87

Seznam zkratek a značek

BNV – bod nasycení vláken

SVR – stav vlhkostní rovnováhy

MH – mez hygroskopicity

% – procenta

ρ – hustota dřeva

φ – relativní vzdušná vlhkost

t – teplota

w – vlhkost dřeva

α – bobtnání

β – sesychání

α – teplotní roztažnost

Hz – hertz

σ – normálové napětí

τ – smykové napětí

ε – normálové deformace

γ – smykové deformace

E – modul pružnosti

μ – Poissonova čísla

CIE L*a*b* – prostorový model pro měření barvy

ΔE^* – barevná změna

H_{Bw} – tvrdost dřeva podle Brinella

A_w – rázová houževnatost

ref – referenční hodnota

Slovník termínů

Dřevo je přírodní obnovitelný materiál, který lidé využívají od pradávna pro stavební účely a otop. Při rozumném zacházení je tato surovina prakticky nevyčerpatelná.

Termodřevo je dřevěný materiál, který prošel určitým teplotním stupněm termické modifikace za účelem zlepšení jeho fyzikálních a mechanických vlastností. Tento typ modifikace je nejvyužívanější modifikací dřeva vůbec.

Barva je charakterizována zrakovým vjemem člověka, který závisí na složení spektra odražených světelných paprsků od povrchu předmětu.

Tvrдость je schopnost materiálu klást odpor proti vnikání cizího tělesa do jeho struktury.

Rázová houževnatost nám udává potřebnou energii na přeražení zkušební vzorku v závislosti na jeho průřezu.

Úvod

Dřevo je jeden z prvních materiálů, které člověk dokázal společně s kameny využít k různým účelům, jako zlepšení životních podmínek a tento materiál stál i u zrodu naší moderní civilizace. Dřevo je lehce dostupné, poměrně snadno opracovatelné a díky svým užitným vlastnostem se řadí mezi nejpoužívanější materiály. S příchodem umělých materiálů se zdálo, že dřevo ztrácí popularitu, avšak opak je pravdou. V současné době se tento materiál těší velké oblibě z důvodů ekologie a při šetrném a rozumném hospodaření je tento materiál i lehce obnovitelný a téměř nevyčerpatelný. Dřevo jako materiál má mnoho výhod a nevýhod. Mezi jeho přednosti lze například počítat velkou pevnost při poměru k hmotnosti, snadnou opracovatelnost, estetický vzhled. Oproti tomu má také nevýhody, jako například nehomogenita, navlhavost a nasáklivost, nízká odolnost vůči biotickým činitelům. Lidé se snaží dřevo od pradávna různými způsoby upravovat (modifikovat), aby eliminovali, nebo alespoň vylepšili některé jeho negativní vlastnosti. Tyto modifikace následně vedou ke zlepšení námi sledovaných vlastností, které mají zásadní vliv na životnost výrobků ze dřeva. V současné době má poptávka po kvalitním dřevu stoupající tendence, tudíž jednou z možností, jak šetřit s touto surovinou je její modifikace, která zajistí prodloužení užitných vlastností výrobků ze dřeva. Za modifikaci lze prakticky považovat jakoukoliv úpravu, která zlepší jednu, nebo více negativních vlastností, při zachování, nebo zlepšení stávajících pozitivních vlastností. Jednou z možností úpravy je tepelná modifikace dřeva. A právě problematiku tepelné modifikace dřeva jsem si zvolil jako téma mojí závěrečné bakalářské práce. Na základě dostupných informací lze konstatovat, že tepelná modifikace je nejpoužívanější způsob modifikace dřeva vůbec. Proces tepelné modifikace dřeva je znám více než sto let, ale náročnou technologii se podařilo zvládnout až koncem devadesátých let minulého století ve Finsku a výrobek dostal obchodní název Thermowood. Tato technologie se neustále vyvíjí, ale přes všechny snahy se zatím nepodařilo dosáhnout takové ochrany, aby dřevo mohlo být vystaveno kontaktu se zemí. Termodřevo je převážně určeno na obklady stěn a budov, výrobu terasových podlah a zahradního nábytku. Kromě zlepšení biotické a abiotické odolnosti, tento výrobek skýtá i některé další výhody, jako například estetický vzhled výrobku a použití dřeva bez nutnosti dalších povrchových úprav. Na druhou stranu se termodřevo nedoporučuje používat ke konstrukčním účelům z důvodu zhoršení některých mechanických vlastností termodřeva během výrobního procesu.

1 Cíl práce

Cílem práce je analyzovat odborné a experimentální poznatky, se zaměřením na vliv rozdílné teploty termické modifikace dřeva na změnu v základních chemických komponentech dřeva a vliv těchto změn na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Následně zjistit experimentálním způsobem, vliv jednotlivých stupňů termické úpravy vybraného druhu dřeviny na vybrané fyzikální – mechanické charakteristiky. S ohledem na zadání bakalářské práce, lze cíl práce rozdělit následujícím způsobem:

- analýza literárních poznatků k předmětné problematice,
- v laboratoři experimentálním způsobem ověřit vliv teploty termické modifikace na dřevinu akátu (*Robinia pseudoacacia*), při teplotách (160 °C, 180 °C a 210 °C) na zvolené fyzikální vlastnosti (barva) a mechanické vlastnosti (tvrdost a rázová houževnatost) a porovnat s referenčním vzorkem,
- zjistit účinek teploty termické modifikace na změny chemických komponentů,
- na základě naměřených hodnot vyhodnotit účinky termické modifikace na sledované fyzikální a mechanické charakteristiky,
- vyhodnotit vzájemnou interakci mezi změnami chemických komponentů a sledovanými fyzikálními a mechanickými charakteristikami.

2 Analýza literárních poznatků k předmětné problematice

2.1. Modifikace dřeva jako ochrana

První kapitola je věnována teoretickému vymezení vztahující se k modifikaci dřeva. Všechny materiály mají svojí určitou životnost a u dřeva tomu není jinak. Tento materiál je přírodní a jako takový podléhá různým biotickým a abiotickým degradacím, tím je jeho životnost značně omezená. Vše samozřejmě záleží na expozičních podmínkách, ve kterých se daný výrobek nachází. Dřevo jako materiál doprovází lidstvo již po staletí a v dnešní době tomu není jinak, již od časů minulých se lidé všemožně snaží těmto degradacím zabránit, nebo alespoň zmírnit jejich dopad.

Některé druhy dřevin mají dostatečnou odolnost vůči degradačním činitelům již díky přírodě samotné, jedná se převážně o tropické druhy, také některé naše dřeviny si nevedou špatně, např. akát, dub, modřín, ale jedná se jen o jádrové dřevo. Z tohoto důvodu se snažíme různými modifikačními způsoby prodloužit životnost výrobků ze dřeva.

Dřevo lze modifikovat vícero způsoby, tato práce se tedy zabývá termickou metodou úpravy dřeva zvanou Thermowood, které se detailně budu zabývat v následujících kapitolách, Je třeba zmínit, že existují ještě další metody, mechanická, chemická a enzymatická metoda. Při těchto modifikačních procesech se snažíme zlepšit nepříznivé vlastnosti dřeva a ty příznivé zlepšit, nebo alespoň zachovat. Vše záleží na tom, jaké vlastnosti jsou pro daný výrobek důležité, ať už je to např. rozměrová stabilita, navlhavost, hořlavost, pevnost, pružnost atd. U konstrukčního dřeva se klade velký důraz na to, aby nedošlo ke zhoršení mechanických vlastností dřeva. Z toho plyne, že některé modifikační metody nejsou pro tento účel použití vhodné (Reinprecht-Pánek 2016, Reinprecht-Vidholdová 2008).

2.2. Termická modifikace dřeva

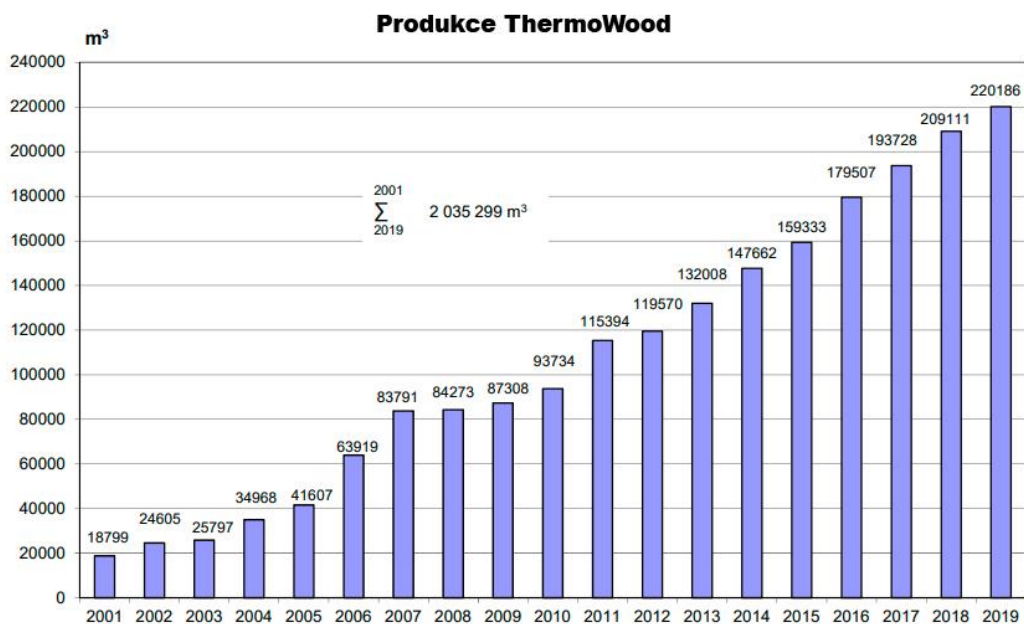
Při těchto technologických postupech se dřevo vystavuje zvýšeným teplotám, ať už při umělém sušení, vaření, páření, lisování, impregnaci při zvýšené teplotě atd. Při těchto procesech se pohybuje teplota v intervalu od 50 °C do 140 °C po velmi krátký

časový úsek. Za těchto podmínek nedochází ve dřevě k velkým chemickým změnám a tím pádem ani k ovlivnění fyzikálních a mechanických vlastností. Ke znatelným změnám dochází až při překročení teploty 150 °C a delší časové expozici. Nejrozšířenější tepelnou modifikací je bez pochyby výroba termodřeva. I když tato modifikace neposkytuje tak dobré výsledky trvanlivosti dřeva jako chemické metody, např. acetylované dřevo, vykazují větší odolnost než dřevo rostlé. Tato technologie se těší velké oblibě také z důvodu, že je považovaná za velmi ekologickou. Technologii výroby bude věnována kapitola 1.2. Termodřevo se nedoporučuje vystavovat do kontaktu s terémem, ale výzkum v této oblasti neustále pokračuje a vlastnosti termodřeva se neustále zlepšují. V současné době je největší problém termodřeva, že při vyšších stupních úpravy dochází k poškození jak amorfni části celulózy, tak v menší míře i krystalické části celulózy a tím pádem k znatelnému poklesu mechanických vlastností, jako je například pevnost, pružnost, rázová houževnatost (Hill 2006, Reinprecht-Vidholdová 2008).

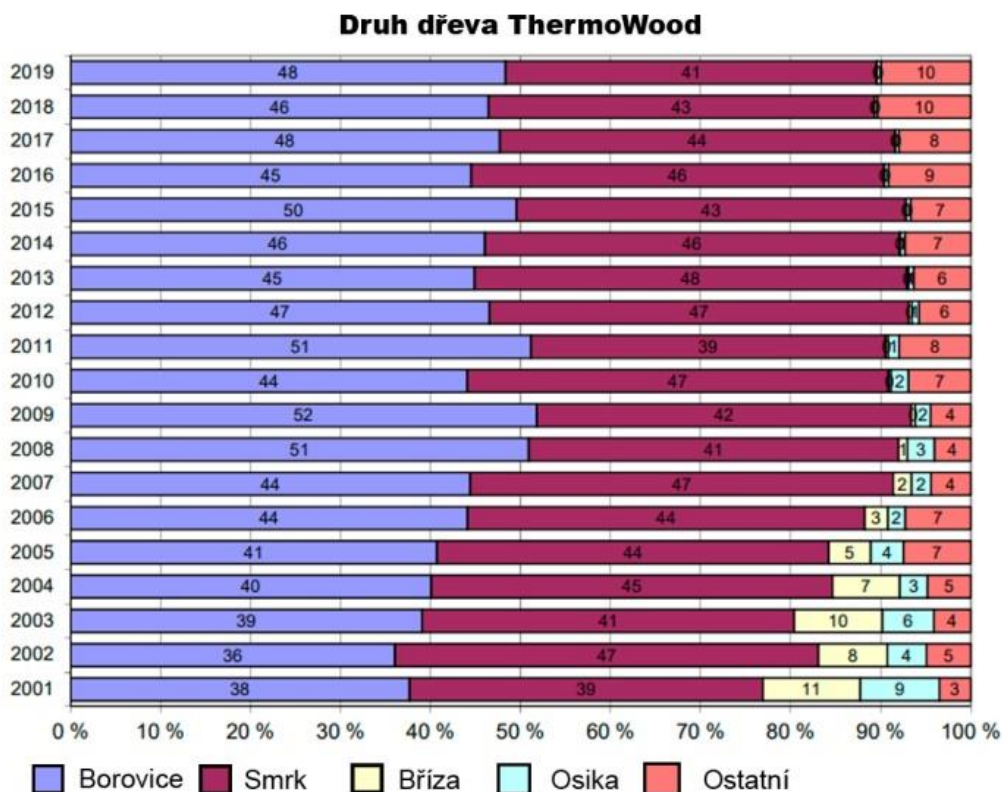
2.3. Technologie na výrobu Termodřeva

Tato kapitola se zabývá výrobní technologií termodřeva a je velmi podstatná k pochopení celého výrobního procesu.

První vědecké práce o tepelně upraveném dřevu jsou staré kolem 90 let a objevily se v Německu, ovšem technologii se podařilo zvládnout až v devadesátých letech minulého století ve Finsku po dlouholetém výzkumu a výrobek dostal název Thermowood. Od té doby se tento výrobek rozšířil i do ostatních zemí a dnes se Termodřevo průmyslově vyrábí více než 25 let (Reinprecht-Vidholdová 2008). Podíl výroby neustále rok od roku stoupá (obr. 1) a v loňském roce dosáhl objem produkce 220186 m³ (Production statistics 2019). Termicky upravit se dá prakticky jakákoliv dřevina, ale v dnešní době se nejvíce používají smrk, borovice, bříza a osika (obr. 2). Jedná se o proces, při kterém se dřevo vystaví teplotám od 150 do 260 °C a tím dochází ve dřevě k chemickým změnám, to vede ke zlepšení jeho odolnosti vůči biotickým a abiotickým činitelům a v neposlední řadě je nutno dbát na to, aby nedošlo k přílišnému zhoršení mechanických vlastností (Reinprecht-Vidholdová 2008).



Obr. 1 Mezinárodní produkce termodřeva registrovaných firem (Production statistics 2019)



Obr. 2 Podíl jednotlivých dřevin na výrobě termodřeva (Production statistics 2019)

V dnešní době se používá více technologií na výrobu termodřeva, ale v Evropě se nejvíce podílí na produkci termodřeva tyto technologie:

- **ThermoWood** – úprava dřeva probíhá v atmosféře vzduchu,
- **PlatoWood** – úprava dřeva probíhá v prostředí vodní páry,
- **RetificatedWood** – úprava dřeva probíhá v prostředí inertních plynů,
- **OHT-Wood** – úprava dřeva probíhá v olejích (ThermoWood Handbook 2003).

2.3.1. ThermoWood

Tento výrobní proces se skládá ze tří fází (obr. 3)

1. fáze – sušení při zvýšené teplotě:

Materiál se zahřeje na teplotu 100 °C za přítomnosti vodní páry, teplota dále stoupá na 130 °C a probíhá sušení za pomoci horké páry nebo vzduchu. Po vysušení dřeva na požadovanou vlhkost, která se blíží k nulové vlhkosti, začíná další fáze.

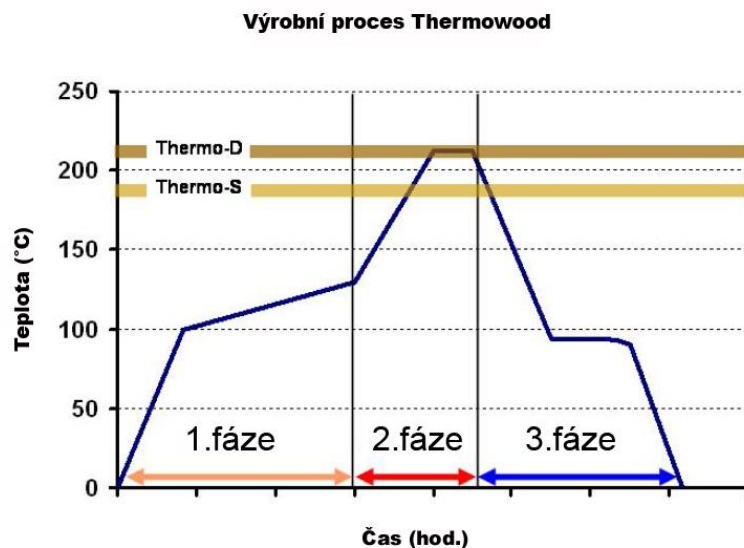
2. fáze – tepelná úprava:

V druhé fázi se materiál zahřeje na teplotu 185 až 215 °C na dobu dvou až tří hodin, v závislosti na požadované třídě termodřeva (Thermo-S, Thermo-D).

3. fáze – korekce teploty a ochlazení:

V poslední fázi se uskuteční ochlazení materiálu pomocí vodního postřikovacího systému a po dosažení teploty 80 až 90 °C se uskuteční zvýšení vlhkosti materiálu na hodnotu 4 až 7 % (Thermowood handbook 2003).

V rámci dosažení nejlepších výsledků musí být tato technologie přizpůsobena každé jednotlivé dřevině. Thermo-S je určené převážně do interiéru, znak S v názvu značí rozměrovou a tvarovou stabilitu, Thermo-D lze použít i v exteriéru, znak D v názvu značí trvanlivost, svými parametry se řadí do třetí skupiny odolnosti (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood®).



Obr. 3 Schéma výrobního procesu (ThermoWood handbook 2003)

2.3.2. PlatoWood

Tento výrobní proces pozůstává ze čtyř fází, probíhá při nižší teplotě než v předchozím případě, v atmosféře vodní páry při zvýšeném tlaku. Tento způsob je energeticky i časově náročnější.

1. fáze – hydrotermolýza:

V první fázi dochází k hydrotermické úpravě dřeva v prostředí o vyšším tlaku, v intervalu 0,6 až 1 MPa a teplotě 150 až 190 °C, v prostředí horké páry, nebo horkého vzduchu v závislosti na vlhkosti vstupní suroviny. Proces trvá 4 až 5 hodin a je dosažena vlhkost dřeva 14 až 20 %.

2. fáze – sušení:

V této fázi dochází ke klasickému sušení dřeva na vlhkost 7 až 10 %, které se pohybuje v závislosti na rozměrech od 3 dnů až 3 týdnů.

3. fáze – vytvrzování:

Při tomto procesu, který se pohybuje v časovém intervalu 12 až 16 hodin, se dřevo stabilizuje při tlaku 0,1 MPa a teplotě 150 až 190 °C. V této fázi je rovněž omezen přístup kyslíku a vlhkost klesá až pod 1 %.

4. fáze – úprava vlhkosti:

Cílem této fáze je upravit konečnou vlhkost sortimentu na 4 až 6 %, časová náročnost této závěrečné fáze se pohybuje v závislosti na rozměrech sortimentu do 3 dnů.

U tohoto typu výrobku dochází ke zlepšení rozměrové stability o 50 %, u hygroskopicity dochází ke zlepšení o 30 až 40 %, rovněž se dá hovořit o zlepšení biotických degradací. V případě rázové houževnatosti dochází k citelnému poklesu 5 až 20 %, zároveň při těchto teplotách nedochází ke změně modulu pružnosti, v některých případech došlo dokonce ke zlepšení této vlastnosti (Reinprecht-Vidholdová 2008, Hill 2009).

2.3.3. RetificatWood

Při tomto procesu se nejprve vstupní surovina vysuší na vlhkost 12 % a následně se dřevo postupně zahřívá na teplotu 210 až 260 °C v ochranné atmosféře tvořené dusíkem. Obsah kyslíku se pohybuje pod hranicí 2 % a vzhledem na nepatrné množství kyslíku jsou zpomalené termooxidační procesy, z čehož plyne lepší zachování mechanických vlastností daného dřeva (Reinprecht-Vidholdová 2008).

2.3.4. OHT – Wood

Při tomto procesu se dřevo připravuje v horkém rostlinném oleji. Dřevo se nachází v impregnačním kotli ponořené v rostlinném oleji o teplotě 200 až 220 °C. Tento olej proniká do materiálu a tím ho zahřívá, expoziční časy záleží na rozměrech daného sortimentu. Olej také zároveň brání přístupu kyslíku a tím jsou zpomalené termooxidační procesy dřeva, což má za následek lepší mechanické vlastnosti hotového výrobku. Při této technologii se nejčastěji používá lněný nebo řepkový olej (Reinprecht-Vidholdová 2008). V kapitole 2 se budeme věnovat procesu, ke kterému dochází ve struktuře dřeva při termické modifikaci dřeva.

3 Struktura dřeva a její změna při termické modifikaci

3.1. Účinek termické modifikace na chemickou strukturu dřeva

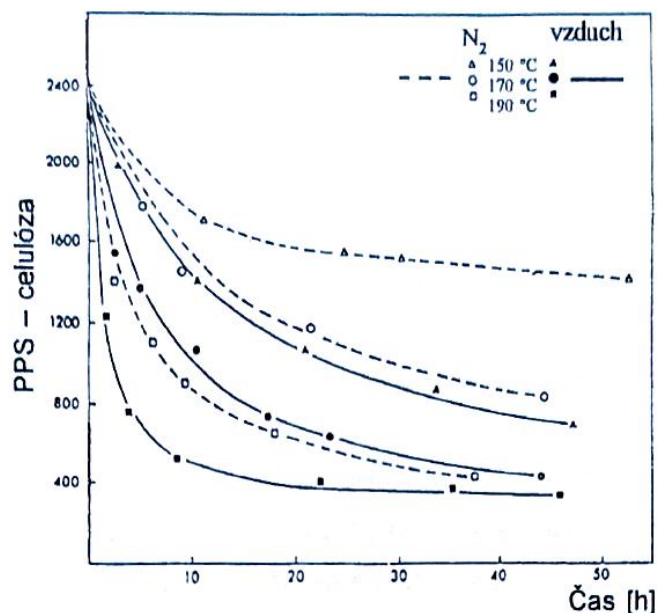
Při termických úpravách dřeva dochází ke změně chemické struktury dřeva, to má za následek změnu fyzikálních a mechanických vlastností. Tyto změny se odvíjejí od technologie zpracování, chemické reakce způsobené termickou modifikací jsou ovlivněny těmito faktory:

- výškou teploty a expozičním časem při dané teplotě,
- množstvím kyslíku,
- okolním tlakem,
- tvarem, vlhkostí a druhem sortimentu,
- přidanými látkami (fungicidy, biocidy, retardéry hoření atd.) (Reinprecht-Vidholdová 2008).

Vlivem této technologie se dřevo stává rozměrově stabilnější, odolnější vůči biotickým a abiotickým činitelům, ale na druhé straně se nelze zcela vyhnout zhoršení některých mechanických vlastností. Tepelná modifikace dřeva probíhá ve většině případů při teplotách 180 až 260 °C, při nižší teplotě dochází jen k nevýrazným změnám, naopak při teplotě nad 300 °C dochází již k podstatné tepelné degradaci dřeva. Základní složky dřeva, celulóza, hemicelulóza, lignin a extraktivní látky, reagují na termickou zátěž rozdílným způsobem. Lignin s celulózou se oproti hemicelulóze odbourávají pomaleji a extraktivní látky se z větší části při zahřátí změny na kapalné, nebo plynné látky a ze dřeva se odpaří. Při termické úpravě dřeva hraje klíčovou roli kyslík, díky němu dochází ve dřevě k termooxidačním reakcím. Napomáhá při termické úpravě rozkladu všech složek dřeva, například přispívá k poklesu polymerizačního stupně celulózy. Ve výrobním procesu je důležité minimalizovat narušení těchto složek dřeva a zabránit depolymerizaci řetězců celulózy, toho se dá docílit zabráněním přístupu kyslíku k termicky upravovanému dřevu, např. příprava ve vakuu, inertní atmosféře dusíku, nebo v rostlinných olejích (Reinprecht-Vidholdová 2008).

Lignin vykazuje při tepelné zátěži nejlepší odolnost, chemicky začíná reagovat až při teplotě 180 až 260 °C, termický rozklad nastává při teplotě 300 až 400 °C. Celulóza je také velmi odolná vůči tepelné zátěži, výrazně začíná degradovat až při teplotě 240 až

350 °C. K určité nízké degradaci celulózy dochází již při teplotě pod 200 °C, avšak ve srovnání s hemicelulózami jsou tyto změny nepatrné (Hill 2006, ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 4 Pokles polymerizačního stupně celulózy v rozdílné atmosféře tvořené dusíkem, nebo kyslíkem, při termické úpravě při teplotách 150 °C, 170 °C a 190 °C (Reinprecht-Vidholdová 2008)

Ovšem už i tyto nepatrné změny v amorfnní části celulózy vedou k poklesu určitých mechanických vlastností. Amorfnní část celulózy je proti depolymerizaci při zvýšené teplotě podstatně více náchylná než krystalická část celulózy. U krystalické celulózy může dokonce v některých případech dojít k nárůstu jejího podílu. Degradace celulóзовých řetězců (obr. 4). Nejméně odolnou složkou jsou hemicelulózy, ke změnám dochází už při nižších teplotách, k intenzivnímu rozkladu dochází při teplotě 170 až 280 °C. U finálního produktu lze pozorovat úbytek hmotnosti, na tomto úbytku mají převážný podíl hemicelulózy (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood Handbook 2003, Kačíková-Kačík 2011).

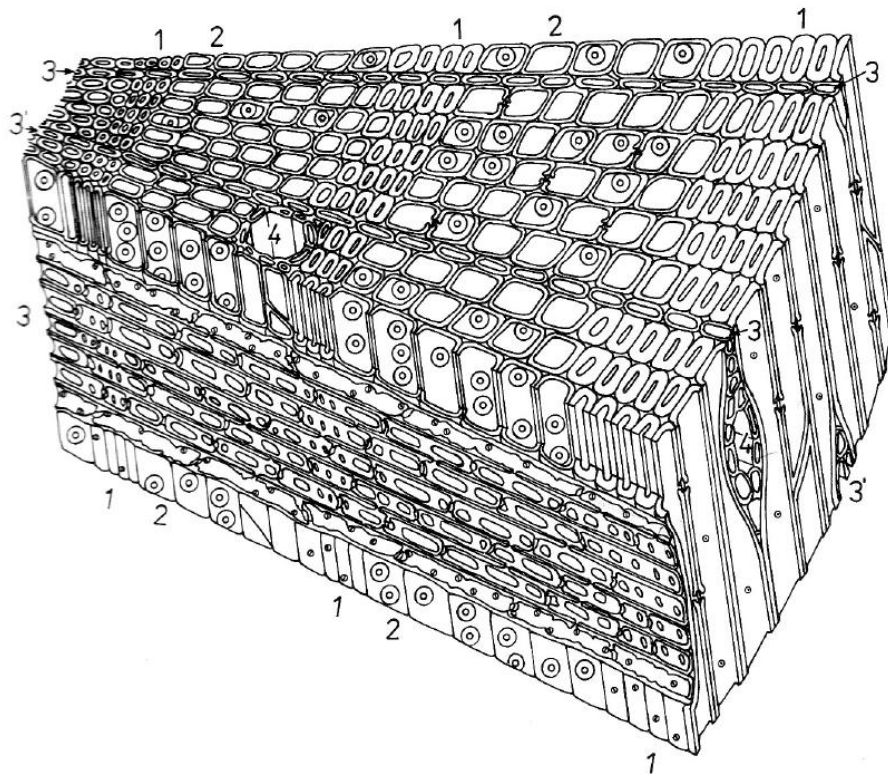
3.2. Změny v anatomii termicky modifikovaného dřeva

Při termické modifikaci dřeva dochází velmi často ke vzniku mikrotrhlin, které se vyskytují v buněčných stěnách. V oblasti ztenčení a na dvojtečkách také dochází k celkovému oslabení buněčných stěn, často se mění i pórovitost. Tyto změny jsou

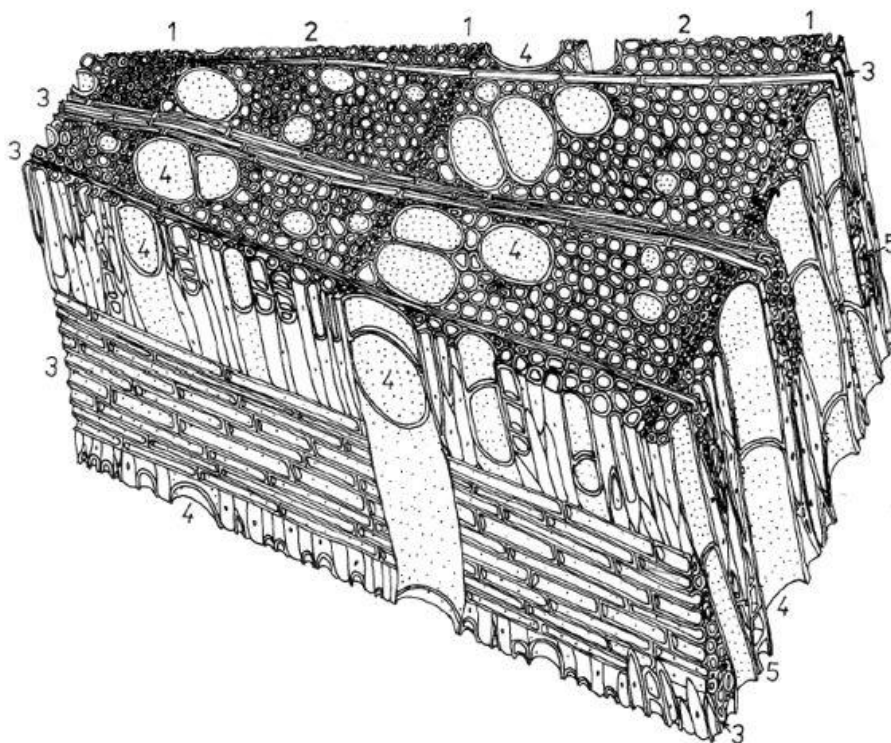
patrnější na povrchu z důvodu přímého kontaktu těchto povrchových vrstev s tepelným zdrojem. Buněčné stěny namáhané teplem jsou křehčí a z toho důvodu se v nich objevují trhliny různé velikosti, současně také dochází ke ztenčení buněčných stěn (Reinprecht-Vidholdová 2008). Následující kapitola se zabývá charakteristickými znaky dřeva, které jsou důležité k pochopení dřeva jako materiálu a jeho různorodosti.

4 Základní znaky dřeva – fyzikálních a mechanických vlastností

Základní vlastnosti dřeva jsou dány chemickým složením a anatomickou stavbou. Velké rozdíly lze pozorovat mezi jehličnatými a listnatými dřevinami (obr. 5 a 6), jak na mikroskopické, submikroskopické, tak makroskopické úrovni (Požgaj a kol. 1993). Stavbou dřeva je dána jeho anizotropie, pórovitost, hygroskopicita, nehomogenita a tímto jsou ovlivněny všechny fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).



Obr. 5 Prostorové vyobrazení Borovice (*Pinus sylvestris*) 1-letní dřevo, 2-jarní dřevo, 3-dřevňový paprsek, 4- pryskyřičný kanálek (Požgaj a kol. 1993)



Obr. 6 Prostorové vyobrazení Jasan (*Fraxinus excelsior*) 1-hranice letokruhu, 2-dřevní vlákna, 3-dřeňové paprsky, 4-cévy, 5-dřevní parenchym (Požgaj a kol. 1993)

4.1. Anizotropie dřeva

S ohledem na rozlišnou anatomickou stavbu dřeva ve třech základních směrech, příčný, radiální a tangenciální se liší i vlastnosti dřeva v těchto směrech, z toho vyplývá, že vlastnosti jsou závislé na směru. Anizotropie se projevuje zejména u mechanického namáhání, pohybem vody ve dřevě, bobtnáním a sesycháním. Například dřevo namáhané ve směru vláken na tah má pevnost 100-150 MPa, oproti tomu v tahu kolmo na vlákna dřevo vykazuje celkově nejmenší pevnost 2-18 MPa. Bobtnání a sesychání podél vláken se udává do 1 %, v příčném směru jsou hodnoty několikanásobně vyšší, v radiální směru 3-6 % a v tangenciálním 6-12 % (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

4.2. Pórovitost dřeva

Dřevo obsahuje velké množství pórů a dá se říci, že mezibuněčné prostory převyšují objem buněčných stěn. Díky pórům je ve dřevě průchodný kapilární systém, který je v živém stromě ve většině případů vyplněn vodou. Propustnost dřeva silně

ovlivňují vyluhovatelné doprovodné látky a tvorba thyl. Pórovitost tak přímo ovlivňuje množství kapaliny, které je dřevo schopno přijmout, a tím přímo ovlivňuje bobtnání a sesychání materiálu ze dřeva. Na pórovitosti je také přímo závislá impregnace dřeva, která plní klíčovou roli při dodatečné ochraně výrobku ze dřeva (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

4.3. Hygroskopicitá dřeva

Dřevo je hygroskopický materiál, který neustále mění svoji vlhkost podle prostředí, ve kterém se nachází. To má ovšem negativní následky hlavně na rozměrové změny (sesychání a bobtnání) a v konečném důsledku jsou také silně ovlivněny mechanické vlastnosti. S rostoucí vlhkostí až do meze hygroskopicity dochází k poklesu mechanických vlastností. S růstem vlhkosti dřeva o 1 % dochází ke zhoršení mechanických vlastností o 2 až 4 % (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

4.4. Nehomogenita dřeva

Strom je během růstu ovlivňován mnoha faktory a na dřevo musíme nahlížet jako na nehomogenní materiál. Nehomogenita vzniká již během růstu na všech úrovních (mikroskopické, submikroskopické a makroskopické) ať už se jedná o stavbu buněk a pletiv nebo na makroskopické úrovni, jako jarní a letní dřevo, dřevné paprsky, jádro, běl atd. Dřevo má rovněž mnoho růstových vad, které také přispívají k nehomogenitě dřeva. Také pohyb vody ve dřevě není rovnoměrný z důvodu velké rozdílnosti mezi jarním a letním dřevem (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996). V kapitole 4 se podrobně popisuje, jak výše zmíněné charakteristické znaky ovlivňují fyzikální vlastnosti dřeva.

5 Důležité fyzikální vlastnosti z pohledu termicky upraveného dřeva

Jak jsem již uvedl v kapitole 3, v kapitole 4 se seznámíme s fyzikálními vlastnostmi, které jsou z mého pohledu a na základě studia odborné literatury, důležité pro termicky upravené dřevo. Při termické modifikaci dřeva dochází k chemickým změnám, které mají pozitivní dopad na fyzikální vlastnosti, jako je rozměrová stabilita, nižší hygroskopicitu a v neposlední řadě větší odolnost proti biotickým a abiotickým činitelům, což má přímou souvislost s obsahem vody ve dřevě (Gaff M. et al. 2019). Klíčovými slovy uvedené kapitoly jsou hustota, vlhkost, hygroskopicitu, barva a další vlastnosti.

Pro každý výrobek jsou významné jeho finální vlastnosti, u termicky modifikovaného dřeva tomu není jinak. Z tohoto úhlu pohledu je pro nás velmi důležitá rozměrová stabilita, hygroskopicitu, hustota a barva, která je z pohledu zákazníka vnímána významně, tepelně izolační vlastnosti a akustické vlastnosti (Reinprecht-Vidholdová 2008). Hlavním důvodem, proč se snažíme termicky modifikovat dřevo, je snaha o zlepšení vlastnosti tohoto materiálu. Primárně se doporučuje u domácích dřevin, které tak následně budou mít širší uplatnění na trhu s dřevařskými produkty (Esteves B. M., and Pereira H. M. 2009). Velkou výhodou, kterou lze bezesporu termicky upravenému dřevu přisoudit je, že při jeho výrobě nejsou použity žádné další chemické látky oproti jiným druhům modifikací. A i přes velké energetické nároky na výrobu, lze tento produkt považovat za ekologický (Gaff M. et al. 2019).

5.1. Hustota dřeva

„Hustota dřeva je charakterizována podílem hmotnosti dřeva a jeho objemu, jednotkou je $kg.m^{-3}$ nebo $g.cm^{-3}$ “ (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Nauka o dřevě, st. 116). Hustota dřeva ρ významně ovlivňuje jak fyzikální, tak i mechanické vlastnosti a je známo, že s rostoucí hustotou je dřevo tvrdší, odolnější a mechanické vlastnosti se zlepšují. Dřevo je materiál, u kterého je velmi obtížné určit hustotu z důvodu jeho hygroskopicity, obsahuje velké množství pórů, které ve většině případů převyšují objem buněčných stěn. Póry mohou být plně, nebo částečně zaplněny vodou, což má

přímý vliv na hustotu dřeva. Lze říci, že hustota je nejdůležitější parametr z důvodu posuzování vlastností dřeva (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Požgaj a kol. 1993).

Pro lepší orientaci v problematice se nejčastěji používají následné hustoty při vlhkostních stavech:

- hustota dřeva v suchém stavu ($w = 0 \%$, pro účely výpočtů a porovnání),
- hustota dřeva při vlhkosti ($w = 12 \%$, této vlhkosti dřevo dosáhne při dlouhodobějším působení relativní vzdušné vlhkosti $\varphi=65 \%$ a teploty $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$),
- hustota dřeva vlhkého ($w > 0 \%$).

Hustota se pohybuje v poměrně širokém rozmezí $130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ u Balzy a $1360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ u Guajaku, měřeno při vlhkosti $W=0 \%$ (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Při procesu termické úpravy dřeva dochází k poklesu hustoty hlavně z důvodu odbourání hemicelulóz a rovněž dojde k odpaření některých doprovodných látek ze dřeva. Hustota klesá s rostoucí teplotou a dobou expozice. V tangenciálním a radiálním směru dojde k mírnému smrštění, ale v příčném směru bylo pozorováno i mírné zvětšení rozměru (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood Handbook, Hill 2006, Dubovský J et al. 1998).

5.2. Vlhkost dřeva

Dřevo je hygroskopický materiál, který je schopný přijímat, nebo odevzdávat vodu okolnímu prostředí v kapalném i plynném stavu. Vlhkost vyjadřuje množství vody, které dřevo obsahuje. **Absolutní vlhkost** (W_{abs}) udává poměr hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva a **relativní vlhkost** (W_{rel}) udává poměr hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva. Absolutní vlhkost dřeva slouží pro charakteristiku mechanických a fyzikálních vlastností a relativní vlhkost se používá všude tam, kde je nezbytné znát skutečný obsah vody ve dřevě. Pro vzájemný přepočítání lze použít nomogram (obr. 7), který slouží pro rychlé orientační přepočítání (Horáček 2008, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).



Obr. 7 Nomogram pro převod relativní a absolutní vlhkosti dřeva (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996)

V praxi je ovšem potřeba počítat s tím, že rozložení vlhkosti ve dřevě není rovnoměrné, mění se v závislosti na ročním období a průběhu dne, rovněž po délce kmene není vlhkost konstantní. Největší rozdíly pozorujeme mezi bělí a jádrem, nebo vyzrálým dřevem. Jehličnany mají v průměru vlhkost vyzrálého dřeva 33-38 % a vlhkost bělí je 112-132 % (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Požgaj a kol. 1997).

Voda ve dřevě se dělí na vodu volnou (kapilární), vodu vázanou (hygroskopickou) a vodu chemicky vázanou.

- **Voda volná** vyplňuje lumény buněk a mezibuněčné prostory, na mechanické a fyzikální vlastnosti má mnohem menší vliv než voda vázaná. Volná voda se ve dřevě nachází za předpokladu, že je již dřevo plně nasyceno vodou vázanou,
- **voda vázaná** se nachází v buněčných stěnách a je vázaná vodíkovými vazbami a nachází se ve dřevě v rozmezí od 0-BNV (bod nasycení vláken), který se pro naše dřeviny udává 22-35 % v závislosti na dřevině. Bod nasycení vláken je stav, při kterém jsou buněčné stěny plně nasyceny vodou, ale mezibuněčné prostory žádnou vodu v kapalném stavu neobsahují. Na mechanické a fyzikální vlastnosti má tato voda zásadní vliv,
- **voda chemicky vázaná**, tato voda se nachází v chemických sloučeninách, ze dřeva jí nelze odstranit jiným způsobem než spálením. Na mechanické a fyzikální vlastnosti nemá žádný vliv (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

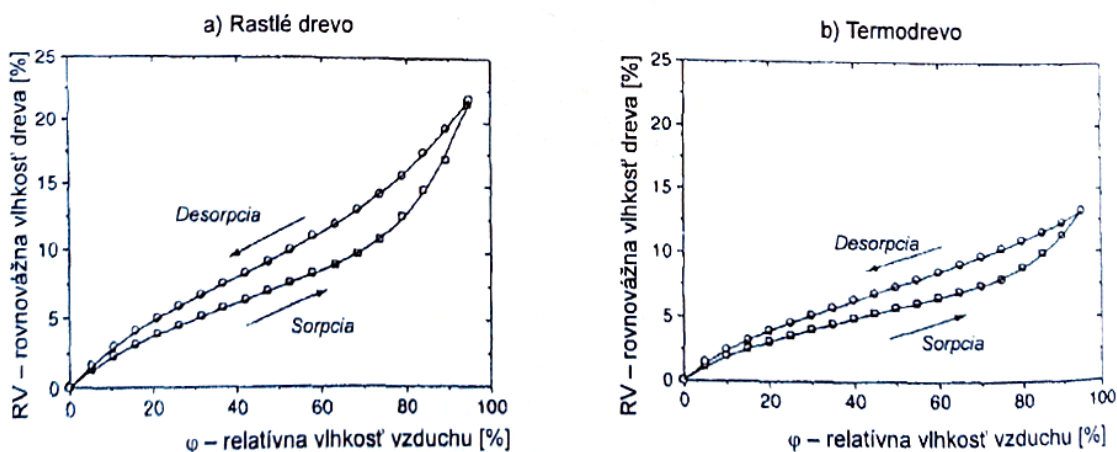
V termicky upraveném dřevě se při stejné relativní vlhkosti, oproti rostlému dřevu nachází menší množství vody, dochází ke snížení bodu nasycení vláken (BNV) o 30 až 70 % v závislosti na dřevině a použité technologii (Reinprecht-Vidholdová 2008).

5.3 Navlhavost a nasáklivost dřeva

Dřevo je materiál, který má schopnost měnit svou vlhkost podle prostředí, ve kterém se nachází. Je schopno pohlcovat vzdušnou vlhkost tak dlouho dokud nedosáhne stav vlhkostní rovnováhy (SVR) s prostředím, nebo naopak dřevo vlhkost vylučuje do prostředí, dokud opět nedosáhne rovnovážný stav. Dřevo má také schopnost díky své pórovité stavbě nasávat vodu přímo v kapalném stavu, ať už při kontaktu se zemí, za deště, nebo při umístění dřeva přímo do vody. V posledním zmíněném případě dřevo dosáhne maximální vlhkost, dosahuje tedy maximální množství vody volné i vázané. Nasáklivost u dřevin je různá, bělové dřevo má vyšší nasáklivost než dřevo jádrové a s rostoucí hustotou dřeva se nasáklivost snižuje (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

5.4. Hygroskopicitá

S vlhkostí úzce souvisí hygroskopicitá, ta se při termické modifikaci dřeva rovněž snižuje (Korkut S. D. et al. 2013). Je to velmi důležitá vlastnost, která má vliv na zlepšení rozměrové stability a zároveň zvyšuje odolnost dřeva vůči biotické degradaci. Pokles hygroskopicity má přímou souvislost s teplotou a expozičním časem během výroby (ThermoWood Handbook 2003). Křivky sorpce a desorpce vykazují u termicky modifikovaného dřeva plošší charakter (obr. 8) a oproti rostlému dřevu dochází ke snížení bodu nasycení vláken (BNV) o 30 až 70 % v závislosti na dřevině a použité technologii. Snížení hygroskopicity termicky upraveného dřeva je způsobeno odbouráním hemicelulóz, blokováním nebo odstraněním hydrofilních-OH skupin a přeskupením hydrofobních látek ve dřevě (Reinprecht-Vidholdová 2008).



Obr. 8 Křivka sorpce a desorpce (a) rostlé dřevo (b) termicky modifikované dřevo v atmosféře dusíku, teplota 250 °C, čas 2 hodiny (Reinprecht-Vidholdová 2008)

5.5. Rozměrová stabilita

Hygroskopicitá úzce souvisí s rozměrovou stabilitou. Vzhledem k nižší hygroskopicitě termicky modifikovaného dřeva je rozměrová stabilita takto upraveného dřeva vyšší. Rozměry se oproti rostlému dřevu se změnou relativní vlhkosti mění v menší míře. Výrobek označený názvem ThermoWood může dosáhnout oproti rostlému dřevu zlepšení této vlastnosti až o 50 %. Nejlepší výsledky jsou dosaženy při ztrátě hmotnosti 15 až 20 % (Reinprecht-Vidholdová 2008).

5.6. Bobtnání a sesychání dřeva

Se změnou množství vody vázané, od 0 % do BNV (bod nasycení vláken) nastávají změny rozměrů, které nazýváme bobtnání nebo sesychání. Tento jev nastává v buněčné stěně, kde dochází k přibližování, nebo oddalování fibril a tím pádem k tvarovým změnám rozměrů dřeva. Orientace fibril v buněčné stěně má přímý vliv na sesychání a bobtnání v určitém směru, na tento jev má nejvýznamnější vliv vrstva S2 (sekundární vrstva buněčné stěny), která tvoří až 90 % buněčné stěny (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Vzhledem na to, že ve vrstvě S2 dochází jen k minimálnímu odklonu vláken (15-30°) dochází k největšímu sesychání a bobtnání napříč vláken. Sesychání a bobtnání má také anizotropní charakter, podél vláken je do 1 %, pro naše dřeviny se interval pohybuje od 0,1–0,4 %, oproti tomu v příčném směru dřevo bobtná a sesychá mnohem

více, v radiálním směru 3–6 % a v tangenciálním směru 6–12 %. Změna množství vody volné nemá na bobtnání a sesychání prakticky žádný vliv, tudíž ho lze zanedbat (Horáček 2008).

Při bobtnání dřevo zvětšuje svůj objem, lineární rozměry nebo plochu, když dochází k přijímání vázané vody v rozsahu od 0 % až MH (mez hygroskopicity). Rozlišujeme bobtnání celkové (maximální), nebo částečné, značí se symbolem (α). Při sesychání dřevo zmenšuje svoje lineární rozměry, plochu nebo objem v důsledku ztráty vázané vody. Sesychání značíme symbolem (β).

Dle koeficientu sesychání dřeva je řadíme do tří základních skupin:

- **dřeva málo sesýchavá** - $K_{\beta i} < 0,4$ (vrba, topol, akát atd.),
- **dřeva středně sesýchavá** - $K_{\beta i}$ v rozmezí 0,4 – 0,47 (borovice, smrk, dub, jedle atd.),
- **dřeva hodně sesýchavá** - $K_{\beta i} > 0,47$ (modřín, buk, habr, lípa atd.) (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Horáček 2008).

Termicky upravené dřevo se vyznačuje menší hygroskopicitou, a to má přímý vliv na bobtnání a sesychání, a s tím spojené rozměrové změny (Reinprecht-Vidholdová 2008).

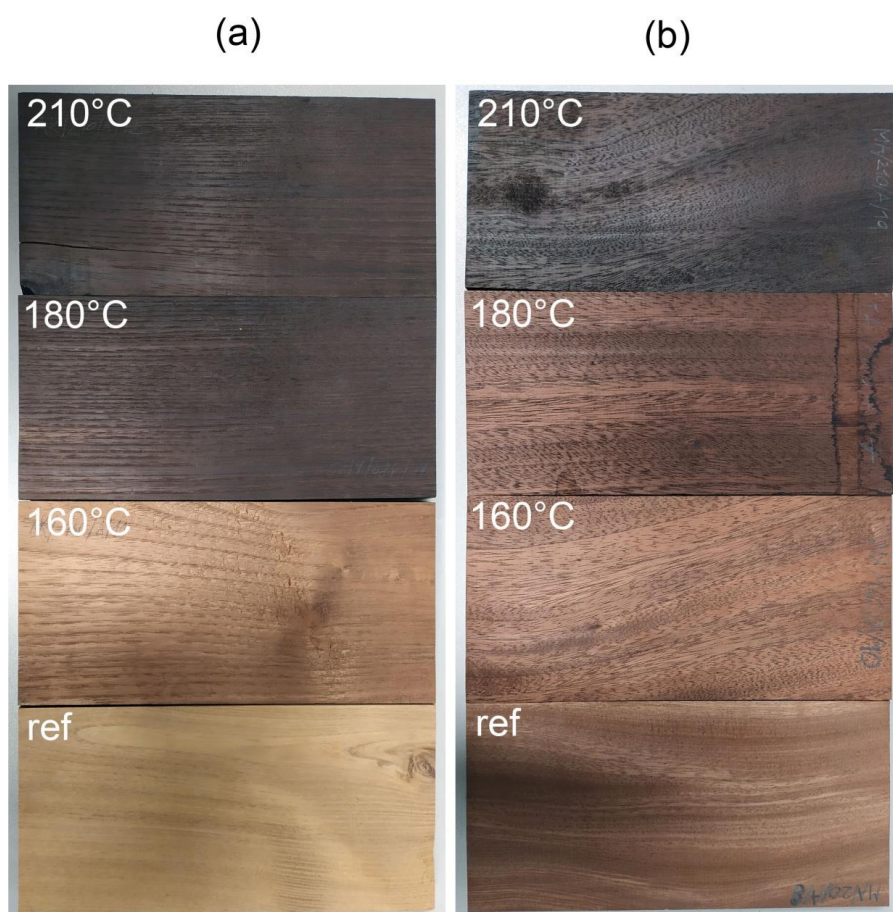
5.7. Barva a povrch dřeva

„Barvou dřeva rozumíme zrakový vjem, který je závislý na spektrálním složení odražených světelných paprsků.“ (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Nauka o dřevě, st. 132).

Barva je obvykle u výrobku ze dřeva pro lidi velmi důležitá, i když barevnost se dá ovlivnit dodatečnými úpravami. Lidské oko vnímá jen úzké spektrum vlnových délek a to kolem 550 nm. Každé oko je různě citlivé, a tak přesné rozhraní viditelného spektra nelze přesně definovat, pohybuje se v rozmezí 400–700 nm. Vnímání barvy závisí především na spektru odražených paprsků. Dřevu dávají barvu jeho hlavní složky, celulóza, lignin, hemicelulóza a extraktivní látky (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Tak jako na všechny ostatní vlastnosti, má na barvu teplota a doba expozice zásadní vliv. U termicky upraveného dřeva je změna barvy patrná již na první pohled (obr. 9). Zabarvuje se do žluto-hnědých až hnědo-černých odstínů. Čím vyšší teplota a delší expozice, tím je barva tepelně modifikovaného dřeva tmavší. Svoji roli sehrává i technologie výroby, dřevo připravené za přítomnosti kyslíku vykazuje tmavší odstíny než dřevo připravené v atmosféře dusíku. Zajímavou barvu má též dřevo termicky upravené v rostlinném oleji (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood Handbook 2003, Sikora A. et al. 2018).

Barva je pro zákazníka podstatná vlastnost a důležitou roli hraje také její stabilita, v praxi se ukázalo, že barva termicky upraveného dřeva není stálá a časem podléhá atmosférickým vlivům, dochází k zešednutí a ztrátě původního odstínu. Na tuto situaci zareagovali výrobci a vyvinuli přípravky na odstranění šedi a navrácení termodřevu původní barvu, např. firma Owatrol a její výrobek Net-Trol (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood®).



Obr. 9 Termicky upravené dřevo (a) Akát (b) Mahagon (zdroj: autor)

5.8. Tepelné vlastnosti dřeva

Tepelné vlastnosti dřeva a jejich znalosti jsou velmi důležité při sestavování sušicího plánu při umělém sušení dřeva, kde je potřeba přesně znát množství dodávaného tepla, aby nedošlo k poškození sortimentu. Se stoupající teplotou dochází také ke zvětšování objemu tělesa, tak zvané teplotní roztažnosti, kterou značíme α (Reinprecht-Pánek 2016, Horáček 2008).

„Koeficient teplotní roztažnosti α_i vyjadřuje změnu jednotkové délky dřeva při jeho ohřátí o 1 °C.“ (Horáček 2008, Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. str. 82). Zvětšování objemu při teplotní roztažnosti je podobné jako u bobtnání a díky anizotropii je také různé v jednotlivých směrech. V praxi se často díky velmi nízkým hodnotám (10^4 krát menší jako při bobtnání) zanedbatelné. Tak jako v každém materiálu dochází i ve dřevě k přenosu tepla a to sáláním, prouděním a hlavně vedením. Toho se využívá zejména při sušení a posuzování tepelně-izolačních vlastností dřeva. Na vedení tepla ve dřevě se podílí hlavně vlhkost, hustota a jeho anatomická stavba. S rostoucí hustotou a vlhkostí roste i schopnost vést teplo (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Horáček 2008).

Termicky upravené dřevo se také vyznačuje snížením tepelné vodivosti o 10 až 30 %, na první pohled zanedbatelná vlastnost, ale je to velice výhodné na obklady budov, okna, dveře, sauny, z důvodů nižšího přenosu tepla (Reinprecht, Vidholdová 2008).

5.9. Akustické vlastnosti dřeva

Dřevo jako materiál fascinuje člověka již od nepaměti, časem bylo zjištěno, že tento materiál má výborné akustické vlastnosti. Díky nim se hojně využívá na výrobu hudebních nástrojů a jako obkladu stěn pro zlepšení akustických vlastností (Horáček 2008).

„Akustické vlastnosti jsou vyjadřovány schopností materiálu utlumit, vést nebo zesílit zvuk.“ (Horáček 2008, Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. str. 111).

Zvuk je v podstatě mechanické vlnění prostředí, které je lidské ucho schopno vnímat, práh slyšitelnosti je velmi individuální, ale pohybuje se většinou v rozmezí 16–20 000 Hz. Rychlost šíření zvuku ve dřevě ovlivňuje jeho hustota, vlhkost, teplota a modul pružnosti. Šíření zvuku má také anizotropní charakter a mění se v závislosti na směru. Nejlépe vede dřevo zvuk v podélném směru a v příčném je v průměru 3x menší.

Se stoupající vlhkostí dřeva rychlost zvuku klesá, a naopak se stoupající hustotou rychlost zvuku roste (Horáček 2008, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

„Rezonancí dřeva nazýváme schopnost dřeva zesilovat zvuk bez zkreslení.“
(Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Nauka o dřevě, st. 130).

Nejlepšími rezonančními vlastnostmi se vyznačují jehličnany, zejména smrk. Rezonanční vlastnosti nejvíce ovlivňuje poměr letního a jarního dřeva, za ideální se považuje obsah letního dřeva v rozmezí 5–20 %. Z toho plyne, že na rezonanční dřeva mají rozhodující význam zejména růstové podmínky. Nejlepší rezonanční vlastnosti lze dosáhnout u dřeva, které vysychalo po dlouhou dobu přirozenou cestou, tím jsou minimalizovány vnitřní trhliny a vnitřní napětí, což vede ke zhoršení rezonančních vlastností dřeva (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996). Akustické vlastnosti jsou u termicky upraveného dřeva rovněž zajímavé. Dřevo se dá připravit v nižších teplotních podmínkách, čímž vznikne materiál, který se dá srovnat se dřevem dlouhodobě skladovaným a určeným na hudební nástroje. Rozměrová stabilita je další výhodou při tomto druhu použití materiálu (Reinprecht-Vidholdová 2008).

V této kapitole byly vymezeny základní fyzikální vlastnosti pro přiblížení dané problematiky a v následující kapitole se budeme zabývat mechanickými vlastnostmi, které jsou neméně důležité z pohledu termicky modifikovaného dřeva.

6 Důležité mechanické vlastnosti z pohledu termicky upraveného dřeva

6.1. Mechanické vlastnosti

Tak jako fyzikální vlastnosti, kterým jsme se věnovali v předchozí kapitole, je i tato kapitola, která je zaměřená na mechanické vlastnosti, velmi důležitá pro pochopení celé problematiky.

„Mechanické vlastnosti dřeva charakterizují schopnost odolávat účinkům vnějších sil.”(Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Nauka o dřevě, st. 134).

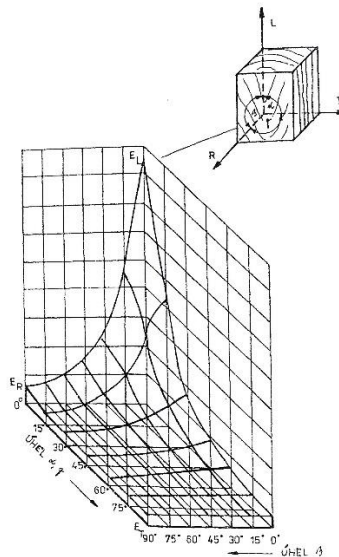
U termicky modifikovaného dřeva pozorujeme ve většině případů zhoršení mechanických vlastností, v určitých případech může dojít i k mírnému zlepšení, například u tvrdosti nebo modulu pružnosti. V určitých případech nemusí ke změně některých vlastností ani dojít, vzhledem na situaci, že termicky upravené dřevo má menší hygroskopicitu oproti rostlému dřevu. Z toho vyplývá, že termicky upravené dřevo má ve stejných atmosférických podmínkách menší vlhkost a při menší vlhkosti dochází ke zlepšení mechanických vlastností, vše záleží na použité teplotě a času ohřevu. Všeobecně se dá říci, že nejvíce dochází k poklesu houževnatosti a pevnosti, samozřejmě v závislosti na teplotě a expozičním čase, kterému je dřevo vystaveno. Toto zhoršení limituje použití termicky upraveného dřeva na konstrukční účely (Reinprecht-Vidholdová 2008, Budakci M. et al. 2013).

Mechanické vlastnosti se obvykle dělí do tří skupin – základní, odvozené a technologické:

- **základní:** pevnost, pružnost, plastičnost, houževnatost,
- **odvozené:** tvrdost, odolnost vůči tečení, odolnost vůči únavovému lomu, odolnost vůči trvalému zatížení,
- **technologické:** opotřebovatelnost, impregnovatelnost, ohýbatelnost, štípatelnost atd.

Mechanické vlastnosti dřeva, stejně jako fyzikální, vykazují anizotropní charakter, který je dán růstem a orientací stavebních buněk dřeva. Tím jsou dány obrovské rozdíly mechanických vlastností v závislosti na směru namáhání. Variabilitu

mechanických vlastností s ohledem na anizotropii dobře ilustruje obrázek prostorového modelu (obr. 10), kde jsou znázorněné tři roviny pružné symetrie, **příčná RT**, **radiální LR** a **tangenciální LT** (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).



Obr. 10 Anizotropní model vlastností dřeva (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996)

6.2. Mechanické namáhání

„Mechanickým namáháním tělesa nazýváme takový děj, při kterém dochází k interakci mezi působícími mechanickými silami a dřevem.“ (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Nauka o dřevě, st. 134).

Dřevo může být namáháno různým způsobem, ale ve většině případů je namáháno mechanicky a vlhkostně, také je zapotřebí vzít do úvahy časový faktor, který se může pohybovat v minutách nebo také v desítkách let. Mechanické namáhání způsobuje ve dřevě napětí, které vzniká jako odpověď na zatížení. Napětí se dělí podle druhu zatížení tělesa na normálové napětí (σ) a smykové napětí (τ). Normálové napětí vzniká při namáhání tlakem, tahem nebo ohybem, kde síly působí kolmo na průřezovou plochu a smykové napětí vzniká, když síly působí v rovině průřezu, namáhání smykem. Při ohybu a krutu vzniká normálové a smykové napětí současně. V důsledku působících sil dochází k dočasným, nebo k trvalým změnám rozměrů, které nazýváme deformace, dělí se na normálové deformace (ε), charakterizované prostým zkrácením, nebo prodloužením tělesa a smykové deformace (γ), charakterizované zkosením, nebo zkroucením tělesa (Horáček 2010).

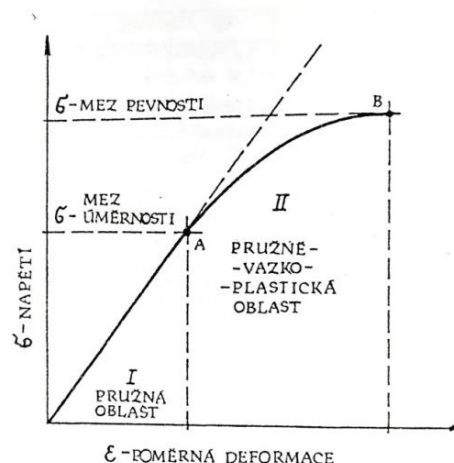
Rozdělení deformací:

- pružné deformace ε_p ,
- deformace pružné v čase $\varepsilon_{p\check{c}}$,
- plastické deformace ε_{pl} .

Pružné deformace zaniknou okamžitě po ukončení působení sil, deformace pružné v čase odezní až za určitý čas a plastické deformace jsou nevratné a způsobují trvalé změny tělesa. Velikost deformací v závislosti na působící síle se obvykle zjišťuje na zkušebních strojích, napětí a působící síla je znázorněna křivkou, která se nazývá pracovní diagram (obr. 11). Z diagramu je zřejmé, že křivka se dá rozdělit na lineární část, která představuje pružné deformace, popřípadě deformace pružné v čase, až do bodu, který se nazývá mez úměrnosti ($\sigma_{\check{u}}$) a nelineární část, kde vznikají plastické deformace až do bodu, který nazýváme mez pevnosti (σ_p), kde dojde k porušení tělesa. Sklon přímky v lineární části diagramu (obr. 11), lze použít pro výpočet modulu pružnosti (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

$$E = \frac{\sigma_{\check{u}}}{\varepsilon_{\check{u}}} \quad (1)$$

E – modul pružnosti, $\sigma_{\check{u}}$ - napětí na mezi úměrnosti, $\varepsilon_{\check{u}}$ -deformace na mezi úměrnosti (Horáček 2010, Matovič 1993).



Obr. 11 Pracovní diagram (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996)

6.3. Pevnost dřeva

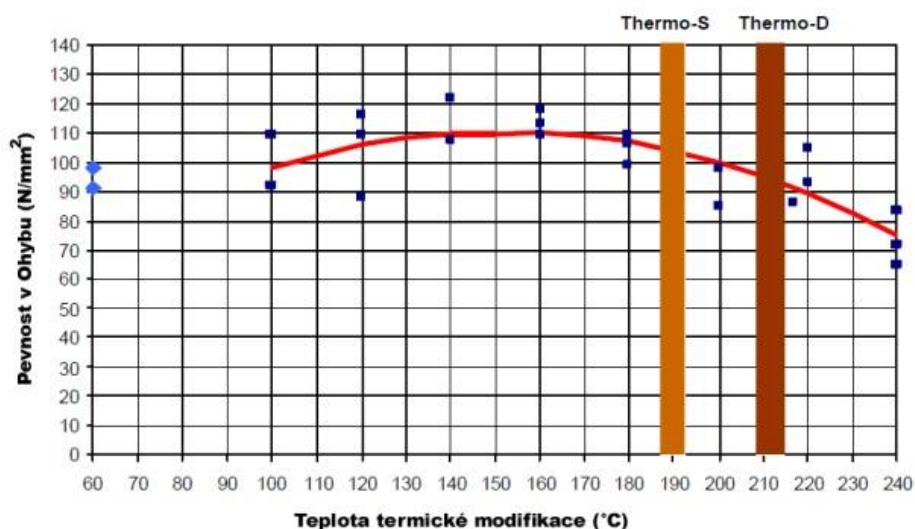
„Pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva proti trvalému porušení.“ (Horáček 2010, Mechanické vlastnosti dřeva, str. 4).

Pevnost dřeva zatím neumíme vypočítat, tak se zjišťuje experimentálně pomocí bezvadých tělísek, na zkušebních strojích. Měří se skutečné napětí, kdy dojde k porušení daného dřevěného tělíska, toto napětí značíme jako mez pevnosti (σ_p). Zkoušky se provádí dle předepsaných norem, většinou při stanovené vlhkosti 12 % z důvodu porovnatelnosti výsledků.

Pevnost dřeva se dá rozdělit do skupin podle:

- stavu napjatosti – jednoosý a víceosý,
- způsobu zatížení – tlak, tah, ohyb, krut a smyk,
- časového průběhu zatížení – statické a dynamické,
- účinků zatížení na dřevo – destruktivní a nedestruktivní způsob (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Pevnost je velmi úzce propojena s hustotou, u termicky upraveného dřeva hustota klesá v závislosti na použité teplotě a době expozice, to má ve většině případů za následek pokles pevnosti. Pokles ohybové pevnosti termicky upraveného dřeva se například pohybuje od 5 do 30 % (obr. 12). Rovněž pevnost v tahu, tlaku a ve smyku se mění. Zatím co tahová pevnost klesá, tlaková se mění jen minimálně a při určitých podmínkách úprav, dochází k mírnému nárůstu. Zkušební tělíska se během tlakových zkoušek deformují odlišným způsobem než dřevo rostlé, v závěrečné fázi se rozpadají z důvodu zvýšené křehkosti termicky upraveného dřeva. Rovněž při zkouškách rázové houževnatosti lze pozorovat rozpadávající se tělíska termicky upraveného dřeva oproti vzorkům dřeva rostlého. Smyková pevnost také klesá, ale vše je závislé na druhu dřeva, teplotě a době expozice (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood handbook 2003).



Obr. 12 Vliv teploty na ohybovou pevnost, Borovice (ThermoWood handbook)

6.4. Pružnost dřeva a moduly pružnosti

„Pružnost dřeva je charakterizována jako schopnost dřeva dosahovat původní rozměry po ukončení působení vnějších sil.“ (Horáček 2010, Mechanické vlastnosti dřeva, str. 4).

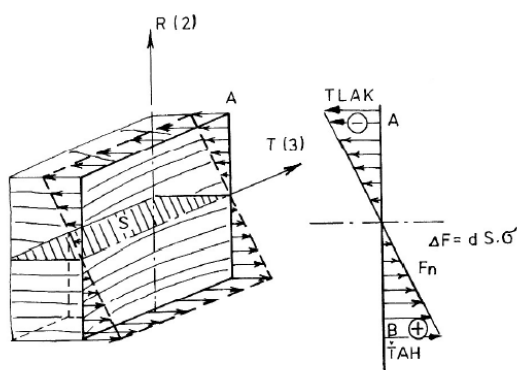
O tom, jakou má dřevo pružnost, vypovídají jeho hodnoty modulu pružnosti, ten charakterizuje schopnost dřeva při zatížení odolat proti pružné deformaci, tak zvaný vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. S rostoucím modulem pružnosti je zapotřebí větší síla na vytvoření deformace. Moduly pružnosti dělíme na Youngův modul pružnosti E (tah, tlak, ohyb) a smykový modul pružnosti G (krut, smyk). Moduly pružnosti nám udávají takzvané materiálové konstanty, mezi ně patří i Poissonova čísla (μ), ty nám udávají podíl poměrné příčné deformace k poměrné podélné deformaci (tab. 2). Při působení síly určitým směrem nelze očekávat pouze deformace v tomto směru, ale deformace vznikají i ve směru kolmém k působící síle (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Požgaj a kol. 1993).

Modul pružnosti v tlaku a tahu udává literatura ve směru vláken v rozsahu 10 000 až 15 000 MPa, při referenční vlhkosti 12 %. Modul pružnosti napříč vláken je několikanásobně menší, přičemž radiální směr vykazuje o 20 až 50 % větší hodnoty než směr tangenciální. Obecně lze poměry jednotlivých směrů napsat takto:

$$E_L : E_R : E_T \sim 20 : 2 : 1.$$

S ohledem na časté použití dřeva jako nosníku literatura uvádí jen modul pružnosti v ohybu kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Síla působící na nosník způsobuje na spodní straně nosníku tah a na horní straně tlak, střední část nosníku je nezatížena, viz obr. 13 (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Kolektiv autorů 1970).

U termicky upraveného dřeva při kratších expozičních časech a nižší teplotě se obvykle modul pružnosti mírně zvýší. K poklesu modulu pružnosti dochází až při vyšších teplotách, kdy dochází k úbytku hmotnosti o 6 až 8 %. Modul pružnosti se při termické úpravě nijak významně nemění, viz obr. 14 (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood handbook 2003).



Obr. 13 Rozložení napětí po výšce nosníku (Požgaj a kol. 1993)

Pro smykové moduly pružnosti udává literatura hodnoty 100 až 2000 MPa. Dělí se na smykový modul radiálně podélný, tangenciálně podélný a radiálně tangenciální. Největší hodnoty vykazuje radiální rovina, obecně lze poměry jednotlivých směrů napsat takto: $G_{LR}:G_{LT}:G_{RT} \sim 7,5:5:1$ (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Požgaj a kol. 1993).

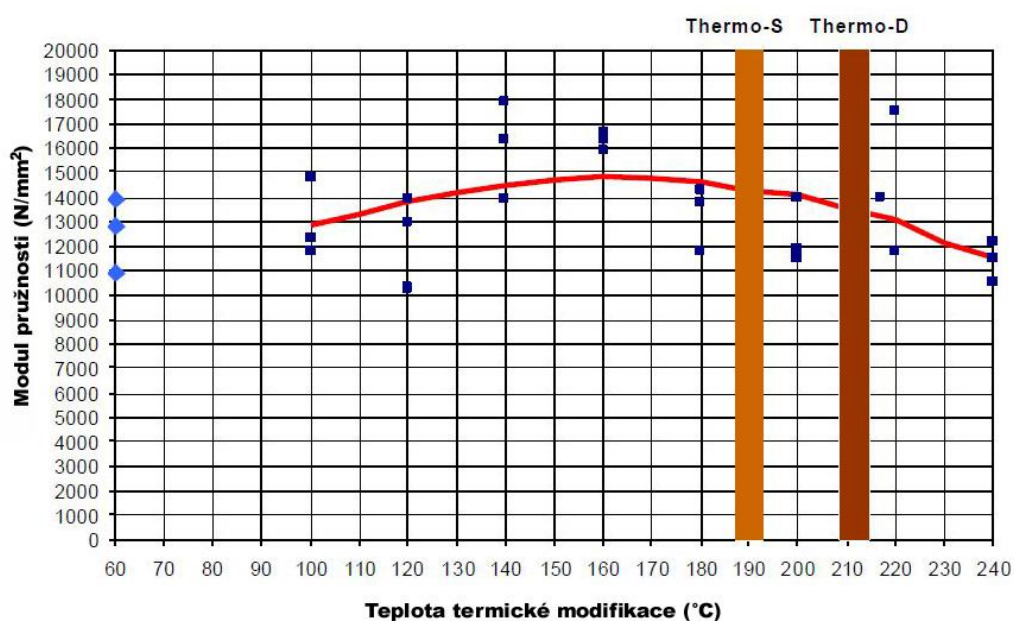
Moduly pružnosti tří dřevin přehledně zobrazuje tab. 1.

Tab. 1 Moduly pružnosti vybraných dřev při vlhkosti 12 % (Požgaj a kol. 1993)

dřevo	modul pružnosti (MPa)						
	v tlaku a tahu			v ohybu	ve smyku		
	E_L	E_R	E_T	E_{oh}	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
smrk	14 300	680	470	12 800	1 230	800	55
jasan	15 700	1 875	1 250	13 900	1 325	1 080	255
topol	13 900	885	350	-	840	385	110

Tab. 2 Poissonova čísla vybraných dřev (Požgaj a kol. 1993)

dřevo	Poissonova čísla					
	ve směru vláken		ve směru radiálním		ve směru tangenciálním	
	μ_{RL}	μ_{TL}	μ_{TR}	μ_{LR}	μ_{RT}	μ_{LT}
smrk	0,490	0,410	0,790	0,030	0,380	0,037
jasan	0,508	0,566	0,830	0,056	0,467	0,044
topol	0,507	0,590	1,190	0,037	0,356	0,014



Obr. 14 Vliv teploty na modul pružnosti, Borovice (ThermoWood handbook)

6.5. Tlak, tah a smyk

Pevnost dřeva v tlaku rozdělujeme podle působící síly takto:

- pevnost v tlaku ve směru vláken,
- pevnost v tlaku napříč vláken, v radiálním a tangenciálním směru.

Velmi důležitá je pevnost v tlaku ve směru vláken, tato hodnota se pro naše dřeva pohybuje okolo 50 MPa při 12 % vlhkosti. Při tomto zatížení dochází ke zkrácení tělesa a v konečném důsledku k vybočení a celkové destrukci tělesa. Vše závisí na vlhkosti, hustotě a anatomické stavbě daného dřeva. Při zatížení napříč vláken, jak v tangenciálním, tak v radiálním směru nedochází většinou k celkové destrukci tělesa, ale

dochází pouze k postupnému stlačování dřevní hmoty. Pevnost v tlaku napříč vláken vychází z meze úměrnosti a značíme jí jako konvenční mez pevnosti. Konvenční mez pevnosti vykazuje v radiálním a tangenciálním směru podobné výsledky a oproti pevnosti ve směru vláken v průměru 10x menší hodnoty (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Pevnost dřeva v tahu rozdělujeme podle působící síly takto:

- pevnost v tahu ve směru vláken,
- pevnost v tahu napříč vláken, v radiálním a tangenciálním směru.

Dřevo má v tahu ve směru vláken vůbec největší pevnost, v průměru kolem 120 MPa. Je to dáno anatomickou stavbou dřeva, kde celulóza vykazuje velmi vysokou pevnost díky kovalentním vazbám. Při tomto způsobu namáhání dochází k minimálním deformacím a k náhlému roztržení tělesa. Tahová pevnost ve směru vláken vykazuje opravdu vysoké hodnoty, ale v praxi moc velké využití nenalézá. Oproti tomu tahová pevnost napříč vláken vykazuje nejmenší pevnost vůbec, okolo 1,5 až 5 MPa. Je to dáno opět anatomickou stavbou dřeva, kde se převážně na vazebných silách podílejí vodíkové vazby a Van der Waalsovy vazby, které vykazují několikanásobně slabší pevnost než vazby kovalentní. V radiálním směru je pevnost o 10 až 70 % větší v závislosti na dřevině. Použití dřeva v tomto směru je rovněž silně ovlivněno výskytem výsušných trhlin, což má samozřejmě na pevnost v tahu napříč vláken neblahý vliv (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Požgaj a kol. 1993).

Pevnost dřeva v ohybu rozdělujeme podle působící síly takto:

- pevnost v ohybu, kde dřevní vlákna a osa nosníku jsou rovnoběžná, síla působí kolmo na vlákna v tangenciálním, nebo radiálním směru,
- pevnost v ohybu, kde dřevní vlákna a osa nosníku jsou navzájem kolmá, kde příčný řez je buď rovnoběžný, nebo kolmý na ohybovou sílu.

Druhý způsob zatížení se v praxi téměř nevyskytuje z důvodu, že od nosníků je požadovaná určitá délka, a to druhý zmíněný způsob vylučuje, navíc je pevnost v tomto směru několikanásobně menší než v prvním případě. Z praktických důvodů se zabýváme jen s ohybovou pevností, kde dřevní vlákna jsou rovnoběžná s osou tělesa a působící síla

je kolmá na dřevní vlákna v tangenciálním směru. Rozdíl mezi radiálním a tangenciálním směrem je zanedbatelný u listnatých dřevin a u jehličnatých je pevnost v ohybu větší o 10 až 12 % v tangenciálním směru. Při tlaku na nosník vzniká na jeho spodní části tah a na horní tlak, v neutrální ose je napětí nulové (obr. 9). Prvotní poškození se objevuje na horní části nosníku z důvodu, že tlaková pevnost je menší než tahová pevnost, dále se začínají objevovat odštěpená vlákna na spodní straně a v závěrečné fázi dojde ke zlomení nosníku ve spodní části. Mez pevnosti v tomto směru vykazuje poměrně vysoké hodnoty, v průměru se ohybová pevnost pohybuje kolem 100 MPa, proto se dřevo často používá tímto způsobem v konstrukcích jako nosník (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Požgaj a kol. 1993).

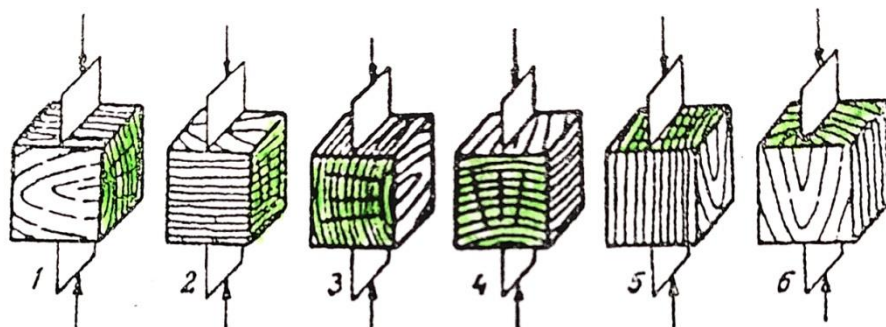
6.6. Smyk a krut

Pevnost dřeva ve smyku rozdělujeme podle působících sil takto:

- pevnost ve stříhu napříč vláken ve směru radiálním a tangenciálním,
- pevnost ve smyku napříč vláken v rovině tangenciální a radiální,
- pevnost ve smyku podél vláken v rovině tangenciální a radiální.

Vše nejlépe demonstruje obr. 15. Dřevo má díky své anizotropii různou pevnost ve smyku a s ohledem na situaci, že čistý smyk se téměř nevyskytuje a vždy spolupůsobí i normálové napětí, je potřeba rozlišit případy, kdy má smyk zásadní a rozhodující účinek. Nejvyšší hodnoty dosahuje stříhová pevnost napříč vláken, hodnota se pohybuje v průměru 40 MPa, oproti tomu smyková pevnost napříč vláken dosahuje jen 3 až 8 MPa, rozdíly v radiální a tangenciální rovině jsou zanedbatelné, v praxi důležitá při loupání a krájení dých. Také smyková pevnost ve směru vláken nevykazuje příliš velké hodnoty, v průměru 10 až 12 MPa, dřevo je tímto způsobem namáháno nejčastěji. Jehličnany mají smykovou pevnost ve směru vláken v radiální a tangenciální rovině téměř stejnou, ale u listnatých dřevin je vyšší v tangenciální rovině (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Namáhání v krutu je speciální případ smykového namáhání, těleso je namáhané ve dvou rovinách, které jsou na sebe kolmé, jedna je rovnoběžná s vlákny a druhá je na vlákna kolmá. V praxi má největší význam krut nosníku podél jeho osy (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).



Obr. 15 Zobrazení působení smykových sil na těleso (Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996)

6.7. Plastičnost dřeva

Dřevo má schopnost měnit svůj tvar vlivem působení vnějších sil bez zjevného porušení, tento děj nazýváme plastičnost dřeva. Je to děj, který lze pozorovat při působení napětí do meze pevnosti, pokud dojde k silovému odtížení tělesa v intervalu od meze úměrnosti po mez pevnosti, deformace jsou již trvalého charakteru, to znamená, že jsou nevratné. Tyto deformace nastávají po překročení meze úměrnosti, tzn. čím větší deformace, bez zjevného porušení tělesa, tím větší plastičnost dřeva. Až do meze úměrnosti je spojitost mezi napětím a deformací lineární, nad tuto mez je již průběh nelineární. Velkou roli hraje také čas, při dlouhodobém zatížení dochází k tzv. tečení dřeva, pokud požadujeme trvalou pevnost, nemůže napětí překročit mez úměrnosti. Při zatěžování tělesa pod mezí úměrnosti nedochází k celkovému porušení tělesa a tečení dřeva se po určitém čase zastaví. Je-li však těleso namáháno dlouhodobě nad mezí úměrnosti, tečení dřeva vždy končí celkovým selháním tělesa. Tečení dřeva lze charakterizovat třemi deformacemi:

- pružná deformace, zaniká po uvolnění působící síly,
- deformace pružná v čase, vzniká a zaniká za určitý čas,
- plastická deformace, trvalá po uvolnění působící síly.

Z výše uvedeného vyplývá, že velmi důležitou veličinou je čas, který ovlivňuje pevnost dřeva (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996, Požgaj a kol. 1993).

6.8. Houževnatost dřeva

Mechanická práce, pomocí které dosáhneme plastickou deformaci, se nazývá houževnatost dřeva. Rozlišujeme statickou houževnatost a dynamickou houževnatost, zvanou také jako rázovou houževnatost. Statická houževnatost nám udává potřebnou mechanickou energii, která je zapotřebí ke vzniku plastické deformace. Materiály mohou být buď křehké, zde dochází k malým deformacím, nebo houževnaté a zde je zapotřebí vynaložit velké množství energie, aby vznikla plastická deformace. Dřevo patří mezi materiály houževnaté (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Dynamická, nebo také rázová houževnatost, je schopnost dřeva pohltit práci, která je vykonaná rázovým ohybem. Tato vlastnost se zjišťuje pomocí Charphyho kladiva, kde dojde ke změření potřebné energie na přeražení dřeva daných rozměrů. Rázová houževnatost se ve většině případů měří v ohybu kolmo na vlákna v tangenciálním směru (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Rázová houževnatost se u termicky upraveného dřeva, oproti rostlému dřevu, mění poměrně razantně, už při malém poklesu hmotnosti dochází k velkým změnám této vlastnosti, dřevo se stává křehkým (Reinprecht-Vidholdová 2008).

6.9. Tvrdost dřeva

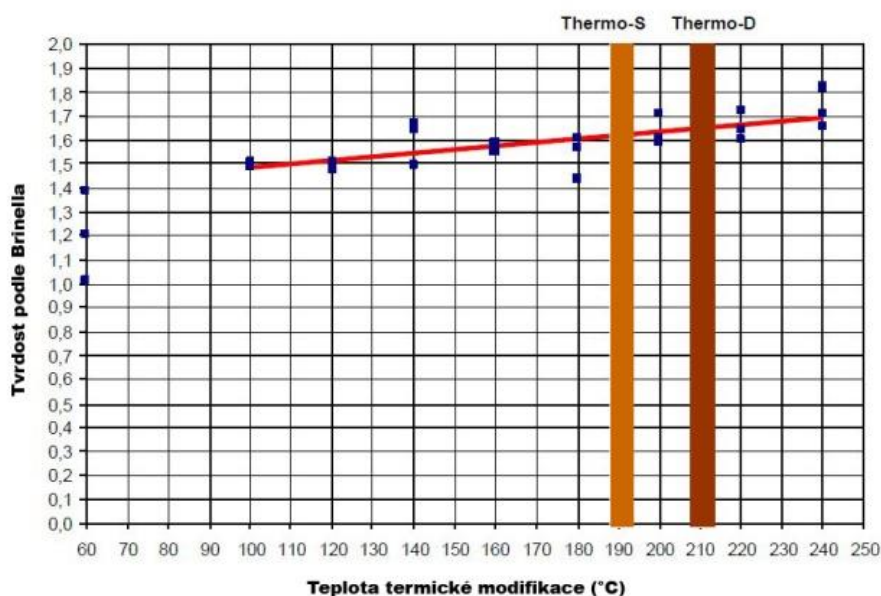
Dřevo, jako každý jiný materiál má schopnost působit proti jinému tělesu, které se snaží proniknout do jeho struktury, tuto vlastnost označujeme jako tvrdost dřeva. Ta se dělí na statickou a dynamickou tvrdost. Statická tvrdost se zjišťuje pomocí dvou metod, Brinellova tvrdost a Jankova tvrdost. Obě metody jsou založeny na principu vtlačování ocelové kuličky do dřevěného tělesa. Brinellova tvrdost (H_B), kulička o průměru 10 mm je vtlačována neměnnou silou do povrchu dřeva a z otláčené plochy se vypočítá Brinellova tvrdost (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

Jankova tvrdost (H_J), kulička o průměru 11,28 mm je vtlačována do hloubky 5,64 mm, otláčená plocha má rozměr 100 mm^2 , síla nutná k zatlačení kuličky nám udává tvrdost. Statická tvrdost vykazuje větší hodnoty na čelních plochách o 30 až 40 % oproti radiální a tangenciální ploše, tak jako ostatní vlastnosti je i tvrdost ovlivňována vlhkostí a hustotou (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996). Dřevo dělíme do pěti skupin, podle čelní tvrdosti:

- měkká dřeva do 40 MPa,
- středně tvrdá dřeva 41 až 80 MPa,
- tvrdá dřeva 81 až 100 MPa,
- velmi tvrdá dřeva 101 až 150 MPa,
- super tvrdá dřeva nad 150 MPa.

Dynamická tvrdost se určí z otačené plochy, kterou způsobila kulička, padající volným pádem z dané výšky a následně se z velikosti otačené plochy tvrdost vypočítá (Horáček 2010).

Tvrdost termicky upraveného dřeva (obr. 16) je většinou neměnná, se stoupající teplotou může však dojít i k mírnému zvýšení, což je prakticky zanedbatelné. Tvrdost dřeva hraje klíčovou roli při opracování řeznými nástroji a při oděru například podlah vyrobených z termicky upraveného dřeva (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood handbook 2003).



Obr. 16 Vliv teploty na tvrdost podle Brinella, Borovice (ThermoWood handbook 2003)

6.10. Faktory ovlivňující pevnost a pružnost dřeva

Mezi nejdůležitější faktory, které ovlivňují mechanické vlastnosti, patří zejména vlhkost, hustota a teplota. Dřevo má nejlepší mechanické vlastnosti při nulové vlhkosti,

tato vlhkost se však dá dosáhnout jen při umělém sušení. Z dlouhodobého hlediska je neudržitelná, protože dřevo přijímá okolní vlhkost z prostředí, ve kterém se vyskytuje, tak dlouho, dokud nedosáhne rovnovážnou vlhkost. S rostoucí vlhkostí se mechanické vlastnosti zhoršují, a to až do meze hygroskopicity, volná voda je již ovlivňuje jen minimálně. Obecně lze říci, že změna vlhkosti vázané vody o 1 % ovlivní mechanické vlastnosti o 3–4 %, kromě pevnosti v tahu, kde je závislost na vlhkosti minimální, z důvodu anatomické stavby krystalické celulózy.

U hustoty je to podobné, obecně lze říci, že s rostoucí hustotou se zlepšují i mechanické vlastnosti, nezáleží ovšem jen na množství dřevní substance v daném objemu, ale také na anatomické stavbě. Vliv hustoty je nejvíce patrný u suchého dřeva a s vlhkostí nad mezí hygroskopicity prakticky ztrácí význam. Jestliže dojde ke zvýšení hustoty u suchého dřeva o 100 kg.m^3 , ve směru vláken se modul pružnostilepší o 2 až 5 % a ve směru napříč vláken dojde ke zlepšení o 1–9 %.

Také teplota má velký význam na mechanické vlastnosti, s rostoucí teplotou mechanické vlastnosti klesají. Při teplotách do $70 \text{ }^\circ\text{C}$ dochází pouze k malým změnám, které jsou většinou vratné. Při teplotách nad $100 \text{ }^\circ\text{C}$ dochází již k nevratným změnám, začíná se projevovat poškození lignino-sacharidového komplexu. Nad $200 \text{ }^\circ\text{C}$ začíná pyrolýza dřeva, vše samozřejmě záleží na době expozice, dřevo výrazně mění barvu, je křehké a dochází k významnému ovlivnění mechanických vlastností, zejména rázové houževnatosti, tvrdosti a pevnosti. Spolupůsobení teploty a vlhkosti ovlivňuje mechanické vlastnosti mnohem více, než když působí na dřevo samostatně (Horáček 2010, Gandelová-Horáček-Šlezingerová 1996).

V kapitole čtyři a pět byly vymezeny základní pojmy fyzikálních a mechanických vlastností dřeva, z nichž byly vybrány tři vlastnosti, kterým se věnuje experimentální část této práce. Experimentální část je podrobně rozebrána v následující kapitole.

7 Metodika

Na základě cíle práce a v souladu s jejím zadáním, můžeme metodiku rozdělit do několika bodů:

- výběr dřeva pro praktické zkoušky,
- výroba a příprava těles pro praktické zkoušky,
- značení, měření rozměru a vážení,
- praktické zkoušky, změna barvy, tvrdost podle Brinella, rázová houževnatost,
- chemická analýza vzorků dřeva,
- zpracování výsledků v softwaru statistika 12,
- analýza výsledků a vyhodnocení.

8 Metodika praktické části

8.1. Výběr dřeviny

Pro tuto práci jsem si vybral dřevo akátu (*Robinia pseudoacacia*), tato dřevina bezpochyby patří k našim nejtvrdějším dřevinám. Je velmi odolný vůči biotickým i abiotickým činitelům, rovněž jeho mechanické vlastnosti vykazují velmi dobré parametry (tab. 3). Akát je velmi vhodné dřevo pro použití ve stavebnictví, ovšem na druhou stranu z pohledu ochrany přírody se jedná o invazivní druh, snadno se šíří a negativně působí na půdu (O akátu).

Tab. 3 Mechanické vlastnosti akátu (Horáček – učební pomůcka)

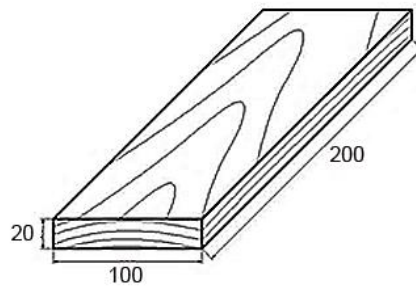
Mez pevnosti	tah		tlak		Ohyb		smyk	hustota	tvrdost	houževnatost
		⊥		⊥	MOR	MOE				
	MPa							g/cm^2	kN	J/cm^2
Akát	133	4,2	70	18,6	102	14700	12,5	0,76	7,5	6,6

8.2. Výroba a příprava těles pro praktické zkoušky

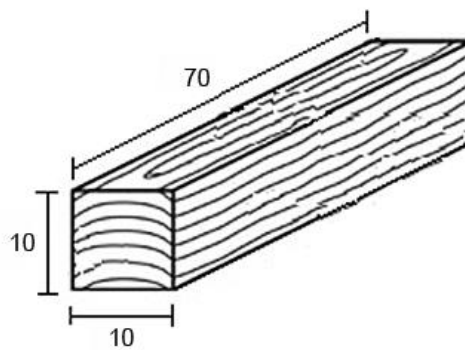
Pro praktické zkoušky byly připraveny dvě různé sady zkušebních těles:

- zkušební tělesa na rázovou houževnatost 70 mm x 10 mm x 10 mm,
- zkušební tělesa na tvrdost a barvu 200 mm x 100 mm x 20 mm.

Z fyzikálních vlastností jsem se zaměřil na změnu barvy vlivem termické úpravy dřeva a z mechanických vlastností jsem se zaměřil na tvrdost podle Brinella a rázovou houževnatost. K měření barvy a tvrdosti byla určena tělesa o rozměrech 200 mm x 100 mm x 20 mm (obr. 17) a pro rázovou houževnatost tělesa o rozměrech 70 mm x 10 mm x 10 mm (obr. 18).



Obr. 17 Rozměry zkušebních těles na zkoušky tvrdosti a barevných změn



Obr. 18 Rozměry zkušebních těles pro měření rázové houževnatosti

Vzorky jsem rozdělil do čtyř skupin (A, B, C, D) podle teploty termické modifikace:

- A – referenční vzorek bez úprav,
- B – termická úprava při teplotě 160 °C,
- C – termická úprava při teplotě 180 °C,
- D – termická úprava při teplotě 210 °C.

Termická modifikace akátu se uskutečnila v termokomoře (obr. 19) ve třech fázích:

- v první části dochází k ohřevu a sušení materiálu při teplotě 100 °C s pomocí vodní páry, dřevo se vysuší na nulovou vlhkost,
- ve druhé části dochází k samotné termické úpravě dřeva za pomoci teploty 160 až 210 °C, tato fáze trvá 2 až 3 hodiny,
- ve třetí závěrečné části dochází k chlazení a klimatizaci dřeva na konečnou vlhkost 4 až 7 %.

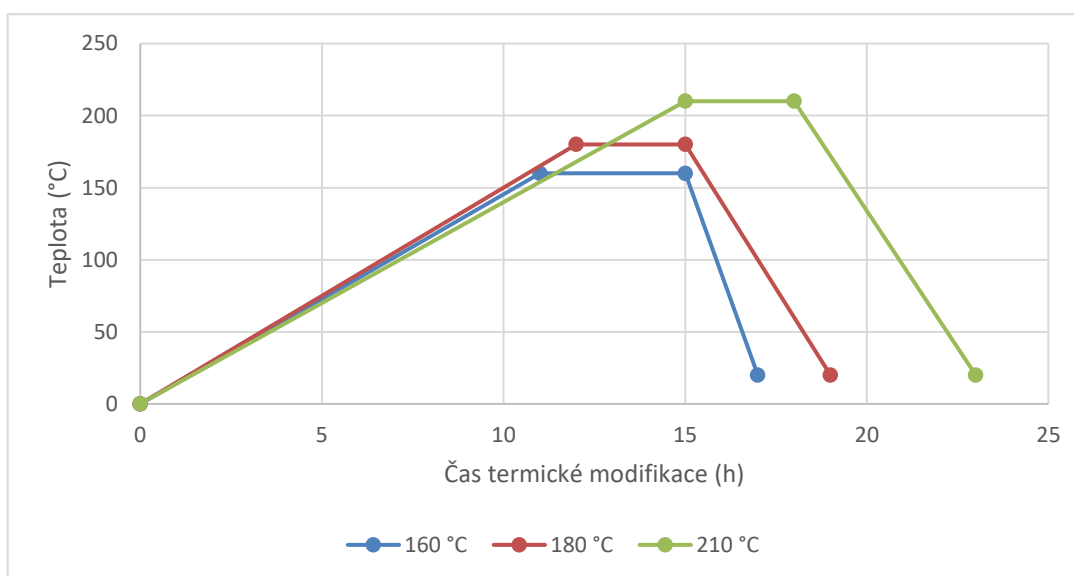
Postup termické úpravy akátu podrobněji znázorňuje tabulka č. 4, kde se nachází časové údaje jednotlivých fází termické modifikace, vše přehledně znázorňuje graf (obr. 20).



Obr. 19 Termokomora Katres, kde se uskutečnila výroba zkušebních vzorků (zdroj: vlastní)

Tab. 4 Termické modifikace akátu

	Průběh termické úpravy Akátu		
	160 °C (h)	180 °C (h)	210 °C (h)
Ohřev	11	12	15
Tepelná modifikace	3	3	3
Chlazení a klimatizace	3	4	5
Celkový čas úpravy	17	19	23



Obr. 20 Graf termické úpravy akátu

8.3. Značení, měření rozměrů a vážení

Vzorky byly rozděleny do skupin podle teploty termické modifikace. Každá skupina vzorků obsahovala 15 kusů zkušebních těles (obr. 21), mimo sady zkušebních vzorků na měření barvy a tvrdosti, zde byl použit z každé skupiny termické úpravy jen jeden vzorek. Každý vzorek byl popsán na obou koncích písmenem dané skupiny a pořadovým číslem vzorku, z důvodu možnosti identifikace vzorku pro případné přelomení během zkoušek. Zkušební tělesa byla řádně změřena, a to tak, že byla nejprve

změřena délka vzorku a následně proběhla tři měření ve směru radiálním a tři měření ve směru tangenciálním (na levém okraji, na pravém okraji a uprostřed). Měření bylo provedeno laboratorním digitálním posuvným měřidlem KINEX ICONIC s možností připojení k PC pro automatické odečtení měřených hodnot (obr. 22). Následně byla tělesa zvážena na laboratorní váze KERN PSB/PBJ rovněž s možností připojení k PC a automatickým odečítáním naměřených hodnot (obr. 23).



Obr. 21 Vzorky akátu (zdroj: vlastní)



Obr. 22 Posuvné měřidlo KINEX ICONIC (zdroj: vlastní)

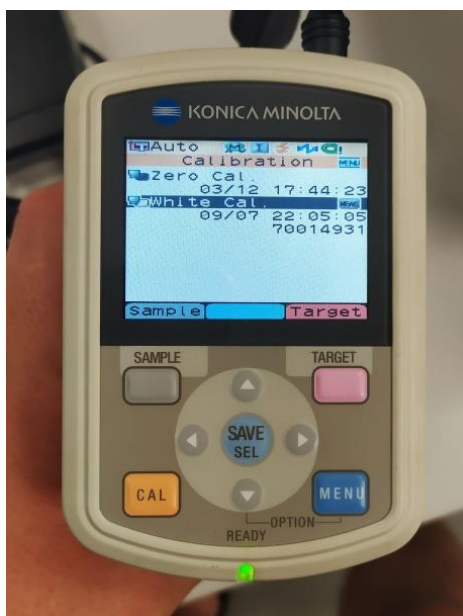


Obr. 23 Laboratorní váha KERN PSB/PBJ (zdroj: vlastní)

8.4. Praktické měření

8.4.1. Barva

K měření barvy dřeva byl použit spektrofotometr Konica Minolta CM – 700 d (obr. 24).

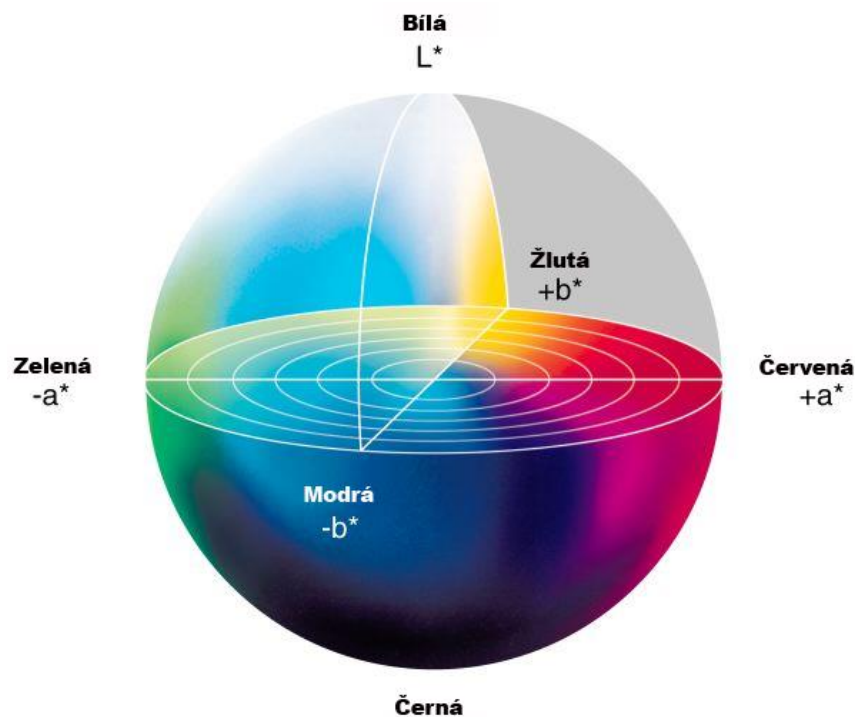


Obr. 24 Spektrofotometr Konica Minolta CM – 700 d (zdroj: autor)

Tento přístroj poskytuje výsledky jak v numerické, tak v grafické podobě. Přístroj zachytí změnu barvy daného vzorku dřeva na principu spektrálního odrazu o vlnové délce 400 až 700 nm. Přístroj používá k měření LED diody, které mají neměnnou vlnovou délku. Spektrofotometr se přikládá kolmo na měřený povrch a paprsek světla je odražen v kruhovém vzorci v úhlu 45°. Pro měření barvy byl použit barevný prostor CIELAB, znázorňuje prostorový model, který má tři osy (obr. 25).

- L – osa představuje světlost od 0 % (černá) do 100 % (bílá),
- a – osa představuje – a (zelenou), +a (červenou),
- b – osa představuje – b (modrou), +b (žlutou).

Referenční hodnoty nám poskytl tepelně neupravený vzorek, tyto referenční hodnoty jsou nezbytné k výpočtu celkové barevné změny ΔE^* . Podmínky vyhodnocení změny barvy ΔE^* uvádí tabulka č. 5. Měření se uskutečnilo na třech různých místech a pro větší přesnost spektrofotometr vyslal čtyři paprsky, čímž provedl čtyři samostatná měření, na stejném místě, které následně zprůměroval.



Obr. 25 Barevný prostor CIE $L^*a^*b^*$ (zdroj: sheriffblathur.blogspot.com)

Tab. 5 Vyhodnocení celkové změny barvy ΔE^*

ΔE^*	Barevná změna
$\Delta E < 0,2$	Neviditelný rozdíl
$0,2 < \Delta E < 2$	Malý rozdíl
$2 < \Delta E < 3$	Barevná změna viditelná s vysoko kvalitním filtrem
$3 < \Delta E < 6$	Barevná změna viditelná se středně kvalitním filtrem
$6 < \Delta E < 12$	Vysoká barevná změna
$\Delta E < 12$	Odlíšná barva

Měření probíhalo dle norem ISO 11664-2 (2007), ISO 11644-4 (2008) a ISO 11664-6 (2013), celkovou barevnou změnu následně vypočítáme dle vzorce:

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

ΔL^* , Δa^* a Δb^* - tyto hodnoty vypočítáme jako rozdíl referenčních hodnot od hodnot naměřených po termické modifikace dle vzorce č. 3.

$$\begin{aligned} \Delta a^* &= a_2 - a_1, a_3 - a_1, \dots a_n - a_1 \\ \Delta b^* &= b_2 - b_1, b_3 - b_1, \dots b_n - b_1 \\ \Delta L^* &= L_2 - L_1, L_3 - L_1, \dots L_n - L_1 \end{aligned} \quad (3)$$

(Kubovský-Urgela 2004, Applications note CIE L*a*b*2008).

8.4.2. Tvrdost podle Brinella

Tento postup je založený na principu vmáčknutí ocelové kalené kuličky (průměr 10 mm.) při konstantní síle do dřevěného materiálu (obr. 26). Tvrdost se následně vypočítá dle vzorce č. 4 (Požgaj a kol. 1993).

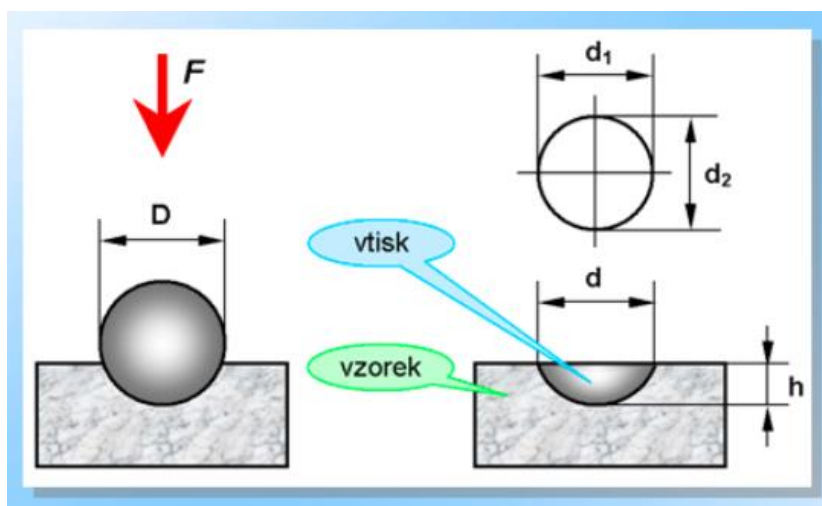
$$H_{BW} = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

H_{BW} – tvrdost dřeva podle Brinella [MPa]

F – působící síla na kuličku [N]

D – průměr kuličky [mm]

d – průměr otláčené plochy na vzorku [mm]



Obr. 26 Brinellova metoda tvrdosti (slideplayer.cz/slide/3082060/)

Provedení zkoušky udává norma ČSN EN ISO 6506-1 (2005). Zkušební vzorek se pevně uchytí na pevnou podložku, aby nedošlo k pohybu během zkoušky, povrch musí být hladký a zbaven nečistot, aby nedošlo k ovlivnění měření. Samotné měření proběhlo na tvrdoměru DuraVision-30 (obr. 27), přístroj je vybaven pevnou testovací hlavou s automatickým vyhodnocovacím systémem.



Obr. 27 Tvrdoměr DuraVision-30 (zdroj: autor)

Zařízení DuraVision-30 se uvede do provozu, nastaví se zatěžovací síla, v našem případě na hodnotu 250 N. Zkušební vzorek se upne na pracovní plochu tvrdoměru (obr. 28) a přístroj se spustí pomocí dotykového displeje. Přístroj pracuje zcela automaticky, udržuje nastavenou zatěžovací sílu, změří hloubku a průměr otláčení a následně ze získaných informací stanoví hodnotu tvrdosti. Jedno měření i s vyhodnocením trvá kolem jedné minuty, poté přístroj zobrazí naměřenou hodnotu na displeji. Tato hodnota se zaznamená do připravené tabulky a celý postup se opakuje, v našem případě dvacetkrát pro každou teplotu termické modifikace (20, 160, 180 a 210 °C). Tab. 6 udává parametry měření tvrdosti podle Brinella.

Tab. 6 Parametry měření tvrdosti BRINELL

Tvrdost podle Brinella		
Dřevina	Podmínky	Popis
akát	H_{BW} $10^1/500^2/10^3$	¹ 10 = průměr karbidové kuličky (mm)
		² 250 and 500 = konstantní zatěžovací síla (N)
		³ 10 = čas měření (sec)



Obr. 28 Detail upnutí vzorku do tvrdoměru DuraVision-30 (zdroj: autor)

Získané hodnoty tvrdosti podle Brinella lze přepočítat na 12 % vlhkosti podle vzorce č. 5 (Dubovský a kol. 2003).

$$H_{BW_{12}} = H_B [1 + \alpha (w - 12)] \quad (5)$$

$H_{BW_{12}}$ – tvrdost dřeva při vlhkosti 12 % [MPa]

H_B – tvrdost dřeva při zkoušené vlhkosti,

w – vlhkost zkušebních těles při zkoušce [%]

α – opravný vlhkostní koeficient pro tvrdost kolmo na vlákna pro všechny dřeviny, (0,025).

Vlhkost dřeva během zkoušky lze určit vzorcem č. 6 podle ISO 13061-2 (2014).

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (6)$$

ρ_w – hustota dřeva při vlhkosti w [kg/m³]

m_w – hmotnost dřeva při obsahu vlhkosti w [kg]

V_w – objem dřeva při obsahu vlhkosti w [m³]

Vlhkost zkušebních vzorků lze stanovit podle ISO 13061-1 (2014) vzorcem č. 7.

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (7)$$

w – vlhkost vzorků [%]

m_w – hmotnost vzorků s vlhkostí w [kg]

m_0 – hmotnost vysušených vzorků v sušárně [kg]

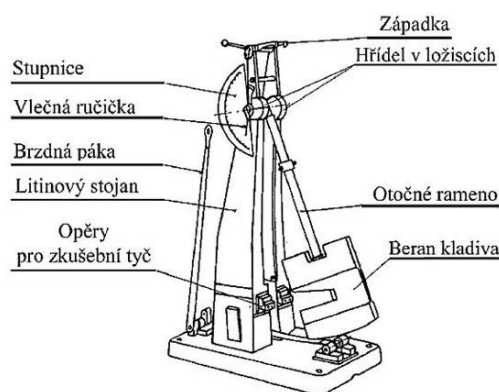
Sušení se uskutečnilo podle ISO 13061-1 (2014)

8.4.3. Rázová houževnatost

Pro rázovou houževnatost bylo připraveno patnáct vzorků akátu od každé teploty (20, 160, 180 a 210 °C), o rozměrech (10 x 10 x 70 mm). Dřevo je schopno pohltit práci vykonanou rázovým ohybem, tuto vlastnost označujeme jako rázová houževnatost.

Provedení této zkoušky probíhá podle normy ČSN 49 0117, pomocí Charpyho kladiva (obr. 29), je to v podstatě kyvadlo, které je schopno vytvořit rázové namáhání. Pro tuto zkoušku bylo použito moderní zařízení, Charpyho kladivo Instron 450 MPX-J2, které je umístěno v high-tech pavilonu a je v provozu prvním rokem (obr. 30). Toto zkušební zařízení se snadno ovládá, kladivo je natahováno motorem a je celé zakrytováno z důvodu bezpečnosti, kladivo je blokováno proti spuštění při otevřených dvířkách. Systém je propojen s PC, kde dochází ke zpracování dat s možností snadného exportu naměřených dat ve zvoleném formátu. Zařízení je schopno provádět testy s vysokou i nízkou energií s velmi velkou přesností.

Velmi důležitou součástí zařízení je software Bluehill Impact (obr. 31) od firmy Instron (Zkušební stroje Igitur, Instron 2019).



Obr. 29 Charpyho kladivo nákres (zdroj: <https://slideplayer.cz/slide/5615768/>)



Obr. 30 Charpyho kladivo Instron 450 MPX-J2 (zdroj: Ing. Paul)



Obr. 31 Ukázka rozhraní softwaru Bluehill Impact (zdroj: Instron)

Po uvedení přístroje do činnosti se spustí software pro měření rázové houževnatosti. Do programu se vloží přesné rozměry zkušební tělesa a po otevření bezpečnostních dvířek se vloží zkušební vzorek na podpěry Charpyho kladiva tak, aby kladivo dopadlo na radiální plochu zkušební tělesa. Po uzavření dvířek uvedeme tlačítkem stroj do činnosti (zařízení umožňuje, po zahájení měření, automatické spuštění kladiva po uzavření dvířek), v našem případě bylo kladivo spouštěno ručně. Poté přístroj automaticky vyhodnotí celkovou absorbovanou energii v Joulech [J] a následně vypočítá rázovou houževnatost v Joulech na centimetr čtvereční [$J \cdot cm^{-2}$]. Poté se celý proces opakuje, po přeražení posledního vzorku a ukončení měření z dané série přístroj automaticky vyhodnotí maximální a minimální hodnoty, variační koeficient a průměrnou hodnotu rázové houževnatosti. Pro větší přehlednost zobrazí data v přehledném grafu. Zkušební testy rázové houževnatosti proběhly při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %. I když výpočet rázové houževnatosti proběhl automaticky, uvádím vzorec č. 8 pro výpočet rázové houževnatosti.

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} \quad (8)$$

A_w – rázová houževnatost [$J \cdot cm^{-2}$]

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J]

b, h – rozměry tělesa v radiálním a tangenciálním směru [cm]

(Požgaj, 1993).

Rázová houževnatost lze přepočítat podle vzorce č. 9 na vlhkost 12 %

$$A_{12} = A_w \cdot [1 + \alpha \cdot (W - 12)] \quad (9)$$

A_{12} – rázová houževnatost při vlhkosti 12 % [$J \cdot cm^{-2}$]

α – opravný koeficient 0,02 pro všechny dřeviny

w – vlhkost dřeva [%]

(Požgaj, 1993; ČSN 49 0117).

8.4.4. Chemická analýza

Pro zjištění chemického složení vzorků byly vzorky mechanicky zpracovány na formu pilin o velikosti frakce 0,5-1 mm a byly extrahovány v Soxhletově aparátu pomocí směsi toluenu a ethanolu podle ASTM D1107-96. Obsah ligninu se zjistil pomocí metody ASTM D1106-96. Obsah holocelulózy byl zjištěn pomocí metody autorů E. L. Wise, M. Murphyho a A. A. D'Addiecioio, 1946. Obsah celulózy byl stanoven Seifertovou metodou a hladiny hemicelulózy jako rozdíl mezi holocelulózou a celulózou. Všechna měření byla aplikována ve 4 opakováních na vzorek.

8.5. Zpracování výsledků v softwaru Statistica 12

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita více-faktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemných kombinací. K tomuto ohodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty P lze testovaný faktor ohodnotit takto:

- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ faktor působí,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný (Gaff a Gaborik 2009).

9 Výsledky a diskuze

9.1. Zpracování výsledků vlivu teploty termické úpravy na barevné změny

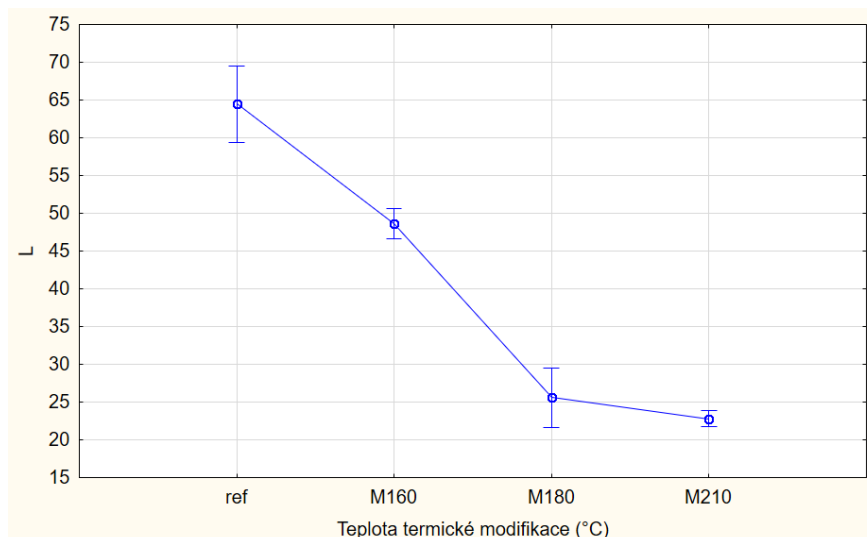
Barevné změny byly posuzovány na dřevě akátu. Hodnocena byla celková barevná změna ΔE^* a jednotlivé souřadnice barevného prostoru CIELAB. Referenční hodnoty byly získány změřením vzorku bez termické úpravy a následně proběhlo měření termicky upraveného dřeva při teplotách 160, 180 a 210 °C. Naměřené hodnoty byly zprůměrovány a jsou přehledně uvedeny v tabulce č. 7.

Tab. 7 Celková barevná změna ΔE^* a změna jednotlivých souřadnic CIE L*a*b*

Dřevina	Teplota termické úpravy	Souřadnice barevného prostoru CIE L*a*b*			Celková barevná změna ΔE^*
		L*	a*	b*	
Akát	ref.	64,47	5,97	32,14	-
Akát	160 °C	48,65	10,23	25,83	16,26
Akát	180 °C	25,58	7,67	12,39	42,84
Akát	210 °C	22,77	6,99	11,36	45,89

Největší změny byly pozorovány na souřadnici L*. U termicky upraveného vzorku při teplotě 160 °C došlo oproti referenčnímu vzorku ke změně téměř o 18 %, u vzorku upraveného při teplotě 180 °C došlo ke změně o 39 % a u vzorku upraveného při teplotě 210 °C došlo ke změně téměř o 42 %. Změnu souřadnice L* zobrazuje graficky obr. 32.

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na barevnou změnu souřadnice L* je uvedeno v tabulce č. 8. Na základě hladiny významnosti $P = 0$, lze tedy konstatovat, že faktor působí.



Obr. 32 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty souřadnice L* a její změna v průběhu termické modifikace

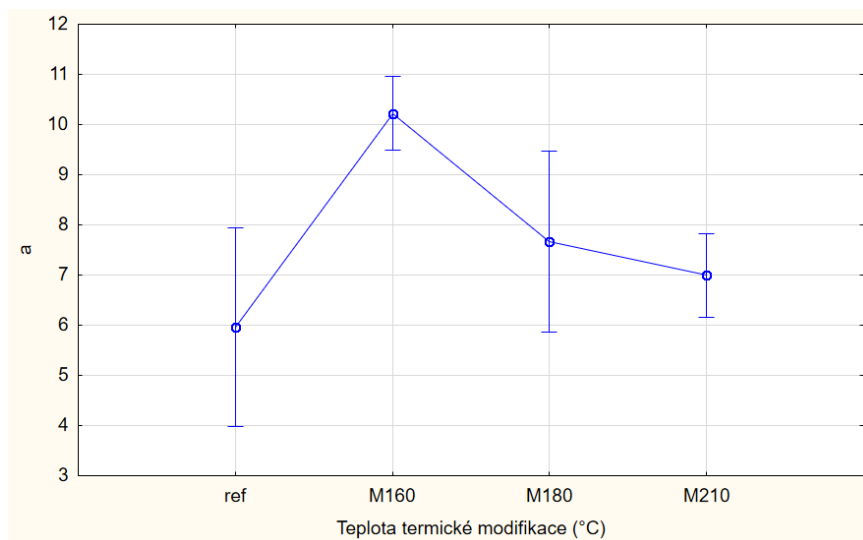
Tab. 8 Statistické posouzení vlivu teploty na barevnou změnu souřadnice L*

Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	19553,61	1	19553,61	10536	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	3533,19	3	1177,73	634,61	0,000000
Chyba	14,85	8	1,86		

Oproti tomu souřadnice a^* doznala nejmenších změn. Při termické úpravě 160 °C došlo ke zvýšení hodnoty oproti referenčnímu vzorku o 4,26, při termické úpravě 180 °C došlo ke zvýšení hodnoty oproti referenčnímu vzorku o 1,7 a při termické úpravě 210 °C došlo ke zvýšení hodnoty oproti referenčnímu vzorku o 1,03.

Lze konstatovat, že hodnota souřadnice a^* při teplotě 160 °C nejdříve prudce vzrostla a následně klesala, až se při teplotě 210 °C vrátila téměř na stejnou hodnotu, jaká byla u referenčního vzorku. Změnu souřadnice a^* v závislosti na termické úpravě dřeva přehledně znázorňuje graf na obr. 33.

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na barevnou změnu souřadnice a^* je uvedeno v tabulce č. 9. Na základě hladiny významnosti $P < 0,001$, lze tedy konstatovat, že vliv faktoru je statisticky velmi významný.



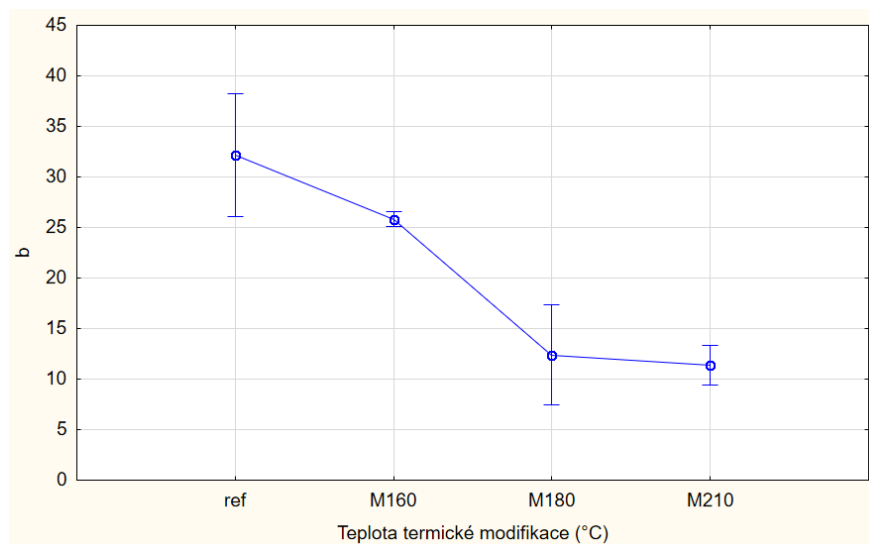
Obr. 33 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty souřadnice a^* a její změna v průběhu termické modifikace

Tab. 9 Statistické posouzení vlivu teploty na barevnou změnu souřadnice a^*

Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	714,1004	1	714,1004	2099,986	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	29,6639	3	9,8880	29,078	0,000118
Chyba	2,7204	8	0,3400		

Souřadnice b^* prošla podstatně větší změnou než souřadnice a^* . Hodnota při termické úpravě 160 °C poklesla oproti referenčnímu vzorku o 6,31, při termické úpravě 180 °C opět poklesla oproti referenčnímu vzorku o 19,75 a při termické úpravě 210 °C poklesla oproti referenčnímu vzorku o 20,78. Největší pokles souřadnice b^* nastal mezi teplotami 160–180 °C. Změnu souřadnice b^* v závislosti na termické úpravě dřeva znázorňuje graf na obr. 34.

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na barevnou změnu souřadnice b^* , je uvedeno v tabulce č. 10. Na základě hladiny významnosti $P < 0,001$, lze tedy konstatovat, že vliv faktoru je statisticky velmi významný.



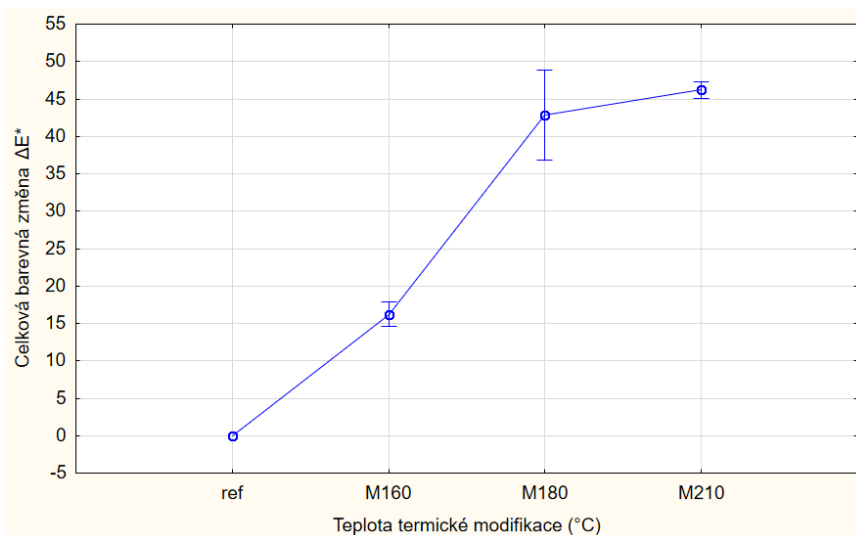
Obr. 34 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty souřadnice b^* a její změna v průběhu termické modifikace

Tab. 10 Statistické posouzení vlivu teploty na barevnou změnu souřadnice b^*

Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	5009,027	1	5009,027	1877,288	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	939,700	3	313,233	117,394	0,000001
Chyba	21,346	8	2,668		

Celková změna barvy ΔE^* se s rostoucí teplotou termické úpravy vzorků měnila velice znatelně, vše je patrné z grafu na obr. 35.

Vyhodnocení celkové změny barvy ΔE^* znázorňuje tabulka č. 11.



Obr. 35 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty celkové změny barvy ΔE a její změna v průběhu termické modifikace

Tab. 11 Vyhodnocení celkové změny barevného prostoru ΔE^*

Dřevina	Teplota termické úpravy	Celková barevná změna ΔE^*	Kritéria	vyhodnocení
Akát	160 °C	16,26	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Akát	180 °C	42,84	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Akát	210 °C	45,89	$\Delta E < 12$	Odlišná barva

Závěrem lze konstatovat, že celková změna barvy zkoumaného, termicky upraveného dřeva, vykazovala razantní změny barvy, a to při všech teplotách termické úpravy (160, 180, 210 °C). Dospěl jsem k závěru, že barva je odlišná.

9.2. Zpracování výsledků vlivu teploty termické úpravy na tvrdost

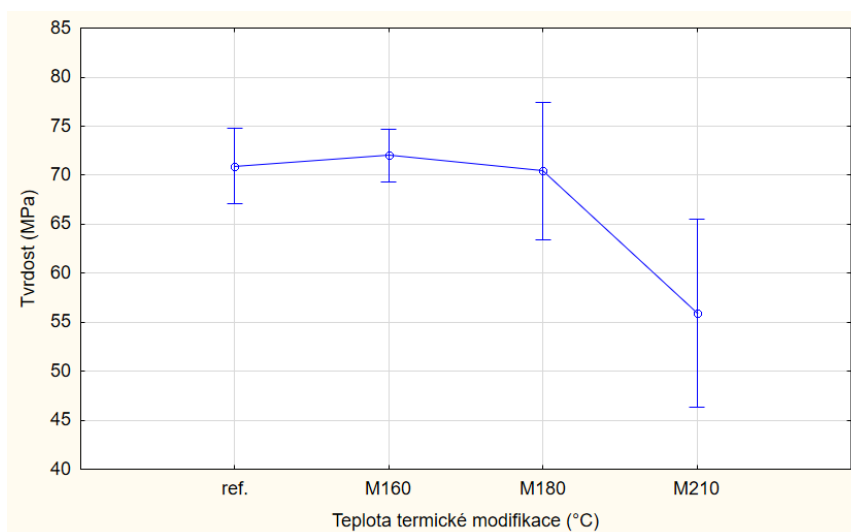
Z naměřených hodnot byly pro každý stupeň termické úpravy (ref, 160 °C, 180 °C, 210 °C) vypočítány průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella, včetně variačních koeficientů, vše přehledně znázorňuje tabulka č. 12.

U naměřené tvrdosti podle Brinella, došlo při teplotě termické úpravy 160 °C k mírnému zvýšení tvrdosti, při teplotě termické úpravy 180 °C, tvrdost mírně poklesla na hodnotu, která odpovídala tvrdosti referenčního vzorku dřeva. Při teplotě termické úpravy 210 °C tvrdost poklesla značně, vše je patrné z grafu na obr. 36.

Tab. 12 Průměrné hodnoty naměřené tvrdost podle Brinella

Dřevina	Teplota termické úpravy	Tvrdost podle Brinella (MPa)	Hustota (Kg/m ³)
Akát	ref.	70,9 (12,62)	756,2
Akát	160 °C	72 (7,93)	726,4
Akát	180 °C	70,45 (21,29)	748,4
Akát	210 °C	55,9 (36,72)	671,8

▪ Hodnoty v závorce udávají variační koeficienty (%)



Obr. 36 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty tvrdosti podle Brinella

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na tvrdost podle Brinella je uvedeno v tabulce č. 13. Na základě hladiny významnosti $P < 0,001$, lze tedy konstatovat, že vliv faktoru je statisticky velmi významný.

Pro ověření vlivu teploty při termické úpravě dřeva, na tvrdost podle Brinella byl použit Duncan test, výsledky zobrazuje tabulka č. 14.

Tab. 13 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na tvrdost podle Brinella

Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	362477,8	1	362477,8	1941,861	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	3498,6	3	1166,2	6,248	0,000755
Chyba	14186,6	76	186,7		

Tab. 14 Ověření vlivu teploty termické úpravy na tvrdost podle Brinella, Duncan test

Tvrdost podle Brinella (MPa)					
Dřevina	Teplota termické úpravy	(1)	(2)	(3)	(4)
		70,900	72,000	70,450	55,900
Akát	ref.		0,80	0,92	0,00
Akát	160 °C	0,80		0,74	0,00
Akát	180 °C	0,92	0,74		0,00
Akát	210 °C	0,00	0,00	0,00	

Odborná literatura uvádí, že teplota termické modifikace nemá významný vliv na tvrdost dřeva, a dokonce v některých případech může dojít ke zlepšení této charakteristiky (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood handbook 2003). Mnou zkoumané dřevo akátu, vykazovalo přesně popisované charakteristiky až do teploty termické úpravy 180 °C. Při teplotě 210 °C již dřevo vykazovalo značný pokles tvrdosti, a to o 21 %.

9.3. Zpracování výsledků vlivu teploty termické úpravy na rázovou houževnatost

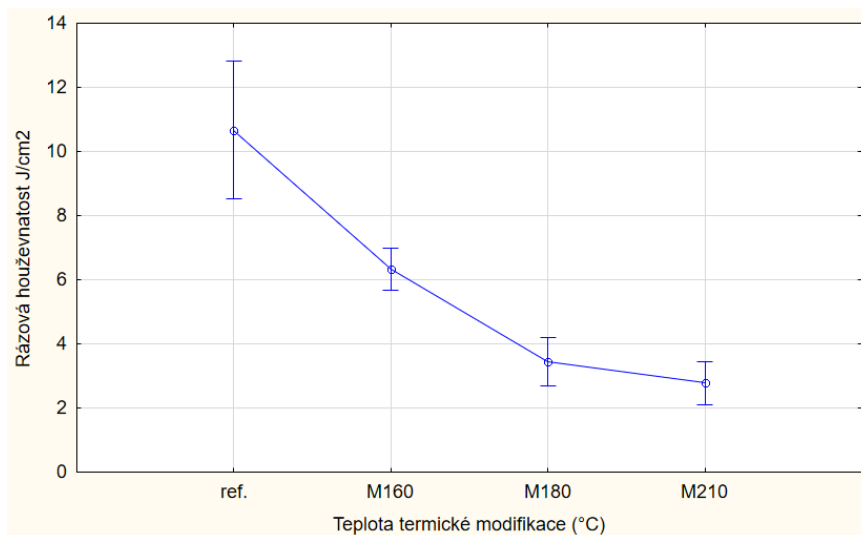
Z naměřených hodnot byly pro každý stupeň termické úpravy (ref, 160 °C, 180 °C, 210 °C) vypočítány průměrné hodnoty rázové houževnatosti včetně variačních koeficientů, vše přehledně znázorňuje tabulka č. 15.

U rázové houževnatosti již při teplotě termické úpravy 160 °C došlo k prudkému poklesu hodnoty o 40,64 % oproti referenční hodnotě. Při teplotě termické úpravy 180 °C došlo opět k prudkému poklesu hodnoty o 67,7 % oproti referenční hodnotě. Při teplotě termické úpravy 210 °C rázová houževnatost opět poklesla o 73,97 % oproti referenční hodnotě, avšak tento pokles již nebyl tak výrazný oproti teplotě termické úpravy 180 °C, vše je patrné z grafu na obr. 37.

Tab. 15 Průměrné naměřené hodnoty rázové houževnatosti

Dřevina	Teplota termické úpravy	Rázová houževnatost (J/cm ²)	Hustota (Kg/m ³)
Akát	ref.	10,68 (36,2)	615,1
Akát	160 °C	6,34 (18,8)	669,1
Akát	180 °C	3,45 (39,7)	585,9
Akát	210 °C	2,78 (43,7)	590,3

▪ Hodnoty v závorce udávají variační koeficienty (%)



Obr. 37 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty rázové houževnatosti

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na rázovou houževnatost je uvedeno v tabulce č. 16. Na základě hladiny významnosti $P = 0$, lze tedy konstatovat, že faktor na rázovou houževnatost působí.

Pro ověření vlivu teploty při termické úpravě dřeva, na rázovou houževnatost byl použit Duncan test, výsledky zobrazuje tabulka č. 17.

Tab. 16 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na rázovou houževnatost

Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	2024,140	1	2024,140	411,6261	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	580,041	3	193,347	39,3188	0,000000
Chyba	275,376	56	4,917		

Tab. 17 Ověření vlivu teploty termické úpravy na rázovou houževnatost, Duncan test

Rázová houževnatost (J/cm ²)					
Dřevina	Teplota termické úpravy	(1)	(2)	(3)	(4)
Akát	ref.	10,68	6,34	3,45	2,78
Akát	160 °C	0,00	0,00	0,00	0,00
Akát	180 °C	0,00	0,00	0,00	0,41
Akát	210 °C	0,00	0,00	0,41	0,00

V souladu s poznatky z odborné literatury, je rázová houževnatost, nejvíce dotčenou mechanickou vlastností u termicky upraveného dřeva. Měření toto tvrzení v plném rozsahu potvrdilo.

9.4. Analýza účinků teploty termické modifikace na hodnoty chemických komponentů

Dřevo akátu bylo podrobena chemické analýze, jak před tepelnou úpravou (označené jako ref.), tak po tepelné úpravě při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C. Průměrné hodnoty přehledně zobrazuje tabulka č. 18. Tepelná modifikace dřeva má, v první řadě, vliv na jeho chemické složení, což se následně projeví na fyzikálních a mechanických vlastnostech daného dřeva.

Tab. 18 Chemická analýza základních složek dřeva akátu

Teplota termické úpravy	Doprovodné složky dřeva (%)	Lignin (%)	Holocelulóza (%)	Celulóza (%)	Hemicelulóza (%)
ref.	9,29 (0,82)	25,31 (0,55)	68,46 (0,60)	40,50 (0,53)	27,96 (0,70)
160 °C	8,71 (3,32)	23,94 (2,14)	67,35 (0,29)	44,88 (0,18)	22,47 (1,10)
180 °C	8,38 (2,03)	25,23 (0,54)	63,97 (0,25)	47,63 (0,42)	16,33 (2,10)
210 °C	7,64 (1,93)	28,82 (0,25)	59,30 (0,28)	54,45 (0,51)	4,85 (4,44)

▪ Hodnoty v závorce udávají variační koeficienty (%)

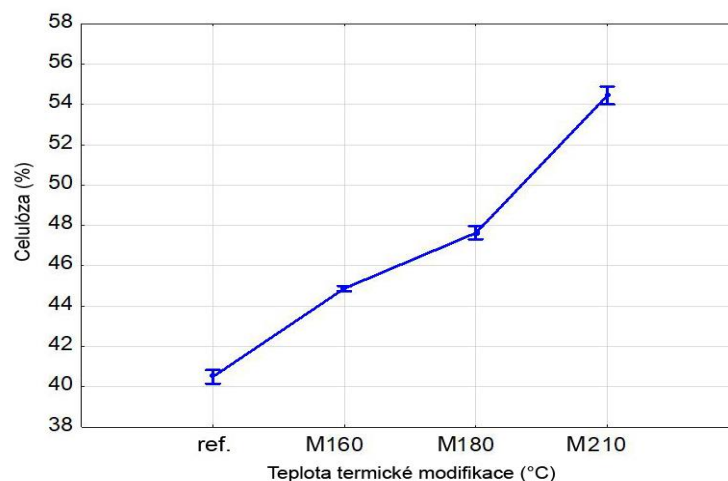
Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy dřeva na změnu obsahu celulózy ve zkoumaných vzorcích je uvedeno v tabulce č. 19. Na základě hladiny významnosti $P=0$, lze tedy konstatovat, že faktor na obsah celulózy ve zkoumaném dřevě působí.

Tab. 19 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na celulózu

Celulóza (%)					
Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	35140,46	1	35140,46	838226,5	0,00
Teplota termické modifikace (°C)	410,27	3	136,76	3262,1	0,00
Chyba	0,50	12	0,04		

Z grafu, na obr. 38, je patrné, že teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv na podíl celulózy ve zkoumaných vzorcích. U celulózy, došlo při teplotě termické úpravy 160 °C k navýšení podílu oproti referenčním vzorkům o 10,62 %, při

teplotě termické úpravy 180 °C se podíl celulózy zvýšil o 17,6 % oproti referenčním vzorkům, a při teplotě 210 °C došlo k navýšení oproti referenčním vzorkům o 34,44 %.



Obr. 38 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hodnoty celulózy

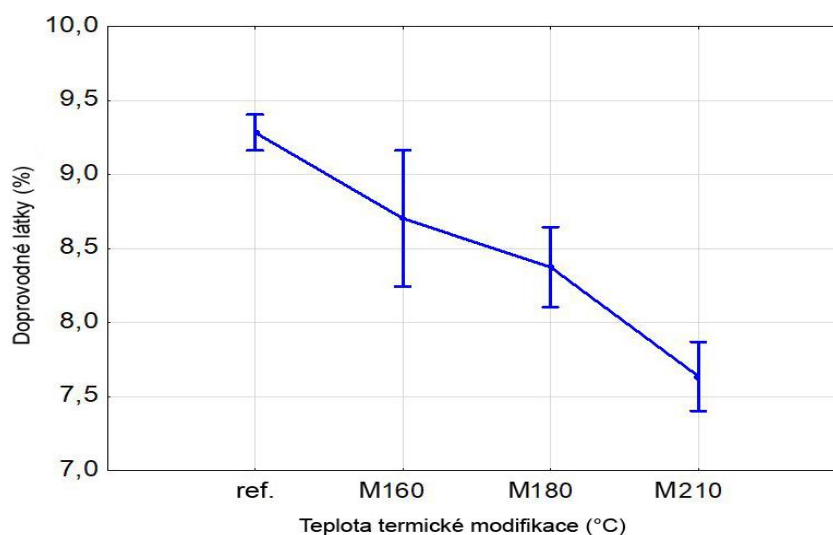
Celulóza je velmi odolná proti vysokým teplotám a vykazuje dobrou stabilitu při termické úpravě dřeva. Jako první, se stoupající teplotou tepelné úpravy, začíná degradovat amorfní část celulózy, což má za následek zvýšení krystalického podílu celulózy (Kubovský et al 2020), viz. tabulka č. 18. Krystalická část celulózy obvykle degraduje až při teplotě nad 300 °C (Reinprecht-Vidholdová 2008). Oproti referenčním vzorkům, došlo při nejvyšší teplotě tepelné úpravy k navýšení celulózy o 34,44 %.

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy dřeva na změnu obsahu doprovodných složek, ve zkoumaných vzorcích, je uvedeno v tabulce č. 20. Na základě hladiny významnosti $P=0$, lze tedy konstatovat, že faktor na obsah doprovodných složek ve zkoumaném dřevě působí.

Tab. 20 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na doprovodné látky

Doprovodné složky dřeva (%)					
Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	1156,170	1	1156,170	33098,44	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	5,671	3	1,890	54,12	0,000000
Chyba	0,419	12	0,035		

Na grafu, obr. 39, je přehledně zobrazen pokles doprovodných složek, teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv také na doprovodné složky. Při termické úpravě, při teplotě 160 °C, došlo ke snížení obsahu doprovodných látek oproti referenčním vzorkům o 6,24 %, a tento pokles pokračoval i nadále. Při teplotě 180 °C poklesl podíl doprovodných látek oproti referenčním vzorkům o 9,79 %, a při teplotě 210 °C, pokles doprovodných látek pokračoval oproti referenčním vzorkům o 17,76 %.

**Obr. 39** Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na doprovodných látek

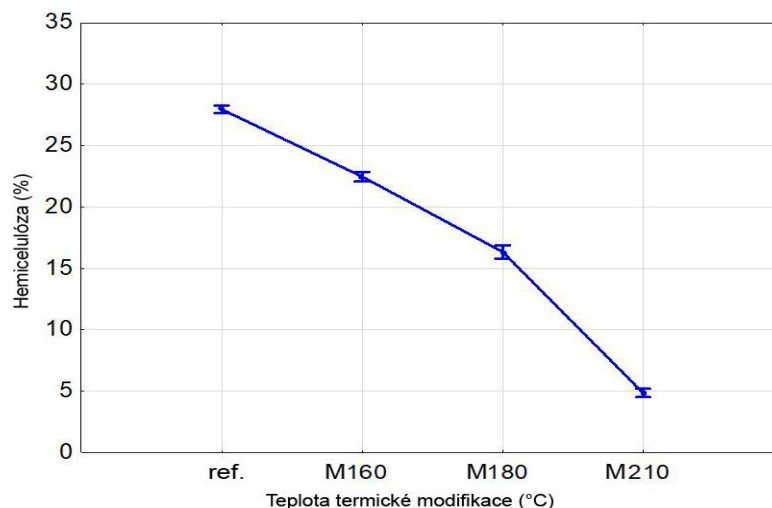
Zvýšená teplota má rovněž značný vliv na doprovodné složky dřeva, které se ve velké míře ze dřeva převážně odpaří. V některých případech, termické úpravy dřeva, může dojít ke zvýšení podílu doprovodných látek, zejména činností rozkladu hemicelulóz, jak uvádí odborná literatura (Gaff et al. 2019, Reinprecht-Vidholdová 2008). Oproti referenčním vzorkům došlo při nejvyšší teplotě tepelné úpravy k navýšení doprovodných složek dřeva o 34,44 %.

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy dřeva na změnu obsahu hemicelulóz ve zkoumaných vzorcích, je uvedeno v tabulce č. 21. Na základě hladiny významnosti $P=0$, lze tedy konstatovat, že faktor na obsah hemicelulóz ve zkoumaném dřevě působí.

Tab. 21 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na hemicelulózu

Hemicelulóza (%)					
Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	5128,294	1	5128,294	77864,37	0,00
Teplota termické modifikace (°C)	1178,795	3	392,932	5966,00	0,00
Chyba	0,790	12	0,066		

Jak je patrné z grafu, na obr. 40, teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv i na hemicelulózy. Oproti referenčním vzorkům došlo opravdu k velkému poklesu obsahu hemicelulóz. Při tepelné úpravě dřeva, při teplotě 160 °C, došlo k poklesu hemicelulóz o 19,64 %, při teplotě 180 °C došlo k poklesu hemicelulóz o 41,6 %, a při teplotě 210 °C, došlo opravdu k obrovskému poklesu hemicelulóz o 82,66 % oproti referenčním vzorkům.



Obr. 40 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na hemicelulózy

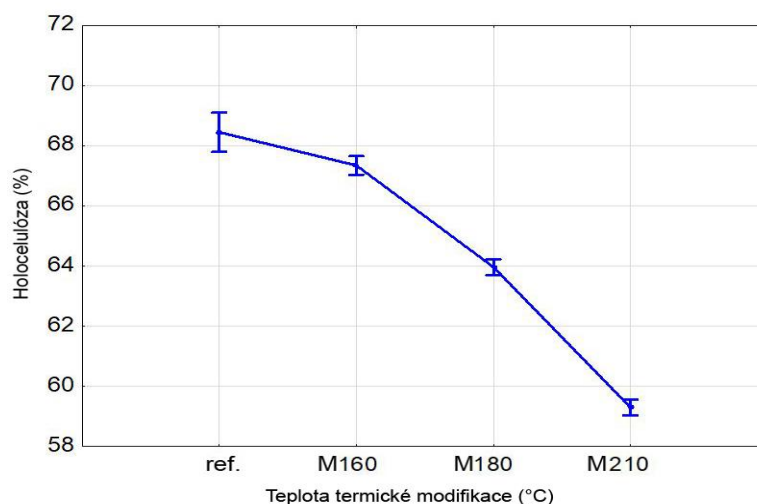
Hemicelulózy jsou nejméně stabilní složkou dřeva, a při tepelné úpravě degradují velmi významně, podléhají rozkladu již při teplotách pod 200 °C (Reinprecht-Vidholdová 2008). Průměrné hodnoty zkoumaných vzorků zobrazuje tabulka č. 18. Oproti referenčním vzorkům došlo při nejvyšší teplotě tepelné úpravy ke snížení obsahu hemicelulóz 82,66 %, což potvrdilo, že hemicelulózy jsou nejméně stabilní složkou dřeva.

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy dřeva na změnu obsahu holocelulóz ve zkoumaných vzorcích, je uvedeno v tabulce č. 22. Na základě hladiny významnosti $P=0$, lze tedy konstatovat, že faktor na obsah holocelulóz ve zkoumaném dřevě působí.

Tab. 22 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na holocelulózu

Holocelulóza (%)					
Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	67117,26	1	67117,26	1031978	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	203,15	3	67,72	1041	0,000000
Chyba	0,78	12	0,07		

Z grafu, na obr. 41, je patrné, že teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv také na holocelulózu, s narůstající teplotou dochází k jejich poklesu. Při teplotě termické úpravy 160 °C došlo k poklesu obsahu holocelulóz oproti referenčním vzorkům o 1,62 %, při teplotě 180 °C došlo k poklesu o 6,56 % a při teplotě 210 °C došlo k poklesu holocelulóz oproti referenčním vzorkům o 13,38 %.



Obr. 41 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na holocelulózu

Název holocelulóza se souhrnně používá pro všechny polysacharidy obsažené ve dřevě. Průměrné hodnoty obsahu holocelulóz zobrazuje tabulka č. 18. V průběhu tepelné

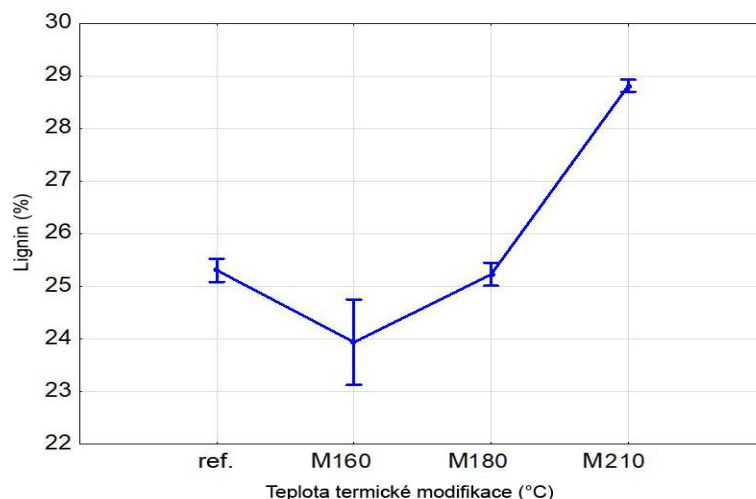
úpravy došlo k celkovému snížení holocelulóz, při nejvyšší teplotě tepelné úpravy oproti referenčnímu vzorku o 13,38 %, což je pravděpodobně způsobeno rozkladem jednodušších cukrů a hemicelulóz.

Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy dřeva na změnu obsahu ligninu ve zkoumaných vzorcích je uvedeno v tabulce č. 23. Na základě hladiny významnosti $P=0$, lze tedy konstatovat, že faktor na obsah ligninu ve zkoumaném dřevě působí.

Tab. 23 Statistické posouzení vlivu teploty termické úpravy na lignin

Lignin (%)					
Efekt	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P-hladina významnosti
Absolutní člen	10671,41	1	10671,41	139758,1	0,000000
Teplota termické modifikace (°C)	52,56	3	17,52	229,4	0,000000
Chyba	0,92	12	0,08		

Z grafu, obr. 42, je zřejmé, že teplota termické úpravy má statisticky velmi významný vliv také na lignin. Při teplotě termické úpravy 160 °C došlo nejprve ke snížení obsahu ligninu oproti referenčním vzorkům o 5,41 %, následně při teplotě 180 °C se lignin zvýšil téměř na hodnotu referenčních vzorků a při teplotě termické úpravy 210 °C se obsah ligninu zvýšil oproti referenčním vzorkům o 13,87 %.



Obr. 42 Graf 95 % intervalů spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace na ligninu

Lignin je složka dřeva, která vykazuje velmi stabilní vlastnosti při tepelné úpravě dřeva. Při teplotách do 180 °C dochází k plastifikaci ligninu, významně se rozkládá až při teplotách nad 300 °C (Reinprecht-Vidholdová 2008). Průměrné hodnoty ligninu zkoumaných vzorků zobrazuje tabulka č. 18.

Korelační koeficient nám určuje vzájemný vztah mezi dvěma veličinami

- Označujeme r
- $r \in \langle -1, 1 \rangle$
- $r = 0 \Rightarrow$ nezávislost
- $r = 1 \Rightarrow$ přímá závislost
- $r = -1 \Rightarrow$ nepřímá závislost

Korelační koeficient v závislosti na chemických složkách dřeva akátu na tvrdost podle Brinella zobrazuje tabulka č.24. Z tabulky je patrné, že tvrdost je nepřímo závislá na změně chemických komponentů ligninu a celulózy a přímo závislá na změně chemických komponentů hemicelulózy, holocelulózy a doprovodných složek.

Tab. 24 Korelační koeficient v závislosti na chemických složkách dřeviny akátu na tvrdost podle Brinella

	Chemické složky dřeva akátu (%)				
	Doprovodné složky	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	Hemicelulóza
Teplota termické úpravy (°C)	-0,9594	0,72580	-0,9663	0,98421	-0,9825
Tvrdost (MPa)	0,32959	-0,4274	0,3943	-0,3869	0,39432

Korelační koeficient v závislosti na chemických složkách dřeva akátu na změnu rázové houževnatosti zobrazuje tabulka č.25. Z tabulky je patrné, že rázová houževnatost je velmi silně nepřímo závislá na změně chemických komponentů ligninu a celulózy a silně přímo závislá na změně chemických komponentů hemicelulózy, holocelulózy a doprovodných složek.

Tab. 25 Korelační koeficient v závislosti na chemických složkách dřeviny akátu na rázovou houževnatost

	Chemické složky dřeva akátu (%)				
	Doprovodné složky	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	Hemicelulóza
Teplota termické úpravy (°C)	-0,8103	0,30193	-0,7056	0,81638	-0,7754
Rázová houževnatost (J/cm ²)	0,73830	-0,4086	0,702241	-0,7407	0,72919

Korelační koeficient v závislosti na chemických složkách dřeva akátu na změnu barvy zobrazuje tabulka č.26. Jak je z tabulky zřejmé, změna chemických komponentů má velmi silnou závislost na celkové změnu barvy dřeva.

Tab. 26 Korelační koeficient v závislosti na chemických složkách dřeviny akátu na změnu barvy

	Chemické složky dřeva akátu (%)				
	Doprovodné složky	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	Hemicelulóza
Teplota termické úpravy (°C)	-0,8741	0,45981	-0,8096	0,90200	-0,8698
L*	0,02827	0,15709	0,05859	-0,1082	0,08843
a*	-0,3504	0,00642	-0,2219	0,34163	-0,2945
b*	0,06451	0,10566	0,10873	-0,1506	0,13433
ΔE^*	-0,9452	0,65937	-0,9200	0,92636	-0,9298

10 Závěr

Cílem práce bylo analyzovat poznatky se zaměřením na vliv rozdílné teploty termické modifikace dřeva na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti. Na základě naměřených dat, jsem po zpracování výsledků, dospěl k následujícím zjištěním.

10.1. Chemická analýza

Se stoupající teplotou termické úpravy, dochází ve dřevě k různým chemickým reakcím, degradacím a rozkladům jeho složek. Zatímco složky, lignin a celulóza, vykazují vyšší odolnost a rozkládají se pomaleji, hemicelulózy a doprovodné složky, již tak odolné nejsou (ThermoWood Handbook 2003). S rostoucí teplotou rovněž dochází k poklesu hustoty, a ta, jak je známo, má přímou korelaci s mechanickými vlastnostmi dřeva. Referenční vzorky dřeva vykazovaly průměrnou hustotu $615,1 \text{ kg/m}^3$, a i když hustota je velmi proměnná veličina, v rámci jednoho stromu, tak oproti tomu vzorky upravené při teplotě termické úpravy $210 \text{ }^\circ\text{C}$, vykazovaly hustotu $590,3 \text{ kg/m}^3$. V odborné literatuře se uvádí, že termická úprava má minimální vliv na tvrdost dřeva, která dokonce s rostoucí teplotou termické úpravy mírně roste (Reinprecht-Vidholdová 2008, ThermoWood handbook 2003), toto tvrzení se v mé práci nepotvrdilo. Tvrdost vykazovala poměrně vyrovnané hodnoty, ale při teplotě $210 \text{ }^\circ\text{C}$ termické úpravy dřeva, došlo k prudkému poklesu tohoto parametru. Velký pokles hemicelulóz při termické úpravě dřeva, kdy listnaté dřeviny, oproti jehličnatým dřevinám, obsahují vyšší množství hemicelulóz, v kombinaci s poklesem hustoty dřeva pravděpodobně zapříčinil prudký pokles tvrdosti při teplotě termické úpravy $210 \text{ }^\circ\text{C}$. Nejvíce dotčenou mechanickou vlastností, která je termickou úpravou ovlivněna, je rázová houževnatost (Reinprecht-Vidholdová 2008). Tuto skutečnost mé měření, rázové houževnatosti, potvrdilo. Oproti referenčním vzorkům, vykazovala rázová houževnatost při termické úpravě $210 \text{ }^\circ\text{C}$, pokles o $73,97 \%$ oproti referenčním vzorkům. Velký pokles rázové houževnatosti pravděpodobně zapříčinil rozklad hemicelulózy, ta hraje významnou roli pro pevnost a houževnatost (Gaff et al 2019), a v kombinaci s narušením ostatních stavebních polymerů. Jedná se o velmi složitý proces, který je nad rámec této bakalářské práce.

Studiem odborné literatury jsem zjistil, že výsledky chemické analýzy jsou u různých autorů rozdílné, a to z důvodů různých možností a postupů termické úpravy

dřeva (Gaff et al 2019, Reinprecht-Vidholdová 2008, Kubovský et al 2020). Vliv na chemickou strukturu dřeva má zejména:

- Teplota termické úpravy,
- časová expozice,
- druh, tvar a rozměr dřeva,
- tlak prostředí,
- počáteční vlhkost dřeva,
- přítomnost kyslíku atd (Reinprecht-Vidholdová 2008).

Například v odborném článku *„The effect of chemical changes during thermal modification of European oak and Norway spruce on elasticity properties”* (Gaff et al 2019), kde bylo chemické analýze podrobena dřevo dubu a smrku, vykazovaly doprovodné látky opačnou tendenci, než mnou zkoumané dřevo a doprovodné látky zaznamenaly nárůst. Doprovodné složky mnou zkoumaného dřeva, zaznamenaly největší pokles o 17,76 % při teplotě 210 °C termické úpravy, oproti referenčním vzorkům. Oproti tomu složky dřeva, jako je celulóza, lignin a hemicelulóza vykazovaly obdobné změny, jako mnou zkoumané dřevo. U celulózy došlo k největšímu nárůstu o 34,44 % při termické úpravě 210 °C, oproti referenčním vzorkům. Hemicelulózy vykazovaly největší pokles při teplotě termické úpravy 210 °C, oproti referenčním vzorkům, a to o 82,66 %. Lignin zaznamenal největší nárůst o 13,87 % při teplotě 210 °C termické úpravy, oproti referenčním vzorkům.

Chemické analýze byly podrobena základní složky dřeva (celulóza, hemicelulóza, holocelulóza, lignin a doprovodné složky). Tato analýza prokázala, že teplota termické úpravy má statisticky významný dopad na změnu základních komponentů dřeva, a s tím spojený vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti zkoumaného dřeva.

10.2. Barva

Z výsledků experimentální části měření barvy a porovnání výsledků s referenční barvou vyplynulo, že teplota termické úpravy dřeva má zásadní vliv na tuto fyzikální vlastnost. K vyhodnocení byla použita metoda CIELAB. U jednotlivých souřadnic tohoto barevného prostoru docházelo k odlišným změnám parametrů, nejmenších změn doznala souřadnice a^* oproti souřadnicím L^* a b^* , ale v konečném důsledku celková změna barvy

ΔE^* vykazovala značné změny již při teplotě termické modifikace 160 °C, tato tendence pokračovala i při teplotách 180 °C a 210 °C. Všechny tři teplotní stupně termické modifikace, dle vyhodnocovacích kritérií, vykazovaly parametry, ze kterých jsem dospěl k závěru: Barva je odlišná pro všechny tři zkoumané teploty termické modifikace.

Pro potvrzení svého zkoumání jsem vyhledal dostupné odborné texty na dané téma, odborný článek *„Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood”* Journal of Wood Science (Sikora A. et al. 2018) a výsledky závěrečných prací z České zemědělské university v Praze, které se zabývaly podobnou problematikou (Vondrová V. 2017, Moscovcius 2020, Švec D. 2017). U zkoumaného dřeva: dub, smrk, iroko, padouk a meranti, bylo dosaženo velmi podobných výsledků, a téměř ve všech případech byla změna hodnocená jako odlišná barva. Výsledky se shodují s tím, co uvádí odborná literatura. Měření vzorků dřeva prokázalo, že teplota termické modifikace přímo ovlivňuje odstín barvy. Na výsledný odstín má také zásadní vliv použitá technologie termické úpravy, čas expozice, a především přítomnost kyslíku (Reinprecht-Vidholdová 2008). Jak jsem již v práci zmínil, barva je pro zákazníka většinou rozhodujícím faktorem. Lze konstatovat, že při termické modifikaci dochází ke sladění odstínů dřeva, což se pozitivně projeví na vnímání barvy jako takové. U této fyzikální vlastnosti se nedá jednoznačně určit, jestli došlo ke zhoršení, nebo zlepšení této vlastnosti, protože každý jedinec vnímá barvu odlišným způsobem. Závěrem lze dodat, že experimentální měření barvy dopadlo dle mých předpokladů a shoduje se s výsledky, které uvádí odborná literatura.

10.3. Tvrdost podle Brinella

Z výsledků experimentální části měření tvrdosti podle Brinella a porovnání výsledků s tvrdostí referenčního vzorku, jsem dospěl k následujícímu závěru: Tvrdost se mírně zvýšila již při teplotě termické modifikace 160 °C, při teplotě termické modifikace 180 °C dosahovala průměrná tvrdost téměř shodné výsledky jako u referenčního vzorku. K velkému poklesu tvrdosti, došlo při teplotě termické úpravy 210 °C, hodnota tvrdosti klesla oproti referenčnímu vzorku o 21 %. Toto zjištění bylo překvapivé, neboť odborná literatura uvádí, že tvrdost se při termické modifikaci nijak zvlášť nemění, nebo dochází k mírnému nárůstu tvrdosti (ThermoWood Handbook 2003). Toto se potvrdilo u nejnižšího stupně termické modifikace, kde dřevo vykazovalo největší tvrdost. Bylo by zajímavé porovnat více druhů dřeva při teplotě termické modifikace 210 °C a toto měření

porovnat s výsledky akátu. Pro vyvození jednoznačného závěru by bylo nutné provést měření na větším počtu vzorků z různých individuálních jedinců akátu, protože tvrdost je velmi závislá na hustotě dřeva.

Pro potvrzení svého zkoumání jsem vyhledal dostupné odborné texty na dané téma. Zjistil jsem, že např. autor diplomové práce Moscovcius, dospěl k podobným výsledkům, že jím zkoumané dřevo, iroko, padouk, vykazovaly značný pokles tvrdosti při termické úpravě 210 °C (Moscovcius 2020).

10.4. Rázová houževnatost

Z výsledků experimentální části měření rázové houževnatosti a porovnání výsledků s referenčními vzorky jsem dospěl k následujícímu závěru: U rázové houževnatosti došlo k výraznému poklesu již při teplotě termické úpravy 160 °C, průměrná hodnota rázové houževnatosti při této teplotě poklesla o 40,6 % oproti průměrné referenční hodnotě. Při teplotě termické úpravy 180 °C, došlo opět k razantnímu snížení hodnoty rázové houževnatosti oproti průměrné referenční hodnotě a to o 67,7 %. Při teplotě termické úpravy 210 °C došlo opět k poklesu hodnoty rázové houževnatosti, oproti průměrné referenční hodnotě o 73,7 %. Vzorky modifikované při teplotě 210 °C se po nárazu Charpyho kladiva rozpadaly na více částí, což svědčí o jejich velké křehkosti. Toto zjištění je v souladu s tím, co uvádí odborná literatura a dá se říci, že rázová houževnatost je termickou modifikací ovlivněna nejvíce ze všech mechanických vlastností dřeva vůbec (Reinprecht-Vidholdová 2008).

10.5. Shrnutí

Obliba různě modifikovaného dřeva neustále roste, neboť nabízí různé vylepšené vlastnosti, které pozitivně ovlivňují užžitnou hodnotu výrobku. U termicky modifikovaného dřeva tomu není jinak. Je velmi oblíbené a jeho produkce neustále vzrůstá. I když se dá termicky upravit téměř každé dřevo, v průmyslovém měřítku, se nejvíce využívá borovice a smrk.

Akát je dřevo, které se k termické modifikaci běžně nevyužívá. Sám o sobě vykazuje velmi dobré fyzikální a mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu je velmi hojně využíván pro venkovní expozice. Po termické úpravě, vykazuje akát velice dobré

vlastnosti, jak fyzikální, tak mechanické, a tudíž je uvedené dřevo vhodné například na podlahy teras, s velmi vysokou zátěží (z důvodu, že např. oproti smrku bude vykazovat několikanásobně lepší odolnost například vůči opotřebení a mechanickému poškození). Dle mého názoru, žádné dřevo nevykazuje tak výborné vlastnosti, aby mohla být bez problému použita ve třídě 3 a 4. Z tohoto důvodu se zkouší modifikovat různé dřeviny a experimentálním způsobem ověřit účinnost této modifikace.

At' už se jednalo o barvu, tvrdost nebo rázovou houževnatost, akát, nijak závažně nevykazoval rozdílné změny mechanických a fyzikálních vlastností oproti jiným vzorkům dřeva, kterými se zabývali další autoři, které jsem využil pro porovnání s vlastním měřením.

Z výše uvedených experimentálních měření lze konstatovat, že teplota termické modifikace ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva. Výzkum v této oblasti probíhá i nadále. Vědci vyvíjí snahu o vylepšení této technologie s cílem zlepšit fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva. Snahou je nahradit různé nepříliš ekologické impregnace technologií, které umožní vystavit dřevo kontaktu se zemí s odpovídající životností a bude mít minimální dopad na životní prostředí.

11 Seznam použité literatury

1. BUDAKCI, M., ILCE, A. C., GÜRLEYEN, T., and UTAR, M. (2013). *Determination of the surface roughness of heat-treated wood materials planed by the cutters of a horizontal milling machine*, *BioResources* 8(4), 3189-3199. DOI: 10.15376/biores.8.3.3189-3199
2. DEJMAL, Aleš. *Sušení a modifikace dřeva*. Učební text, MENDELU v Brně, 2009. 85 s.
3. DUBOVSKÝ, J., BABIAK, M., and ČUNDERLÍK, I. (1998). *Textúra, Štruktúra a Úžitkové Vlastnosti Dřeva*, Technická Univerzita vo Zvolene, Zvolen, Slovakia.
4. ESTEVES, B. M., and PEREIRA, H. M. (2009). *Wood modification by heat treatment: A review*, *BioResources* 4(1), 370-404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.
5. GAFF, M., MARIAN, B., KAČÍK, SANDBERG, D., TURČANI, M. HANZLIK, P., VONDROVA, V., (2019). "Plasticity properties of thermally modified timber in bending – The effect of chemical changes during modification of European oak and Norway spruce", *Composites Part B: Engineering*, 165 (2019): 613-625, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.019>
6. GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 3. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 175 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
7. HILL, C.A. *Wood Modification Chemical, Thermal, and Other Processes*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, UK. 2006. 260 s. ISBN 978-0-470-02172-9.
8. HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2.*, přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 128 s. ISBN 978-80-7375-169-2.
9. HORÁČEK, P. *Mechanické vlastnosti dřeva*. studijní pomůcka 2010. 44 s.
10. KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. *Chemické a mechanické zmeny dřeva pri termickej úprave*. 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.

-
11. KOLEKTIV AUTORŮ. *Dřevařská technická příručka*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970. 748 s.
 12. KORKUT, S. D., HIZIROGLU, S., and AYTIN, A. (2013). Effect of heat treatment on surface characteristics of wild cherry wood, *BioResources* 8(2), 1582-1590.
 13. KUBOVSKÝ, I., KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. (2020). *Structural Changes of Oak Wood Main Components Caused by Thermal Modification*. *Journal MDPI*: MDPI is a pioneer in scholarly open access publishing and has supported academic communities since 1996. 21 February 2020. Journals / Polymers / Volume 12 / Issue 2 / 10.3390/polym12020485.
 14. KUBOVSKÝ, I., URGELA, S. *Farba a svetlo: monografia*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2004. ISBN 80-228-1399-0.
 15. MATOVIČ, A., 1993: *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. VŠZ Brno, 212 s. ISBN 80-7157-086-9.
 16. MOSCOVCIUC M. 2020, diplomová práce, Fyzikální – mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). [cit. 2021-03-11]. Dostupné z ČZU.
 17. POŽGAJ, Alexander, et al. *Štruktúra a vlasnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
 18. REINPRECHT L., VIDHOLDOVÁ Z. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. vyd. Technická univerzita vo Zvolene. 2008. s. 28. ISBN 978-80-228-1920-6.
 19. REINPRECHT, L., PÁNEK, M. *Trvanlivost a ochrana dřeva*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2660-6.
 20. SIKORA, A., KAČÍK, F., GAFF, M., VONDROVÁ, V., BUBENIKOVÁ, T., KUBIVSKÝ, I. (2018). Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. *Journal of Wood Science: Official Journal of the Japan Wood Research Society* [online]. 2018, 64(4), 406-416 [cit. 2021-03-11]. DOI: 10.1007/s10086-018-1721-0. ISSN 14350211.
 21. ŠVEC D. 2017, bakalářská práce, Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z ČZU.

-
22. VONDROVÁ V. 2017, diplomová práce, Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z ČZU.
 23. ISO 11664-4 (2008) Colorimetry—part 4: CIE 1976 $L^*a^*b^*$ colour space. International Organization for Standardization, London.
 24. ISO 11664-6 (2013) Colorimetry—part 6: CIEDE2000 colour difference formula. International Organization for Standardization, London.
 25. ISO 11664-2 (2007) Colorimetry — Part 1: CIE standard colorimetric observers.
 26. ČSN EN ISO 6506-1 (2005) Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda.
 27. ISO 13061-2 (2014) Physical and mechanical tests on small clear wood specimens.
 28. ISO 13061-1 (2014) Physical and mechanical tests on small clear wood specimens.
 29. ČSN 49 0117 (490117) Drevo. Rázová húževnatost' v ohybe

Internetové zdroje:

1. O akátu. *Svět Akátu* [online]. [cit. 2020-09-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.http://svetakatu.cz/o-akatu/>>.
2. *THERMOWOOD HANDBOOK* [online]. Helsinki: Finnish Thermowood Association, 2003 [cit. 2020-08-28]. Dostupné z WWW: <http://www.https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf>.
3. *THERMOWOOD®: • TERASY • FASÁDY • SAUNY • NÁBYTEK •* [online]. Opava: PROKOM R & S s.r.o. [cit. 2020-08-20]. Dostupné z WWW: <<https://www.prokom.cz/thermowood-tepelne-upravene-drevo/katalog-tepelne-upravene-drevo-thermowood.pdf>>.
4. *APPLICATIONS NOTE CIE L*a*b*2008* [online]. HunterLab [cit. 2020-09-25]. Dostupné z WWW: <<https://www.hunterlab.se/wp-content/uploads/2012/11/CIE-L-a-b-.pdf>>.
5. *ZKUŠEBNÍ STROJE* [online]. Igitur [cit. 2020-09-30]. Dostupné z WWW: <<https://www.igitur.cz/razove-zkusebni-stroje/charpy-kladivo-instron-mpx>>.

-
6. *INSTRON* [online]. MOTORIZED PENDULUM IMPACT TESTING SYSTEM MPX Series [cit. 2020-09-30]. Dostupné z WWW: <<https://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2014/08/motorized-pendulum-impact-testing-systemmpxsystems.pdf?la=en&hash=F004550C22FD13891DD08A32106646AD2A7CB9EB>>.