

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská



Bakalářská práce

**Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky
modifikovaného dřeva**

Filip Rýgl

© 2022 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Filip Rýgl

Dřevařství

Dřevařství

Název práce

Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Název anglicky

Physical and mechanical properties of thermally modified wood

Cíle práce

Cílem práce je analyzovat poznatky se zaměřením na problematiku fyzikálně-mechanických vlastností termicky upraveného dřeva. Experimentální část práce se zabývá zjištěním vlivu jednotlivých stupňů termické úpravy dřeva na jeho fyzikálně – mechanické charakteristiky. Předpokládaným výstupem práce by mělo být zhodnocení účinku jednotlivých stupňů termické modifikace na vybrané fyzikálně – mechanické vlastnosti modifikovaného dřeva.

Metodika

1. Literární rozbor problematiky vlivu termické modifikace na vlastnosti dřeva.
2. Navržení metodiky tvorby zkušebních těles a jejich testování.
3. Experimentální zjištění vlivu termické modifikace na vlastnosti dřeva.
4. Statistické vyhodnocení.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuze, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. Úvod (říjen 2021).
2. Analýza problematiky (listopad 2021).
3. Experimentální část (listopad 2021).
4. Měření (prosinec 2021).
5. Vyhodnocení (leden 2022).
6. Přínosy a doporučení (únor 2022).
7. Závěr (březen 2022).

Doporučený rozsah práce

50 stran

Klíčová slova

Termická úprava, teplota termické úpravy, fyzikálně-mechanické vlastnosti

Doporučené zdroje informací

- Gaff, M., Babiak, M., Vokatý, V., and Ruman, D. (2017). "Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region," *Composites Part B Engineering* 116(1), pp. 61-75. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.058
- Gaff, M., Gašparík, M., Babiak, M., and Vokatý, V. (2017). "Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region," *Composite Structures*, 163(1), pp. 410-422. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.05
- Gaff, M., Vokatý, V., Babiak, M., and Bal, B. (2016). "Coefficient of wood bendability as a function of selected factors," *Construction and Building Materials* 126, pp. 632-640. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085
- Islam, S., Hamdan, S., Rusop, M., and Rahman, R. (2013). "Thermal Stability and Decay Resistance Properties of Tropical Wood Polymer Nanocomposites (WPNC)," *Advanced Materials Research* 667, pp. 482-489. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.667.482
- Reinprecht, L., a Vidholdová, Z. (2008). "Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace," Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. ISBN 978-80-228-1920-6
- Yan, Y., Dong, Y, Li, J., Zhang, S., Xia, S., Shi, S.Q., and Cai, L. (2015). "Enhancement of mechanical and thermal properties of Poplar through the treatment of glyoxal-urea/nano-SiO₂," *RSC Advances* 5, pp. 54148-54155. DOI: 10.1039/C5RA07294H
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 23. 9. 2021

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 10. 04. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva" jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V dne

Podpis autora

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Adamu Sikorovi, Ph.D. za odborné vedení, nasměrování, dobré rady, a hlavně za trpělivost, kterou mi věnoval při vypracovávání této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem termické modifikace na fyzikální a mechanické vlastnosti u javoru klen (*Acer pseudoplatanus*). Modifikace byla provedena podle procesu označovaného jako ThermoWood. Vzorky byly modifikovány 3 různými teplotami, a to konkrétně při 160 °C, 180 °C a 210 °C po dobu 3 hodin. Na takto upravených zkušebních tělesech byla zjišťována pomocí spektrofotometru změna celkového barevného prostoru CIELAB. Pomocí Charpyho kladiva rázovou houževnatost, a nakonec byla zkoumána pevnost v ohybu při statickém trojbodové namáhání.

Po zpracování a analýze naměřených dat jsme zjistili, že teplota termické modifikace 160 °C měla pozitivní vliv na rázovou houževnatost a na pevnost v ohybu. U teplot 180 °C a 210 °C měla modifikace negativní dopad na výsledné hodnoty těchto mechanických vlastností. U změny barevného prostoru CIELAB došlo k výrazným změnám u všech modifikací. Z toho vyplývá, že termická modifikace má vliv na změnu fyzikálních a mechanických vlastností javoru klen (*Acer pseudoplatanus*).

Klíčová slova: modifikace dřeva, termická modifikace, thermowood, pevnost v ohybu, rázová houževnatost, změna barvy

Abstract

This thesis is concerned with the influence of thermal modification on the physical and mechanical properties of maple (*Acer pseudoplatanus*). The modification was performed according to a process called ThermoWood. The samples were modified with 3 different temperatures, namely at 160 ° C, 180 ° C and 210 ° C for 3 hours. The change in the total CIELAB color space was determined on a test specimen using the spectrophotometer. Using a Charpy hammer, impact toughness and finally were investigated the flexural strength under static three-point loading.

After processing and analyzing the measured data, we found that the temperature of the thermal modification of 160 ° C had a positive effect on the impact strength and flexural strength. At 180 ° C and 210 ° C, the modification had a negative impact on the resulting values of these mechanical properties. With the change of the CIELAB color space, there were significant changes in all modifications. It follows that thermal modification affects the physical and mechanical properties of maple (*Acer pseudoplatanus*).

Keywords: wood modification, thermal modification, thermowood, flexural strength, impact toughness, colour change

Obsah

Úvod	14
Cíl práce.....	15
Analýza literárních poznatků	16
1. Modifikace dřeva	16
1.1 Mechanická modifikace.....	16
1.2 Chemická modifikace	17
1.3 Biologická modifikace.....	17
1.4 Termická modifikace	17
2. Druhy termické modifikace	19
2.1 Charakteristika procesu „Retification“	19
2.2 Charakteristika procesu „Plato Wood“	19
2.3 Charakteristika procesu „OHT“	20
2.4 Charakteristika procesu „ThermoWood“	20
3. ThermoWood	20
3.1 Historie	21
3.2 Výroba	21
3.3 Příprava.....	22
3.4 Proces modifikace	23
4. Elementární složení dřeva a jeho strukturální hladiny.....	25
4.1 Chemické složení dřeva.....	25
4.1.1 Polysacharadický podíl	25
4.1.2 Polyfenolická část	26
4.1.3 Doprovodné složky dřeva	26
4.2 Stavba makroskopické struktury	27
4.3 Stavba mikroskopické struktury	28
4.4 Stavba submikroskopické struktury	28
4.4.1 Střední lamela	29
4.4.2 Primární stěna	29
4.4.3 Sekundární stěna	30
5. Chemické změny ve dřevě při termické modifikaci	31
6. Fyzikální vlastnosti dřeva	33
6.1 Rozdělení vody ve dřevě	33
6.2 Určení meze hygroskopicity	34
6.3 Bobtnání a sesychání	35
6.4 Vnitřní napětí při vysychání dřeva	36
6.5 Borcení dřeva.....	37

6.6 Barva.....	37
6.7 Hustota.....	38
7. Mechanické vlastnosti.....	39
7.1 Mechanické namáhání	39
7.2 Pevnost dřeva.....	39
7.3 Pevnost dřeva v ohybu.....	40
7.4 Rázová pevnost.....	42
8. Využití tepelně modifikovaného dřeva.....	43
8.1 Obecné využití.....	43
8.2 Termodřevo a jeho dopad na životní prostředí.....	46
Metodika	48
9. Výběr dřeva a příprava těles	48
9.1 Výběr dřeva	48
9.2 Příprava těles pro praktické zkoušky.....	48
10. Experimentální měření.....	49
10.1 Měření celkové změny barevného prostoru	49
10.2 Měření rázové houževnatosti.....	51
10.3 Měření pevnosti v ohybu	52
Výsledky a diskuse	53
11. Celková změna barevného prostoru.....	53
12. Rázová houževnatost	56
13. Pevnost v ohybu.....	58
Závěr	60
Seznam použité literatury	62

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 - Vývoj objemů výroby ThermoWoodu (Lahtela, 2021)	22
Obrázek č. 2 - Fáze tepelné modifikace ThermoWoodu (Lahtela, 2021).....	23
Obrázek č. 3 - Složení buněčné stěny (Hill, 2006)	29
Obrázek č. 4 - Ovlivnění jednotlivých vlastností termickou modifikací (Lahtela, 2021)	32
Obrázek č. 5 - Zatížení dřeva v ohybu (Gandelová, & Horáček, 2002)	41
Obrázek č. 6 – Rozložení napětí po výšce tělesa při ohybu (Gandelová, & Horáček, 2002)	41
Obrázek č. 7 - Využití ThermoWoodu pro terasovou podlahu v areálu hotelu v Turecku (Lahtela, 2021).....	44
Obrázek č. 8 - Obklad ThermoWoodem nákupního centra ve Španělsku (Lahtela, 2021)	44
Obrázek č. 9 - Kytarové krky z ThermoWoodu (www.momose-guitar.com, 31.3.2022)	45
Obrázek č. 10 - Spektrofotometr Konica Minolta CM – 700 d (www.anamet.cz, 28.3.2022)	49
Obrázek č. 11 - Barevný prostor CIELAB (www.kopina.cz, 28.3. 2022).....	50
Obrázek č. 12 - Instron - Stroj na měření rázové houževnatosti (www.instron.com, 28.3.2022)	51

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 - Mez hygroskopicity lokálních dřevin (Požgaj, 1997)	34
Tabulka č. 2 - Srovnání dopadů modifikací na životní prostředí.....	46
Tabulka č. 3 - Tabulka pro výpočet barevné změny	53
Tabulka č. 4 - Srovnání barevných změn modifikací oproti referenčnímu vzorku	53
Tabulka č. 5 - Rázová houževnatost	56
Tabulka č. 6 - Duncanův test rázová houževnatost	57
Tabulka č. 7 - Pevnost v ohybu.....	58
Tabulka č. 8 - Duncanův test - Pevnost v ohybu	59

Seznam grafů

Graf č. 1 - Vliv modifikací na životní prostředí (Hill a kol. ,2021).....	47
Graf č. 2 - Vliv termické modifikace na souřadnice a	54
Graf č. 3 - Vliv termické modifikace na změnu souřadnice b	54
Graf č. 4 - Vliv termické modifikace na celkovou změnu barvy ΔE	54
Graf č. 5 - Vliv termické modifikace na souřadnici L	54
Graf č. 6 - Vliv termické modifikace na rázovou houževnatost	57
Graf č. 7 - Vliv termické modifikace na ohybovou pevnost.....	59

Seznam zkratek

OHT – Oil heat treatments

MNBS – Mez nasycení buněčných stěn

MH – Mez hygrosopicity

Úvod

Dřevo je dnes vyhledáváno zejména kvůli vztahu k životnímu prostředí. Tento materiál produkuje málo emisí a je získáván z lesů, které jsou ve vyspělých zemích pěstovány dlouhodobě udržitelným systémem. Z hlediska vlastností má mnoho předností, lze zmínit jeho výborné pevnostní vlastnosti vzhledem k jeho nízké váze, jednoduchou obrobiteľnosť či jeho estetické vlastnosti. Dřevo má v dnešní době obrovskou výhodu oproti ostatním materiálům a to tím, že je obnovitelným zdrojem. Paradoxně je to i jeho nevýhodou, protože díky tomu je dřevo náchylnější na biodegradaci, a tak je třeba ho více chránit proti biotickým a abiotickým činitelům (Birschke, 2020). Jednou z možností, jak předejít biodegradaci a ochránit dřevo je modifikace dřeva.

Modifikací dřeva je více druhů například chemická, mechanická, biologická nebo termická (Reinprecht; Pánek, 2016). Právě termickou modifikací se zabývá tato práce, proto bude tato problematika její hlavní částí. Termická modifikace využívá působení teplot nejčastěji v rozmezí od 180 °C do 240 °C (Reinprecht; Pánek, 2016). Podle doby působení teploty a prostředí, kterému je dřevo vystaveno se termická modifikace dělí na několik procesů. Mezi ty nejznámější patří Proces „Retifikace“, „PLATOWOOD“, „OHT“ proces a „ThermoWood“ (Hill, 2006). V práci je nejvíce řešen proces označován jako ThermoWood, protože právě metodu použitou pro výrobu ThermoWoodu jsme použili k modifikaci našich vzorků.

ThermoWood vznikl ve Finsku v roce 1993 a postupně se zdokonaloval a zdokonaluje i dnes. Stále se provádí výzkumy pro určení podmínek modifikace i pro další dřeva ovšem to je poměrně nákladná záležitost (Botić a kol., 2021). Při tepelné modifikaci dojde díky působení teploty k různým chemickým reakcím, které obsahují degradaci hemicelulóz, změny ligninu a celulózy a výraznou změnu chemického složení z důvodu ztráty extraktivních látek. Tyto chemické změny mají poté vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti jako je hustota, hygroscopicita, barva, rozměrová stálost a pevnost a pružnost (Kondratyeva a kol., 2016)

Cíl práce

Cílem této práce je v první řadě shrnout literární poznatky fyzikálně mechanických vlastností tepelně upraveného dřeva. Zejména je zkoumán vliv stupně termické modifikace na vybrané vlastnosti.

Dále si práce klade za cíl experimentálně testovat vlastnosti dřeva javoru klen (*Acer pseudoplatanus*) modifikovaného při teplotách 160 °C, 180 °C, 210 °C a porovnat tyto vlastnosti s tepelně neupraveným dřevem. Mezi zkoumané vlastnosti patří celková změna barevného prostoru dle CIELAB, rázová houževnatost získaná pomocí Charpyho kladiva a pevnost v ohybu při statickém trojbodovém namáhání.

Analýza literárních poznatků

1. Modifikace dřeva

Definovat modifikaci dřeva můžeme jako proces použitý pro zlepšení fyzikálních, mechanických nebo estetických vlastností řeziva, dýh nebo dřevních kompozitů. Tyto vlastnosti mohou být upraveny fyzikálně, chemicky, impregnační anebo použitím tlaku na povrch dřeva (Panigrahi; Rout, 2020).

Tyto modifikace se dají rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní mají po dokončení modifikace změněnou původní chemickou podstatu. Naopak u pasivní modifikace se po změně vlastností nestane, že by se změnila chemická podstata dřeva (Hill, 2006).

Cílem modifikace je nejčastěji zlepšit negativní vlastnosti dřeva jako je malá rozměrová stálost, navlhavost, nízká odolnost proti houbám a termitům a také UV záření (Panigrahi; Rout, 2020).

Výhodou termické modifikace je její menší závadnost k životnímu prostředí, než je u chemické modifikace, proto je to momentálně nejvíce se rozvíjející druh ochrany dřeva. Modifikace dřeva se dá rozdělit na 4 kategorie. A to na mechanickou modifikaci, chemickou, termickou a biologickou. V této práci bude vzhledem ke zvolenému tématu kladen důraz hlavně na termickou modifikaci (Reinprecht; Pánek, 2016).

1.1 Mechanická modifikace

Cílem této modifikace je zvýšení hustoty dřeva pomocí plastifikace dřeva a jeho následném lisování v kovové formě. Plastifikace dřeva se provádí tak, že se zaměřuje na lignin, který je termoplastický, takže se dřevo ohřeje na teplotu sklovitého stavu (stav, kdy se deformují pouze valenční úhly nebo se mění vzdálenosti mezi molekulami a deformace jsou malé a vratné a řídí se Hookovým zákonem – nanoed.tul.cz), která je 170 °C. Tato teplota se dá snížit, pokud je použita hydrotermická úprava dřeva nebo jsou použity plastifikátory a změkčovadla jako je amoniak, močovina, dimethylsulfoxid a další. V momentě, kdy je dřevo takto plastifikováno, tak se může začít lisovat. Výsledkem je poté dřevo s vyšší hustotou, tvrdostí a také zlepšenou rázovou houževnatostí. Tento druh dřeva se používá více v interiérech, protože je náchylné na změny vlhkosti. Pokud dojde ke zvýšení vlhkosti dřeva, tak se dřevo začne vracet do své původní podoby.

Další nevýhodou tohoto typu modifikace je jeho nízká odolnost proti mikroorganismům. Prodejní názvy tohoto typu modifikace jsou například v Německu „Lignostone“ a v USA „Staypak“ nebo „Staybwood“. V Československu mělo názvy jako „Bukolis“ nebo „Lignamon“ (Reinprecht; Pánek 2016) (Khademibami; Bobadilha, 2022).

1.2 Chemická modifikace

Je založená na účincích chemických látek, které nemají přímý biocidní nebo jiný ochranný účinek. Funguje to tak, že použité chemické látky buď zůstávají jen v lumenech buněk jako je tomu u akrylátů, fenolplastových a aminoplastových pryskyřic nebo u vinylových polymerů. Anebo proniknou až do buněčných stěn, kde mohou reagovat s jednotlivými komponenty dřeva. Převážně se jedná o reakci – OH skupin celulózy, hemicelulóz a ligninu s anhydridy, karboxylovými kyselinami, epoxidy, nitrily a dalšími. Výsledkem vznikne dřevo, které je více odolné vůči UV záření, vodě a biologickým škůdcům (Reinprecht; Pánek, 2016).

1.3 Biologická modifikace

Funguje na principu nepřátelského vztahu mezi dřevokazným škůdcem a biologickým činitelem. Kdy je dřevo „obsazeno“ biologickým činitelem a při jeho pobytu dřevo nevykazuje žádné nebo jen minimální známky poškození a tím se zde nedaří „zabydlet“ dřevokazným škůdcům, což zabraňuje potenciálnímu poškození.

Do této skupiny modifikací patří také enzymatické modifikace, při kterých se pomocí oxidačně a oxidačně-redukčních enzymů snižuje podíl -OH fenolických skupin ligninu (Reinprecht; Pánek, 2016).

S použitím biologické modifikace se dá zvýšit hloubka impregnace méně propustných dřevin jako je například suché smrkové dřevo (Pánek; Reinprecht, 2008).

1.4 Termická modifikace

Je technologický proces, který využívá zvýšené teploty pro úpravu struktury dřeva s cílem zlepšení odolnosti upravovaného dřeva. Samotná termická modifikace je proces, při kterém působí na dřevo regulovaně vysoké teploty. Vliv na konečné vlastnosti produktu má, jak prostředí, ve kterém se sortiment nachází, tak i interval při kterém je vystavený určité teplotě a pak i samotná výše teploty. Vstupní surovina a její vlhkost má také poměrně zásadní vliv.

Dřevo se stává rozměrově stabilnější už při teplotě 110 °C, ovšem běžné teploty modifikace se pohybují v rozmezí 180 až 280 °C a v časové délce od 15 minut po 24 hodin. Z hlediska prostředí záleží, jestli se jedná o hydrotermickou úpravu, modifikaci v inertní atmosféře nebo v oxidační atmosféře. U hydrotermické úpravy jde o spolupůsobení vody se vzduchem, u inertního prostředí se jedná o to, že se redukuje přítomnost kyslíku a u oxidačního prostředí je naopak přítomnost vzduchu v plné míře.

Při vyšších teplotách dochází k výraznější změně vlastností. Toto se děje hlavně díky vzniku nových chemických vazeb v lignino-sacharidickém podílu dřeva a také částečnému odbourání ligninu a hemicelulóz za vzniku vody, oxidu uhličitého, kyseliny mravenčí, octové, furaldehydu a dalších látek, které se zapojují do kondenzačních reakcí. Díky těmto dějům vznikají substance, které jsou více odolné vůči vodě a degradaci dřeva (Reinprecht; Pánek, 2016).

Postupné vylepšování a výzkum metod termické modifikace dřeva rozšiřuje použití tohoto dřeva i do jiných odvětví. Tepelně modifikované dřevo má mnoho výhod, co se týče fyzikálních a chemických vlastností. Po správně provedené termické modifikaci musí dojít ke změně barvy dřeva, zvýšení odolnosti vůči vodě, snížení rovnovážné vlhkosti a snížení hustoty. Dalšími ovlivněnými vlastnostmi jsou pružnost a pevnost dřeva, ale také rozměrová stálost. Tato vlastnost zvyšuje jeho využití ve stavebním průmyslu. Z pohledu ochrany dřeva můžeme zmínit výrazně zvýšenou odolnost proti degradaci a proti biologickým činitelům jako je hmyz nebo houby. Jak moc velká bude změna chemické struktury záleží na teplotním režimu a také na prostředí, kterému je dřevo vystaveno. Tyto chemické reakce obsahují degradaci hemicelulóz, změny ligninu a celulózy a výraznou změnu chemického složení z důvodu ztráty extraktivních látek (Kondratyeva a kol., 2016).

2. Druhy termické modifikace

2.1 Charakteristika procesu „Retification“

Proces „Retification“ vznikl ve Francii na univerzitě Mines v Saint Etienne. Je to proces, ve kterém je dřevo při vstupu do sušárny předsušeno na 12% vlhkost. Při modifikaci je použita bezkyslíkatá atmosféra (méně jak 2 % kyslíku), jako plyn se používá dusík. Teploty se pohybují v rozmezí od 180 °C do 250°C. (Hill, 2006). Maximální teplota ovlivňuje výslednou odolnost vůči degradaci dřeva a mechanickou pevnost. Čím je teplota vyšší, tím je dřevo odolnější vůči degradaci, ale sníží se jeho mechanické vlastnosti. Studie uvádějí až 40 % ztráty pevnosti v ohybu, ale rovnovážná vlhkost se pohybuje v rozmezí 4-5 %. Výsledné vlastnosti jsou závislé na druhu dřeva, procesní teplotě, celkové době procesu a přesnosti procesu. Přesností procesu myslíme udržení správné teploty, protože při tomto procesu je dřevo náchylné i na drobné změny teplot a tak se musí teplota po čas celého procesu sledovat (Rapp, 2001).

2.2 Charakteristika procesu „Plato Wood“

Plato Wood (Proving Lasting Advanced Timber Option) je původem z Holandska a byl odvozen od technologie vyvíjený společností Royal Dutch Shell, což je firma, která prodává pohonné hmoty. Tato firma zaměřila výzkum na hydrotermální konverzi biomasy do kapalných paliv. PLATO modifikace má 4 fáze. Hydrotermolýzu, sušení, ošetřování, chlazení. Vstupní surovina je dřevo s 20 % vlhkostí. Hydrotermolýza je úvodní procedura při níž je vzduch s párou v sušárně ohřátý na teplotu, která se pohybuje mezi 150 °C a 180 °C. Tlak je 6-8 baru a celá tato část trvá okolo 4 až 5 hodin. Při této části procesu se nemění vlhkost a ani nijak neovlivňuje celulózu. Dochází k degradaci hemicelulózy a aktivaci ligninu.

Další fází je sušení jedná se o nejdélejší část procesu a trvá 5 dnů až 3 týdny. Cílem této fáze je snížit vlhkost (na 8-10 %) pro další fázi. Tou je ošetřovací fáze, kdy je dřevo vystaveno suchým podmínkám a teplotě 150 °C až 190 °C. Časově tato fáze vychází na něco mezi 12 a 16 hodinami. Výsledkem této fáze je reakce mezi degradovanou celulózu a aktivovaným ligninem, kdy vznikne zesíťování. Po tomto procesu má dřevo 1% vlhkost.

Poslední částí je chlazení, při kterém se dřevo postupně zchladí a zvýší se vlhkost dřeva na požadovaných 4-6 %. Tento proces zabere 3 dny (Hill, 2006).

2.3 Charakteristika procesu „OHT“

„OHT“ proces prošel značným vývojem a zkoumáním. Jeho princip vychází z procesu Royal, kdy je dřevo také ponořeno do rostlinných olejů. Důležitý rozdíl, který od sebe odlišuje obě tyto modifikace je teplota v olejové lázni, která se pohybuje u Royal od 60-90 °C, což je moc nízká teplota pro jakoukoliv chemickou změnu struktury dřeva. U „OHT“, aby proběhla požadovaná změna struktury, musí mít olej v lázni teplotu, pohybující se v rozmezí od 180-220 °C. Při jednom pokusu bylo dřevo se vstupní vlhkostí 6 % ponořeno do lázně rafinovaného lněného oleje. Proces samotné modifikace trval 4,5 hodiny. Je zajímavé, že při modifikaci se do dřeva olej nevsákl, ale vsákl se až při procesu ochlazování. Po celém procesu je dřevo suché na povrchu, takže nemá žádné stopy po mastnotě oleje, zmenšil se objem, ale zvýšila se hustota o 50 až 70 %. V porovnání s procesy modifikací se vzduchem má o něco větší modul pružnosti a veliký rozdíl je v odolnosti vůči degradaci dřeva, kterou má o dost lepší právě dřevo upravené v olejovém prostředí. Oba procesy se porovnávaly při stejné teplotě i intervalu po který bylo dřevo teplotě vystaveno. Oproti nemodifikovanému dřevu má o poznání menší rázovou pevnost (Hill, 2006).

2.4 Charakteristika procesu „ThermoWood“

ThermoWood je druh termické modifikace, při které se modifikuje dřevo pomocí tepla a vody v plynném skupenství a nepřidávají se žádné chemikálie. Tudiž jde o proces, který nezatěžuje životní prostředí. Celý proces je vyvinutý a patentovaný výzkumným centrem VTT ve Finsku (Hill, 2006).

Všechny vstupní materiály jsou z certifikovaných zdrojů. Modifikace obsahuje 3 fáze, vysokoteplotní sušení, samotnou modifikaci a následné chlazení. Tento proces má za následek trvalé změny v chemické struktuře a ty zapříčiňují změnu fyzikálně-mechanických vlastností.

ThermoWood se dělá ve dvou verzích Thermo-S (S-Stability) a Thermo-D (D-durability). Tyto 2 provedení se liší například v barvě, odolnosti vůči degradaci nebo také odlišným obsahem pryskyřice (Lahtela, 2021).

3. ThermoWood

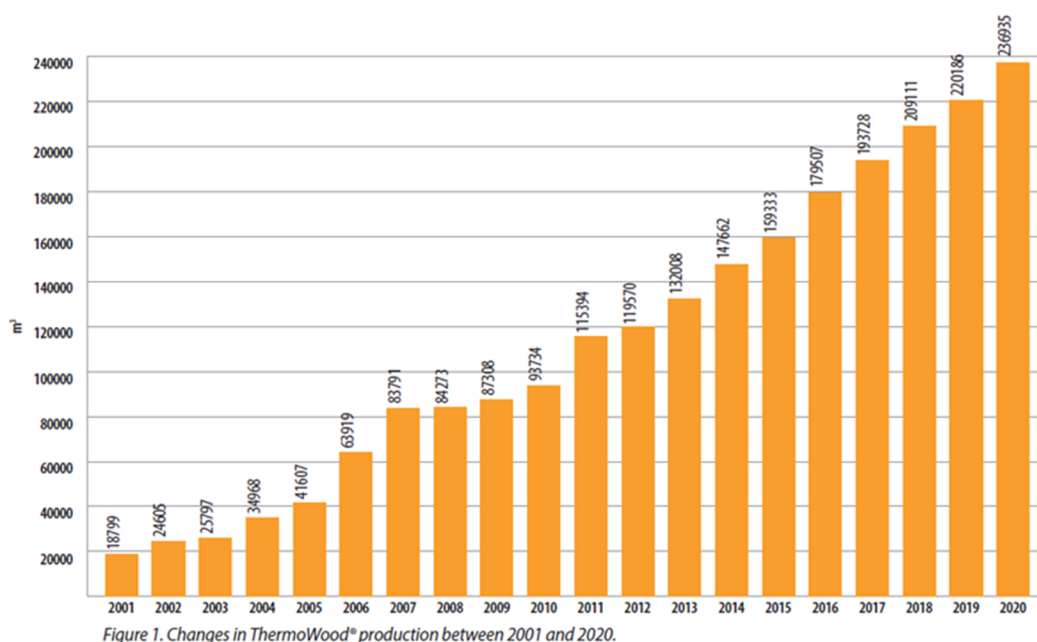
3.1 Historie

První zmínky o tepelné úpravě dřeva datujeme už v dobách vikingů, to znamená v období mezi 8. a 11. stoletím. Vikingové opalovali konce planěk plotu, protože zjistili, že tímto způsobem jsou plaňky odolnější vůči degradaci způsobené venkovními vlivy (Lahtela, 2021). Pokud se ovšem budeme bavit o laboratorním testování tepelně modifikovaného dřeva, tak je třeba se přesunout do 20. století. V roce 1915 Tiemann uskutečnil pokusy, kdy nechal dřevo ve vodní páře, která byla ohřátá na 150°C. Dřevo bylo v páře po dobu 4 hodin. To zapříčinilo relativně malé změny mechanických vlastností, nasákavost se snížila o 10-25 %. Tiemann se tak díky tomuto výzkumu stal prvním, kdo laboratorně zkoumal tepelně modifikované dřevo. A položil tak základ dalším vědcům. V tuto dobu byl i díky těmto objevům v Německu a USA velmi silný základ proto, aby se začalo tepelně modifikované dřevo používat i v průmyslu. Nicméně to se Němcům nepovedlo a v 90. letech minulého století se ve Finsku na VTT podařilo udělat ucelený proces tepelné modifikace dřeva. Tím dali impuls i ostatním vědcům v jiných státech, a tak ve Francii vznikl „OHT“ proces v Německu „Lignofol“ a v Holandsku „Platowood“ (Hill, 2006).

3.2 Výroba

Od roku 1993 se začal proces výroby ThermoWoodu zdokonalovat tak, aby bylo možné ho začít průmyslově vyrábět. První velkou vlnou ve výrobě byl rok 2001, kdy se asociaci podařilo vyrobit 18 799 m³ (viz Obrázek č.1). Od té doby se kapacita výroby strmě zvětšovala a v roce 2020 dosáhla 236 935 m³. Do budoucna můžeme očekávat obdobný průběh, protože samotná výroba ThermoWoodu je naprosto ekologická, neboť se používá pouze horký vzduch, pára a voda.

Proto má oproti ostatním termickým modifikacím ThermoWood obrovský potenciál, protože u „OHT“ procesu se používá olej, u procesu „Retification“ se využívá dusík. A je to vidět i na expanzi do jiných zemí produkt se postupně rozšířil z Finska do zemí jako je například Švédsko, Polsko, Portugalsko, Belgie, Turecko, Japonsko Írán nebo Kanada. V těchto zemích je ThermoWood vyráběn stejně jako ve Finsku, ale produkty jsou označeny jako ThermoWood product, to znamená, že nejsou použité materiály z Finska, ale je použita metoda výroby podle metodiky VTT. Výroba je kontrolována ThermoWood asociací, aby byla zaručena kvalita produktu (Lahtela, 2021).



Obrázek č. 1 - Vývoj objemů výroby ThermoWoodu (Lahtela, 2021)

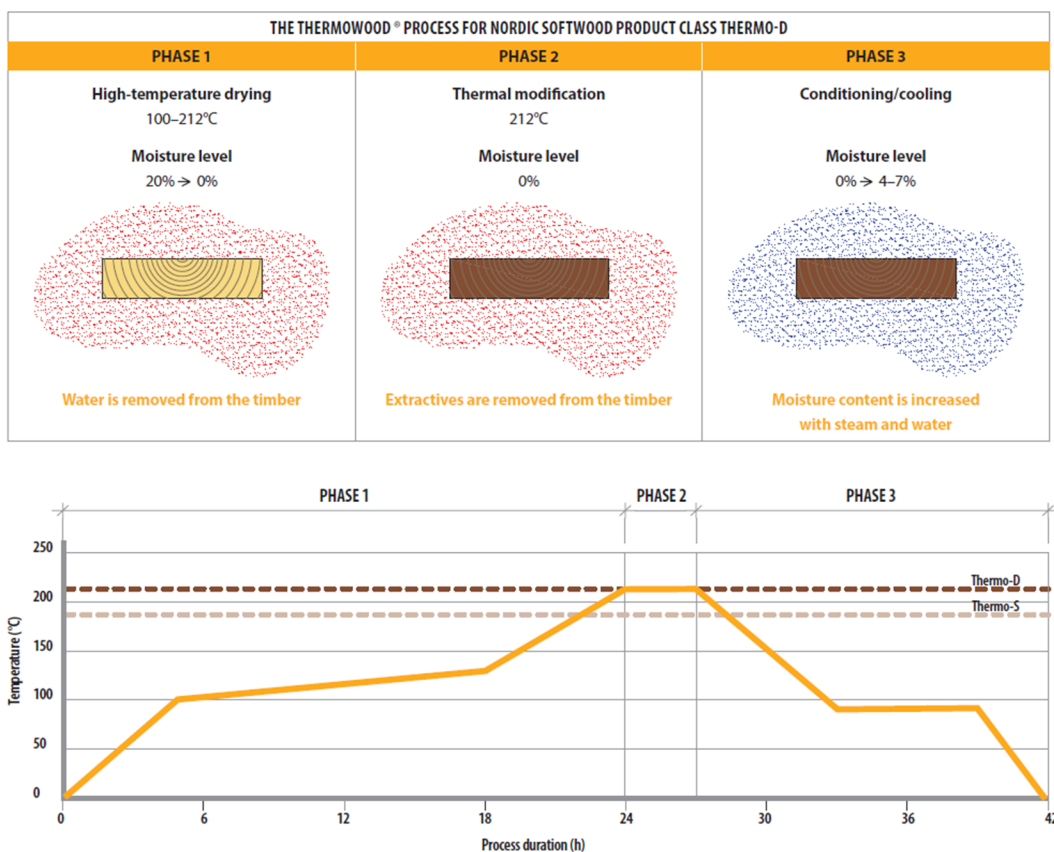
3.3 Příprava

Pro výrobu ThermoWoodu je naprosto zásadní výběr vhodného materiálu. Po výzkumech jsou zatím určeny jako vhodné jen některé dřeviny. Mezi tyto dřeviny můžeme zařadit Borovici lesní (*Pinus sylvestris*), Borovici montereyskou (*Pinus radiata*), Smrk ztepilý (*Picea abies*), Břízu bělokorou (*Betula pendula*), Topol osika (*Populus Tremula*), Jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*), Trojobalec tvrdodřevý – Obeche (*Triplochiton scleroxylon*), Africký vrcholák – Limba (*Terminalia superba*). Všechny jsou původem ze severních regionů ať už je to Evropa nebo Amerika. Kromě Borovice monteyerské, která je původem z Chile nebo Nového Zélandu. A dvou afrických zástupců a tím je Limba s Obeche.

Dřevěný sortiment je připravován do hrání, které jsou na vozíku, aby bylo dosaženo co nejjednodušší manipulace. Sortimenty mají v jedné hráni stejnou tloušťku i šířku. Sortimenty z jehličnatých dřevin se dělají ve větších tloušťkách a to od 25 mm do 50 mm. U listnatých je tloušťka od 19 mm do 32 mm. Délka prken je od 2,7 do 5,7 metrů u jehličnanů a 1,8 až 4,2 metru pro listnaté dřevo (Lahtela, 2021).

3.4 Proces modifikace

Samotný proces modifikace je rozdělen na tři fáze (Obrázek č.2). V první fázi se nejprve surové dříví vysouší na 0% vlhkost, takže je ze dřeva vlastně sušina. Poté nastává druhá fáze, to je samotná modifikace, tady hodně záleží na teplotě a době, které je dřevo vystaveno. Poslední fáze je ochlazování. V této fázi je důležité, aby se dřevo postupně ochlazovalo a zvlhčovalo, aby nedošlo k prasklinám (Lahtela, 2021).



Obrázek č. 2 - Fáze tepelné modifikace ThermoWoodu (Lahtela, 2021)

První fáze (popis Thermo-D)

První fáze je nejdelší ze všech tří fází. Nejprve jsou hráně plné surového dříví umístěny do sušárny. V sušárně se nejdříve vzduch nechá ohřát až na 100°C. Postupně začne klesat vlhkost ve dřevě a když se začne přibližovat nule, tak se teplota zvyšuje na bod, kdy dochází k přechodu do druhé fáze – modifikace.

Druhá fáze

Při druhé fázi je dřevo vystaveno konstantní teplotě po určitou dobu. Dle Obrázku č. 2 je dřevo vystaveno 210 °C po dobu 3 hodin. Při této fázi dochází k chemickým změnám jak v krystalické, tak amorfnní části celulózy a dochází k vyplavení extraktiv. Při tomto procesu má dřevo stále nulovou vlhkost.

Třetí fáze

Třetí fáze nastává v momentě, kdy uplyne doba potřebná k modifikaci. Po uplynutí této doby nastává chlazení a sycení vlhkostí. Tento proces je nutné udělat plynule, aby ve dřevě nedocházelo k prasklinám nebo vypadávání suků (Lahtela, 2021).

4. Elementární složení dřeva a jeho strukturální hladiny

4.1 Chemické složení dřeva

Dřevo tvoří složitý komplex látek, kdy hlavní zastoupení mají přírodní polymery – celulóza, hemicelulózy a lignin. Tyto tři složky jsou hlavními složkami dřeva. Z celkového komplexu látek mají 90–97 % zastoupení. Hlavní složky dřeva se dělí na dvě části. První částí je tzv. polysacharidický podíl, který je tvořen celulózou a hemicelulózami. Druhá část se nazývá polyfenolický podíl a je tvořen samotným ligninem. Poměr mezi oběma částmi je 70:30 ve prospěch polysacharidického podílu. Zbýlých 3-10 % dřevního komplexu jsou různé organické a anorganické látky, které nesou souhrnné označení doprovodné složky dřeva. Jednotlivé procentuální zastoupení je individuální a záleží na druhu dřeviny i části stromu odkud je daný kus vymanipulován (Gandelová; Horáček, 2002).

4.1.1 Polysacharidický podíl

Celulóza

Celulóza je polysacharid se stavební funkcí, proto tvoří velkou část buněčných stěn rostlinných buněk. Ve dřevě staví kostru zdřevnatělých buněčných stěn anatomických elementů dřeva. Samotná celulóza je dlouhý řetězec makromolekul spojený 1-4 glykosidovými vazbami. U dřeva je rozptýl polymerizačního stupně zhruba od 5000 až po 10 000. Pásky vláknité makromolekuly celulózy mohou pomocí vodíkových můstků vytvořit nadmolekulovou strukturu celulózy, které se nazývají fibrily.

Celulóza se dělí na dvě části krystalickou a amorfní. U krystalické části jsou vodíkové vazby mezi makromolekulami rozloženy v pravidelném uspořádání, takže utváří prostorovou mřížku, která je podobná krystalické mřížce, proto se tato část nazývá krystalická. Druhou částí je amorfní podíl celulózy a nemá pravidelné uspořádání. Podíl krystalické a amorfní části je okolo 70:30. Krystalické části se střídají s amorfními. Krystalický díl je nereaktivní a tepelně stabilní. Podle všeho by měla být krystalická část spojena s jádrem mikrofibrily a vnější část mikrofibrily by měla pokrývat amorfní část. Nadmolekulová struktura celulózy je příčinou anizotropie dřeva a také má výrazný vliv na absorpci vody do dřeva. Molekuly vody se absorbují na volné OH skupiny v amorfní části celulózy, proto podíl krystalické a amorfní části má zásadní vliv především na fyzikální vlastnosti, protože silně ovlivňuje bobtnání a sesychání dřeva (Gandelová; Horáček, 2002) (Hill, 2006).

Hemicelulózy

Jsou ostatní polysacharidy, které se ve dřevě nachází. Mají nižší polymerizační stupeň okolo 100 až 200) a celkově mají odlišné složení od celulózy. Mají nízký podíl krystalické části, protože je to lineární řetězec s krátkými postranními řetězci, ale mohou tvořit i krystalické jednotky. Již dříve byly identifikovány mikrofibrily tvořené z hemicelulóz (Hill, 2006). Hemicelulózy tvoří spojovací vrstvu mezi ligninem a celulózou. Hemicelulózy výrazně ovlivňují chemické a fyzikální vlastnosti dřeva. Její vliv se nejvíce projevuje při procesech lisování, vaření, paření anebo sušení dřeva. Podíl hemicelulóz je větší u listnáčů než u jehličnanů (Gandelová; Horáček, 2002) (Požgaj, 1997).

4.1.2 Polyfenolická část

Polyfenolickou část tvoří lignin, což je makromolekulární polydisperzní látka aromatické povahy. Detailní chemická struktura ligninu nebyla dosud přesně definována. Lignin má u každé dřeviny trochu jiné složení, takže se těžko definuje jeho přesná chemická konfigurace. Lignin je termoplastická amorfní látka a hydrofobní látka, která impregnuje polysacharidy buněčné stěny, se kterými je spojen hemicelulózami. Nicméně jeho hlavní funkcí je zajišťovat pevnost dřeva, to je umožněno díky jeho struktuře, kdy jsou jeho makromolekuly rozmístěny trojrozměrně, a tak mohou vyplňovat prostory mezi fibrilami v buněčné stěně. Vzhledem k tomu, že to je amorfní látka, tak také snadněji podléhá vlivu kyselin a zásad. Procentuální zastoupení ligninu ve dřevě je v rozmezí 15–35 % u listnatých dřevin a 25–35 % u jehličnatých dřevin. Jeho podíl je největší v kůře a také záleží v jaké části stromu se nacházíme (Gandelová; Horáček, 2002).

4.1.3 Doprovodné složky dřeva

Jsou to složky, které se nacházejí v buněčných stěnách, mezibuněčných prostorech a také je můžeme najít v lumenech anatomických elementů. Jsou to látky různého chemického charakteru. Tyto látky mají vliv na spoustu vlastností dřeva, ať už je to barva, vůně, ale také na fyzikální a mechanické vlastnosti. Z hlediska opracování a dalších úprav tyto látky ovlivňují impregnaci, povrchovou úpravu, sušení a další. Pokud se látka ze dřeva dá extrahovat pouze vodou nebo organickými rozpouštědly nazýváme ji extraktivy. Pokud se dají extrahovat ze dřeva pouze spalováním bavíme se o tzv. anorganických látkách. Z hlediska podílu v dřevním komplexu se u našich dřevin nevyskytuje více jak 5 % extraktiv a 0,5-1 % anorganických látek. Opět závisí na druhu dřeva, stanovišti, části stromu, ale také na ročním

období. U tropického dřeva je podíl extraktiv i anorganický látek vyšší a to až 30 % dřevního komplexu pro extraktiva a až 5 % anorganický látek (Gandelová; Horáček, 2002).

4.2 Stavba makroskopické struktury

Nejprve bychom si měli rozlišit z čeho se skládá celý strom. Strom se skládá z koruny, kmene a kořenů. Pro dřevařství má největší význam kmen. Jednotlivými částmi kmene jsou postupně směrem od středu k obvodu dřev, dřev, kambium a kůra. Makroskopická struktura se skládá ze souboru znaků viditelných pouhým okem a je odrazem mikroskopických znaků. Tyto znaky jsou v podélné nebo příčné ose kmene a dohromady vytvářejí specifickou strukturu. Podle této struktury jsme schopni od sebe rozeznávat různé druhy dřevin. Pro lepší identifikaci a orientaci lze kmen rozdělit na 3 roviny řezu – příčný, radiální a tangenciální. Na příčném řezu, který je veden kolmo na podélnou osu kmene bychom našli letokruhy, dřev a jádro s bělí a dřevové paprsky. Radiální řez je podélný řez, prochází středem kmene a je vedený rovnoběžně s osou kmene. Na radiálním řezu se vyskytují letokruhy, které jsou tvořeny rovnoběžnými pásy. U některých dřevin vytvářejí dřevové paprsky tzv. zrcátka, což jsou lesklé plochy s různým tvarem

a vyskytují se hlavně u buku nebo dubu. Tangenciální řez je v podstatě stejný jako radiální, ale už není veden středem kmene, ale s libovolnou vzdáleností od středu kmene. Letokruhy tu mají parabolický tvar a na okraji průřezu je jejich průběh rovnoběžný. Dřevové paprsky se na tomto řezu vykreslí jako malé svislé čárky. Existují ještě další znaky, podle kterých rozlišujeme jednotlivé dřeviny, a to jsou například pryskyřičné kanálky, specifická šířka letokruhu, přítomnost jádra, běle a další. U listnatých dřevin rozlišujeme, jestli se jedná o kruhovitě pórovitou nebo roztroušeně pórovitou dřevinu, přítomnost jádra, dřevové paprsky a jiné (Gandelová; Šlezingerová, 2014).

4.3 Stavba mikroskopické struktury

Dřevo je tvořeno 3 typy buněk, které jsou rozděleny podle svých funkcí. Jedná se o parenchymatické, sklerenchymatické a vodivé buněčné elementy. Parenchymatické buňky mají vyživovací funkci, sklerenchymatické plní mechanickou funkci a vodivé buněčné elementy plní zásobní funkci. Specifické složení těchto typů buněk ze dřeva rozlišuje dřevo na listnaté a jehličnaté.

Stavba jehličnatého dřeva

Zástupci jehličnatých dřevin mají jednodušší stavbu, protože jsou vývojově starší než listnaté dřeviny. Jejich stavba je jednoduchá, pravidelná a je složena pouze z tracheid (cévic) a parenchymatických buněk. Jehličnaté dřevo je z 88-95 % tvořeno tracheidami, které se dělí na jarní a letní. Jarní vznikají na začátku vegetačního období a mají vodivou funkci. Letní tracheidy se začnou tvořit v druhé půlce vegetačního období a mají funkci mechanickou. Parenchymatické buňky vytvářejí dřeňové paprsky nebo axiální (podélný) parenchym a také se z nich tvoří pryskyřičné kanálky.

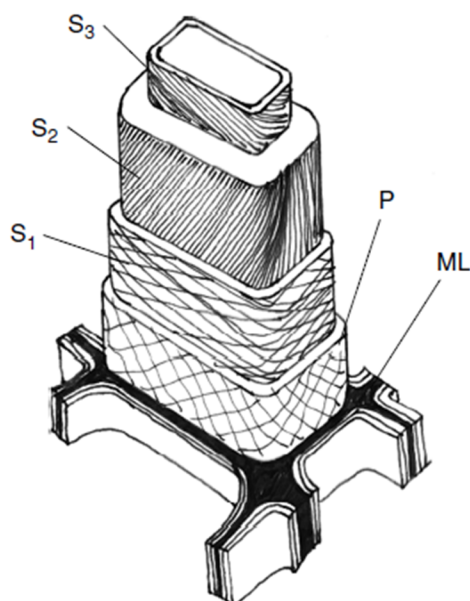
Stavba listnatého dřeva

Listnaté dřeviny mají složitější stavbu než jehličnaté dřeviny. Díky fylogenetickému vývoji jsou jednotlivé anatomické elementy přizpůsobeny svým tvarem a velikostí své funkci. To znamená, že listnaté dřevo tvoří více typů buněk. Těmito buňkami jsou cévy (tracheje), cévice (tracheidy), parenchymatické buňky a libriformní vlákna (Gandelová; Šlezingerová, 2014).

4.4 Stavba submikroskopické struktury

Složení vrstev stěny buňky

Stěna buněčné stěny se skládá z několika vrstev, přičemž se tyto vrstvy od sebe odlišují jak chemickou strukturou, tak i svým chemickým složením. Jednotlivými vrstvami jsou SL – střední lamela, P – primární stěna a S1, S2, S3 jsou vrstvy sekundární stěny (Obrázek č.3). Někdy se používá termín složená střední lamela. Je to lamela, která se skládá ze střední lamely jedné buňky a 2 primárních stěn sousedních buněk, kdy se střední lamela nachází uprostřed těchto 2 primárních stěn (P+SL+P) (Hill, 2006).



Obrázek č. 3 - Složení buněčné stěny (Hill, 2006)

4.4.1 Střední lamela

Střední lamela je tvořena ze 70 % ligninem. Tento lignin je svým složením odlišný od ligninu nacházejícího se v buněčné stěně, a to jak svou morfologickou strukturou, chemickou stavbou a také má lignin ve střední lamelle vyšší polymerizační stupeň. V radiálním směru je střední lamela více lignifikována a je tlustší než v tangenciálním směru, to zaručuje větší mechanickou pevnost v radiálním směru (Hill, 2006).

4.4.2 Primární stěna

Primární stěnu je velmi těžké rozlišit od střední lamely, protože si sice nejsou podobné strukturou, ale po chemické stránce jsou skoro stejné. Proto jak už bylo zmíněno výše se někdy uvádí jako složená střední lamela. Při růstu primární stěny je stěna tvořená převážně z pektinů, hemicelulózy a sítě fibril celulózy. Kvůli orientaci fibril rozlišujeme vnější primární stěnu a vnitřní primární stěnu. U vnější primární stěny je rozptýlená struktura fibril s velkým odklonem od podélné osy buněk. Vnitřní část má odklon fibril od podélné osy buněk od 0° do 90°. Oproti celulóze v sekundární stěně má celulóza primární stěny nižší polymerizační stupeň a také větší podíl amorfni části. V momentě, kdy skončí růst buněk, se do prostorů mezi fibrilami začne ukládat lignin. Lignifikace primární stěny je intenzivní a obsah ligninu se udává okolo 70 % (Hill, 2006).

4.4.3 Sekundární stěna

Sekundární stěna udává tvar buňky a nachází se na vnitřní straně primární stěny. Tato vrstva má výrazný vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti vlákna. Má tři základní vrstvy – S1, S2 a S3 (vnější, střední, vnitřní). Všechny vrstvy jsou od sebe velmi odlišné. V některých případech, jako je reakční dříví, je možné, že bude počet vrstev odlišný. V obecném případě se podíl tloušťky jednotlivých vrstev udává 10:80:10. Střední vrstva má tedy největší podíl tloušťky.

Vnější vrstva S1 se chemickou strukturou nejvíce podobá primární stěně, ale oproti ní už obsahuje více celulózy a méně ligninu a uspořádání celulózy je také větší. Orientace fibril je taková, že jsou dvě navzájem kolmé uskupení s odklonem od osy buněk od 45° do 80°. Střední vrstva (S2) obsahuje nejvyšší množství celulózy, následují hemicelulózy a podíl ligninu je různý od 5 do 20 %. Tím, že střední vrstva zaujímá nejvíce z celkového objemu střední vrstvy, tak je také nejdůležitější. Fibrily celulózy jsou hustě uložené v pravotočivých spirálách, obvykle svírají úhel 5° až 15° od podélné osy buněk. Ve výjimečných případech se může stát, že je tento úhel větší a to až 30°. Fibrily mají uspořádání do lamelovité struktury a v každé lamelle může být odklon fibril rozdílný. Jednotlivé lamely jsou vlastně denní přírůsty sekundární stěny.

Vzhledem k tomu, že obecně směrem od střední lamely ke střední vrstvě postupně ubývá lignin, tak se vnitřní vrstva (S3) skládá převážně z celulózy a hemicelulóz. Odklon fibril od podélné osy buněk je velmi malý.

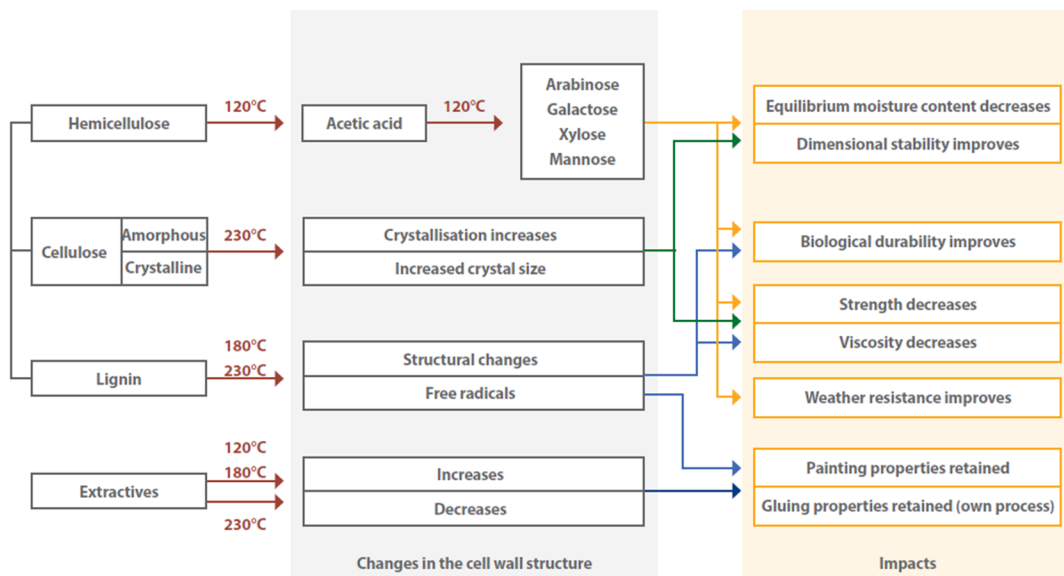
Ze zbytků zaschlé cytoplazmy se vytvořila bradavičnatá vrstva pojmenovaná jako S4 nebo W vrstva, která vystýlá lumeny cév, tracheid, vláken nebo vnitřní povrch ztenčení. Tato vrstva má velký vliv na fyzikální vlastnosti jako je sorpce, propustnost, difúze apod. (Gandelová; Horáček, 2002), (Požgaj, 1997).

5. Chemické změny ve dřevě při termické modifikaci

Tématu změn chemické struktury dřeva, které jsou vyvolány termickou modifikací, se věnovalo za posledních 20 let mnoho studií. Všechny uvádějí, že tepelná odolnost různých dřevních stavebních součástí se velmi různí. Mezi hlavní stavební součásti dřeva můžeme zařadit celulózu, hemicelulózy a lignin. Termická modifikace má jen malý efekt na celulózu. Celulóza se dělí na dvě části amorfnní a krystalickou. V případě působení vyšší teploty se sníží podíl amorfnní části a krystalická část zůstává nezměněná. Oproti celulóze jsou hemicelulózy hodně nestabilní. Hemicelulózy jsou také mezi různými druhy dřevin velmi odlišné. Velký rozdíl je mezi jehličnany a listnatými druhy. Tvrdé dřeviny (listnaté) mají větší množství pentózy, měkké (jehličnaté) obsahují více hexózy. Výsledky ukazují, že hemicelulózy tvrdého dřeva jsou méně tepelně stabilní než hemicelulózy z měkkého dřeva, což má za následek snazší degradaci na jednodušší sloučeniny, které se poté snadno extrahují. První chemické změny u hemicelulóz se začínají dít už při nízkých teplotách. Degradace hemicelulóz začínají deacetylací, kdy uvolněná kyselina octová působí jako depolymerizační katalyzátor, který dále zvyšuje degradaci polysacharidů, což vede ke vzniku formaldehydu, furfuralu a dalších aldehydů a alkoholů. Poslední hlavní složkou je lignin. Lignin je pojivem mezi celulózou a hemicelulózami. Lignin je ze stavebních složek dřeva nejvíce tepelně odolný. U ligninu velmi záleží, jestli pochází z listnatého nebo jehličnatého dřeva, protože se liší jak jeho vlastnosti, tak i jeho chemická struktura. Extraktivní látky, které jsou méně těkavé, jako jsou vosky, tuky a mastné kyseliny, migrují na povrch tepelně upraveného dřeva a to vede k celkové změně povrchu dřeva, což je například změna barvy nebo schopnost absorbovat vodu. Tento děj probíhá v teplotách od 100 do 160 °C. Při teplotách nad 180 °C se extraktiva zcela odplaví i z povrchu dřeva. Mezi tvrdým a měkkým dřevem je velký rozdíl v úbytku hmotnosti. U dubu je to okolo 5 % naopak u smrku je to až 15 %. Přitom se nejedná jen o odpaření vody, protože se celková hmotnost mění i nad rámec hmotnosti odpařené vody. To znamená, že se úbytek hmotnosti projevil rozkladem makromolekulárních složek dřeva na jednodušší sloučeniny, které se odplavily. V tomto ohledu by se mělo nejvíce jednat o hemicelulózy, které jsou nejméně odolné vůči teple. Ve výsledcích výzkumů bylo dokázáno, že se chemické změny začínají dít i při poměrně nízké teplotě a to 125 °C. S narůstající teplotou dochází k složitějším chemickým reakcím. Důležitá je také přítomnost vodní páry, která má významnou roli v přenosu tepla do všech struktur dřeva.

Celkově je nutné kvůli odlišným strukturám dřeva u každé termické modifikace zohlednit druh dřeva a nastavit parametry modifikace, tak aby byla účinná a zdařilá. Výzkum správné metody a podmínek u nových druhů je velice nákladná záležitost (Botić a kol., 2021).

Na následujícím Obrázku č.4 je vidět při jakých teplotách jednotlivé složky začínají reagovat a jak jejich reakce ovlivní výsledné vlastnosti (Lahtela, 2021).



Obrázek č. 4 - Ovlivnění jednotlivých vlastností termickou modifikací (Lahtela, 2021)

6. Fyzikální vlastnosti dřeva

Pokud je dřevo vystaveno okolnímu prostředí, tak začne automaticky reagovat na jeho vlhkost, tím že začne zvyšovat nebo snižovat svoji vlhkost až do doby, než dosáhne rovnovážné vlhkosti. Při tomto procesu dochází k rozměrovým změnám a se stoupající vlhkostí roste rychlost degradace dřeva. Výsledkem neustálého bobtnání a sesychání dřeva jsou poté trhliny ve dřevě, které narušují celistvost dřeva. Abychom tento jev omezili, tak musíme snížit schopnost dřeva vázat vodu. Tohoto můžeme docílit pomocí termické modifikace, kdy dojde k degradaci hemicelulóz a při vyšších stupních modifikace i celulóz. Tyto komponenty na sebe dokážou vázat nejvíce vody. Tím se částečně vyřeší rozměrová stálost do meze hygroskopicity a předejde se možnému napadení a následné degradaci dřeva vlivem snížení celkové vlhkosti (Li a kol., 2017).

6.1 Rozdělení vody ve dřevě

Chemicky vázaná voda

Tento typ vody je obsažen v chemických sloučeninách. Ze dřeva se dá odstranit pouze spálením dřeva, vysušit ji nelze. Představuje 1-2% sušiny dřeva. Nemá vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti.

Voda vázaná (hygroskopická)

Nalézá se v buněčných stěnách, kde je vázaná vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny hemicelulóz a amorfní části celulózy. Tento typ vody se vyskytuje do 30% vlhkosti.

Voda volná (kapilární)

Nachází se v lumenech buněk a také vyplňuje mezibuněčné prostory. Ve dřevě se začne vyskytovat od 22-35 % vlhkosti (u našich dřevin), to znamená od meze nasycení buněčných stěn nebo od meze hygroskopicity, a nejvíce jí ve dřevě je v momentě, kdy dojde k úplnému maximálnímu nasycení dřeva a to je 150-200 %.

Voda volná má o dost menší vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti než voda vázaná (Gandelová; Horáček, 2002).

6.2 Určení meze hygroskopicity

Mez hygroskopicity (MH) a mez nasycení buněčných stěn (MNBS) se používá pro určení přechodu mezi vodou vázanou a vodou volnou. MNBS se těžko určuje, proto se pro určení této meze používá mez hygroskopicity. Rozdíl mezi MNBS a MH je v okolním prostředí. Pro MNBS je dřevo vystaveno vodě v kapalném stavu, zatímco MH je vystaveno také vodě ale v plynném skupenství. Při 15-20 °C se tyto meze velice podobají a pohybují se v průměru okolo 30 %. Mez hygroskopicity je oproti MNBS ovlivněna teplotou a s rostoucí teplotou klesá (Gandelová; Horáček, 2002).

Tabulka č. 1 - Mez hygroskopicity lokálních dřevin (Požgaj, 1997)

Mez hygroskopicity %	Druh dřeva
22–24	Jádrové dřevo jehličnanů s vysokým obsahem pryskyřice: borovice, modřín, douglaska, vejmutovka, limba
23-25	Jádrové dřevo listnáčů s kruhovitě pórovitou a polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva: akát, kaštanovník, dub, jasan ořešák, třešeň
26-28	Jádrové dřevo jehličnanů s nižším obsahem pryskyřice: modřín, douglaska
30-34	Jehličnatá dřeva s bělí a vyzrálým dřevem: smrk, jedle Bělové dřevo jehličnatých dřevin s výrazným jádrem: vejmutovka, borovice, modřín
32-35+	Listnatá dřeva s roztroušeně pórovitou stavbou: vrba, topol, olše, bříza, buk, habr bělové dřevo listnáčů s kruhovitě a polokruhovitě pórovitou stavbou: akát, kaštanovník, dub, jasan, ořešák, třešeň

6.3 Bobtnání a sesychání

Jsou to děje při, kterých dochází k rozměrovým změnám dřeva. Tyto procesy se dějí pouze v rozmezí vody vázané, pokud dojde k odpařování nebo nasáknutí vody volné, tak následkem nejsou žádné rozměrové změny. Hlavní příčinou rozměrových změn se nachází v buněčných stěnách. Největší vliv (až 90 %) na rozměrové změny má sklon fibril v S2 vrstvě, je to z toho důvodu, že orientace fibril má skoro stejný sklon jako hlavní podélná osa, odklon je tam přibližně 15-30°. V podélném směru k rozměrovým změnám v podstatě nedochází (Gandelová; Horáček, 2002).

Bobtnání

Bobtnání se označuje jako (α). Je to děj, při kterém dochází ke zvětšování plochy lineárních rozměrů nebo objemu, v důsledku přijímání vody vázané, tzn. 0-MH. Popis tohoto děje se dá rozdělit na několik charakteristik. První je zvětšování lineárních rozměrů, to znamená zvětšování v jednotlivých směrech, těmito směry jsou podélný, radiální a tangenciální. Dále popis zvětšování plochy (celková změna plochy tělesa) a u objemu (celková změna objemu tělesa). Také rozlišujeme, jestli proběhlo celkové bobtnání nebo pouze částečné. Celkové bobtnání znamená, že těleso prošlo změnou vlhkosti od 0-MH. Pokud se tak nestalo, tak se jedná o částečné bobtnání. Bobtnání se vyjadřuje v procentech a je to podíl původních rozměrů oproti rozměrům po procesu. V praxi se můžeme setkat s koeficientem bobtnání, jedná se o koeficient, který pojednává o rozměrové změně v procentech, pokud se změní celková vlhkost o 1 %. Tento výpočet úplně neodpovídá skutečnosti, protože bobtnání dřeva není úplně lineární proces, ale pro použití v praxi je dostačující. Bobtnání není stejné ve všech směrech běžně se používá, že L: R: T-1: 10: 20. V tangenciálním směru je bobtnání největší. Mezi podílem bobtnání v tangenciálním a radiálním směru je vztah, který se nazývá diferenciální bobtnání. Tato hodnota závisí především na hustotě dřeva. U jehličnatých dřevin je obvykle tato hodnota menší než u listnatých. Tato hodnota se pohybuje od 1 – 3,5 (Gandelová; Horáček, 2002).

Sesychání

Sesychání označujeme jako (β). Je to opačný proces k bobtnání. To znamená, že se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem v důsledku snižování vlhkosti. Bobtnání a sesychání se dá přepočítat následujícím vztahem (Gandelová; Horáček, 2002):

$$\alpha_i = \frac{100 \cdot \beta_i}{100 - \beta_i}$$

$$\beta_i = \frac{100 \cdot \alpha_i}{100 + \alpha_i}$$

α ... sesychání [%]

β ... bobtnání [%]

6.4 Vnitřní napětí při vysychání dřeva

Při odpařování vody ze dřeva dochází díky nerovnoměrné vlhkosti ve dřevě k vlhkostnímu a zbytkovému napětí. Vlhkostní napětí jsou pružná a mají dočasný charakter, tzn. že jsou přítomná, dokud nedojde k vyrovnání vlhkostí. Zbytková napětí vznikají tehdy, pokud budeme dřevo sušit příliš rychle. V tomto případě dochází k velkému rozdílu vlhkostí mezi povrchovou vrstvou, která je vysušená pod mez hygroskopicity a vnitřní vrstvou, která je nad mezí hygroskopicity. Vnější vrstvy potřebují začít měnit své rozměry v důsledku sesychání, naopak vnitřní vrstvy své rozměry měnit nemohou, protože jsou nad mezí hygroskopicity. Kvůli tomuto stavu vzniká zbytkové napětí, protože ve vnější vrstvě dochází k velkému tahovému napětí a ve vnitřní naopak k tlakovému napětí. Pokud tahové napětí na vnější vrstvě překročí tah napříč vláken, dojde ke vzniku povrchových trhlin. Při dalším průběhu sušení se procesy otočí a vnitřní vrstvy jsou v tahovém napětí a vnější jsou v tlakovém napětí. Povrchové trhliny se začnou zavírat a mohou při velkém tahovém napětí vznikat vnitřní trhliny. Všechny trhliny obvykle vzniknou podél dřeňových paprsků, tzn. v radiálním směru. Těmto trhlínám se dá předejít, pokud provedeme výpočty vnitřních napětí během procesu sušení. Celý proces se musí optimalizovat, protože pokud bychom sušili dřevo moc dlouho, tak je to sice záruka nepoškozeného dřeva, ale utratíme spoustu peněz za energie (Gandelová; Horáček, 2002).

Tyto výpočty jsou velice důležité u tepelně modifikovaného dřeva, protože dřevo je sušeno i tepelně upravováno ve stejné komoře, takže pokud by došlo k trhlinám, bylo by dřevo výrazně znehodnoceno a nedalo by se prodat (Lahtela, 2021).

6.5 Borcení dřeva

Díky anizotropnímu charakteru dřeva dochází při bobtnání a sesychání k tvarovým změnám dřeva. Tento jev se projevuje, jak v příčném, tak podélném směru. K podélnému borcení dochází tehdy, když podélné sušení není rovnoměrné, obvykle k tomu dochází, když se v sortimentu nachází reakční dříví nebo na předělu běle a jádra. V těchto dvou případech dochází k prohnutí dřeva. Točitosti dřeva můžeme předejít správným výběrem sortimentu, který nemá stočená vlákna v kmeni.

Příčné borcení vzniká vlivem rozdílu v sesychání tangenciálního a radiálního směru. Borcení se zvětšuje s rostoucí vzdáleností uvažovaného sortimentu od dřeně směrem k obvodu kmene. Je to vidět hlavně u deskového nábytku a hodně záleží na podílu radiální a tangenciální roviny sortimentu. Pokud je jedné roviny více a druhé méně, tak dochází k výskytu většího prohloubeného žlábků.

Borcení dřeva obecně velmi komplikuje použití dřeva jako konstrukčního materiálu v místech, kde často dochází ke změnám teploty a vlhkosti. U tepelně modifikovaného dřeva je tento problém potřeba zohlednit také i když se nepoužívá jako konstrukční řezivo (Gandelová; Horáček, 2002).

6.6 Barva

Barva je jedním z hlavních vizuálních faktorů dřeva. Teoreticky může rozhodovat o budoucí koupi produktu zákazníkem. Pokud dřevo termicky modifikujeme, tak vždy dojde ke změně barvy do tmavších odstínů. S rostoucí teplotou je tento jev intenzivnější. (Barcík a kol., 2015)

Barva dřeva je definována jako přírodní odstín suchého dřeva. Různé druhy dřeva mají různé odstíny. Mezi nejvýznamnější zástupce barevného spektra dřeva můžeme zařadit různé odstíny žluté, hnědé, červené a další. Dřevo tak nabízí širokou škálu mnoha kombinací barev, a proto se hodnoty barvy těžko měří. Dnes je nejpoužívanější metoda měření spektrofotometrem. Vzhledem k tomu, že barva dřeva je vlastně odraz světla od povrchu dřeva, tak barvu ovlivňuje několik faktorů, a to je drsnost povrchu, strukturální složení, ale také fyzikální faktory. Reakce paprsku světla s povrchem dřeva je následovná. Část světla se odrazí ihned od povrchu, a další

část pokračuje až do buněčných stěn. Fyzikální faktory tedy ovlivňují tu část světla, co se odrazí od povrchu. Fyzikálními faktory myslíme úhel paprsku a drsnost povrchu. Jinou část světla ovlivňuje složení dřeva, protože jednotlivé složky dřeva jako jsou celulózy, hemicelulózy a lignin odráží nebo pohlcují světlo rozdílně. Další strukturální složkou, která výrazně ovlivní výslednou barvu je přítomnost různých pigmentů. Poslední částí světla je neabsorbované světlo, to právě vytvoří výslednou barvu dřeva, kterou my okem vidíme (Jirous-Rajkovic a kol., 2014).

6.7 Hustota

Hustota dřeva se vždy počítá k určité vlhkosti. Výpočet se provádí následujícím vzorcem, kdy podíl hmotnosti a objemu je při stejné vlhkosti (Požgaj, 1997).

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

ρ_w ... hustota při určité vlhkosti

m_w ... hmotnost při určité vlhkosti

V_w ... objem při určité vlhkosti

Je dokázáno, že při tepelné modifikaci dochází ke snížení hustoty dřeva. Je to nejen kvůli odpaření vlhkosti, která se zpravidla začne odpařovat hned na začátku procesu, ale jde také o tepelnou degradaci. Důkazem je fakt, že celková ztráta hmoty je větší, než byl obsah vody.

Tepelná degradace je proces, při kterém dochází k odpařování těkavých extraktivních látek a degradaci složek dřeva. S narůstající teplotou je tepelná degradace vyšší a zasahuje více složek dřeva. Je třeba dodat, že jsou poměrně výrazné rozdíly v tepelné degradaci listnatých a jehličnatých dřevin. Listnaté dřevo vykazuje větší ztráty hmoty než jehličnaté. Je to pravděpodobně způsobené složením listnatého dřeva, protože obsahuje více hemicelulóz a také má menší obsah ligninu (Kamperidou; Barboutis, 2018).

7. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dřeva jsou takové vlastnosti, které popisují schopnost dřeva odolávat působení vnějších sil. Dají se rozdělit do několika skupin, a to konkrétně do tří – mechanické, technologické a odvozené.

Do mechanické skupiny lze zařadit pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost dřeva.

Technologická skupina se soustředí na zpracování dřeva. Patří sem štípatelnost, opotřebovatelnost, impregnovatelnost a ohýbatelnost.

Odvozená skupina obsahuje tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu. Stejně jako u fyzikálních vlastností se i u mechanických vlastností projevuje velký vliv anizotropie dřeva (Gandelová; Horáček, 2002).

7.1 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání je děj, kdy na dřevo působí různé mechanické síly, které zapříčiňují dočasné nebo trvalé změny daného tělesa. Namáhání dřeva se dá rozdělit do několika skupin, podle toho, jaký fyzikální činitel na ně působí, a to na mechanické, tepelné, vlhkostní a další. Většinou dochází ke kombinaci více faktorů, jako je například mechanické spolu s vlhkostním působením, k tomu se dostaneme u dřeva, které se používá ke konstrukčním účelům. Při tomto stylu namáhání musíme vzít v úvahu i čas. Celkově tyto 3 faktory mají největší vliv na deformace tělesa při různých druzích namáhání. Při mechanickém namáhání těleso ze dřeva ovlivňuje geometrie tělesa, anatomické stavba, a to, jak silné jsou chemické vazby mezi jednotlivými složkami dřeva. Právě proto je ideální posuzovat mechanické a vlhkostní působení v závislosti na čase (Gandelová; Horáček, 2002).

7.2 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva definujeme jako jeho odolnost proti trvalému porušení. Obecně popisujeme pevnost, jako napětí na mezi pevnosti, tzn. takové napětí, při kterém je porušena soudržnost tělesa a dojde k jeho trvalému porušení. Z důvodu, že se teoretická pevnost jakéhokoliv mechanického namáhání nedá spočítat, tak stanovujeme pevnost dřeva jako skutečnou pevnost dřeva. Hodnoty pevnosti dřeva získáváme pomocí zkoušek, kdy se sleduje napětí při porušení

zkušební tělesa. Ovšem u tlaku napříč vláken je výjimka, kdy je stanovena konvenční pevnost a to proto, že se u tohoto namáhání nedá dosáhnout konečného porušení tělesa (Gandelová; Horáček, 2002).

7.3 Pevnost dřeva v ohybu

Pevnost dřeva v ohybu se vypočítá pomocí zjednodušeného vztahu. Počítá se s tím, že nosník, který je podepřen dvěma podpěrami, je zatěžován silou, která působí uprostřed těchto dvou podpěr. Vztah je zjednodušený proto, že výpočet skutečného průběhu napětí by byl moc složitý a pro praxi se tedy nehodí. Zjednodušení spočívá v tom, že se počítá s lineárním průběhem napětí až do meze pevnosti. Vztah vypadá takto:

$$\sigma_{max} = \frac{3.F.l_0}{2.b.h^2}$$

σ_{max} ... ohybové napětí [MPa]

F ... působící síla [N]

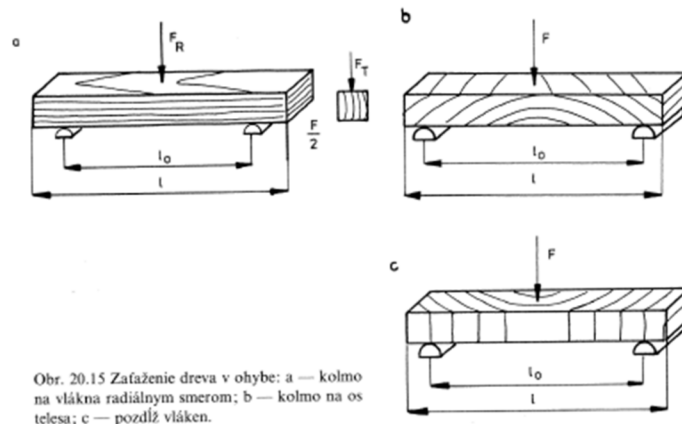
l_0 ... vzdálenost podpěr [m]

h ... výška tělesa [m]

b ... šířka tělesa [m]

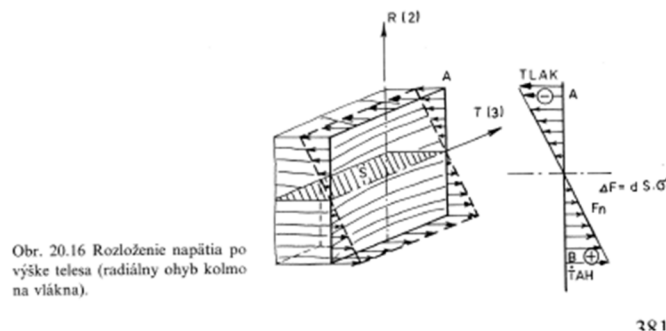
Jsou různé možnosti, jak dřevo namáhat na ohyb. Nejčastějším namáháním je pevnost dřeva v ohybu napříč vláken. To znamená, že se zkušební tělesa orientují, tak aby zatížení působilo (v tangenciálním směru. U jehličnatých dřevin bylo zjištěno, že se mez pevnosti v radiálním a tangenciálním směru u statického ohybu liší zhruba o 10–12 % zatímco u listnatých je tento rozdíl nejvýše 2–4 %. Poté, co dojde k zatížení zkušební tělesa, vznikne v jeho spodní části tahová zóna a v horní části zóna tlaková. Mezi těmito zónami vznikne smykové napětí. Díky tomu, že je tahová pevnost podél vláken větší než tlaková pevnost podél vláken, vznikne první porušení tělesa v tlakové zóně. Když vznikne porušení i v tahové zóně, tak dojde ke konečnému zlomení tělesa. Podle povrchu lomu můžeme poznat, jestli bylo dřevo křehké nebo houževnaté. U houževnatých dřev je lom vláknitý nebo třískovitý, zatímco u křehkých dřev je lom hladký. Mez pevnosti u tohoto typu namáhání se pohybuje okolo 100 MPa. Mez úměrnosti je zhruba 70 % meze pevnosti. Pevnost v ohybu závisí i na geometrii tělesa a vzdálenosti podpěr, ale se zaměříme jen na normované zkoušky, tak jsou rozměry i vzdálenosti stejné.

Namáhání při statické pevnosti v ohybu na vlákna, které probíhají kolmo na podélnou osu tělesa nepoužíváme, protože mez pevnosti například u borovice byla 4-5 % meze pevnosti v ohybu vláken probíhajících rovnoběžně s podélnou osou (Gandelová; Horáček, 2002).



Obr. 20.15 Zafažení dřeva v ohybu: a — kolmo na vlákna radiálním smerom; b — kolmo na os telesa; c — pozdĺž vláken.

Obrázek č. 5 - Zatížení dřeva v ohybu (Gandelová; Horáček, 2002)



Obr. 20.16 Rozloženie napätia po výške telesa (radiálny ohyb kolmo na vlákna).

201

Obrázek č. 6 – Rozložení napětí po výšce tělesa při ohybu (Gandelová; Horáček, 2002)

7.4 Rázová pevnost

Rázová pevnost je vlastně práce spotřebovaná pro přeražení tělesa dynamickým ohybem. Tato práce se skládá ze dvou dílčích prací. Jedna práce ohýbá těleso a druhá se spotřebuje při kontaktu řezné hrany kladiva s tělesem na odtlačení tělesa. Tuto pevnost nebo také houževnatost můžeme vypočítat pomocí následujícího vzorce:

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h}$$

A_w – rázová pevnost při určité vlhkosti [j.cm-2]

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J]

b, h – příčné rozměry tělesa [m]

Obecně platí, že čím větší práci je nutné vykonat k přeražení tělesa, tím je daný materiál houževnatější. Houževnatost se dá poznat už z přeraženého vzorku. U hodně křehkých dřev je tvar zlomu schodovitý a nevláknitý. Naopak dřevo, které je hodně houževnaté má zlom hodně vláknitý. U průměrně odolných dřev je vidět vláknitý zlom na tahové straně. Faktory, které ovlivňují výslednou pevnost jsou zejména geometrie tělesa a vzdálenost podpěr. Z hlediska materiálu tedy dřeva záleží na odklonu vláken, vlhkosti, teplotě a dalších. Některé z dřevin mohou mít v jiných zkouškách vysokou pevnost ovšem u rázové houževnatosti dosahují nízkých hodnot. Může se jednat například o problém s radiální nebo tangenciální stranou u dřevin jako jsou jehličnaté jádrové dřeviny a kruhovitě pórovité dřeviny, kde je rozdíl mezi tangenciální a radiální stranou až 50 % pro radiální stranu. U roztroušeně pórovitých dřev je tangenciální a radiální ráz skoro totožný. Při této zkoušce vycházejí lépe listnaté dřeviny, které jsou v průměru dvakrát odolnější (Gandelová; Horáček, 2002).

8. Využití tepelně modifikovaného dřeva

8.1 Obecné využití

Tepelně modifikované dřevo má různorodé využití, ale jeho předními vlastnostmi je jeho odolnost vůči degradaci, rozměrová stálost, rezonanční vlastnosti a jeho struktura. V dnešní době je také velice důležité, že se při výrobě vyhneme použití jakýchkoliv chemikálií. Dle studie z roku 2015, která měla za cíl zjistit hlavní problémy malého prodeje tepelně upraveného dřeva a zajistit marketingovou strategii pro vyšší prodeje se ukázalo, že samotný produkt by mohl být velice žádaný. Ovšem v USA o něm bylo malé povědomí, a tak prodeje nedosahovaly takových hodnot, jaký by si výrobci těchto produktů představovali. Největšími odběrateli modifikovaného dřeva byli distributoři, pily, architekti a řemeslníci, ale také výrobci hudebních nástrojů, kteří oceňují především

rezonanční vlastnosti produktu. Odběratelé nejvíce zajímaly hlavně fyzikální vlastnosti, atraktivní vzhled a textura dřeva, a především nulová toxicita, to znamená, že při výrobě nebyly použity žádné chemikálie. Všichni, kdo se zapojují do tohoto obchodu s tepelně upraveným dřevem mají snahu zvýšit povědomí o tomto produktu, ať už je to pomocí webových stránek, kde poskytují veškeré informace o výhodách a použití produktu, nebo také na konferencích. (Espinoza a kol, 2015).

V Evropě je tato modifikace známá a využívá se poměrně hodně. V Praze ji najdeme ThermoWood na několika rodinných domech nebo veřejných budovách. Například High-Tech pavilon v areálu České zemědělské univerzity je jím obložen. Tepelně upravené dřevo se používá, jak v exteriéru, tak v interiéru. V exteriéru to mohou být různé terasové podlahy, dlažby, zábradlí a právě obklady. V interiéru se používá na podlahy, parkety, obklady, ale třeba také v saunách (Hasaganić, 2019).



Obrázek č. 7 - Využití ThermoWoodu pro terasovou podlahu v areálu hotelu v Turecku (Lahtela, 2021)



Obrázek č. 8 - Obklad ThermoWoodem nákupního centra ve Španělsku (Lahtela, 2021)

Specifickým odvětvím, ve kterém se používá modifikované dřevo upravené pomocí tepla, je hudební průmysl. V hudebním průmyslu se na výrobu hudebních nástrojů používá jak místní, tak tropické dřevo. Z hlediska struktury a barvy je modifikované dřevo také velice zajímavé a někdy se i podobá tropickému dřevu. Ale co je pro výrobce hudebních nástrojů důležité je, že na univerzitě VTT, kde vznikl produkt ThermoWoodu, při pokusech zjistili, že už při modifikaci 180 ° C dochází ke zlepšení akustických vlastností dřeva, s tím, že díky chemickým změnám dojde i k lepší tvarové stálosti a odolnosti dřeva vůči okolnímu prostředí. Proto se začalo tepelně modifikované dřevo využívat i v tomto odvětví (Pfriem, 2015).



Obrázek č. 9 - Kytarové krky z ThermoWoodu (www.momose-guitar.com, 31.3.2022)

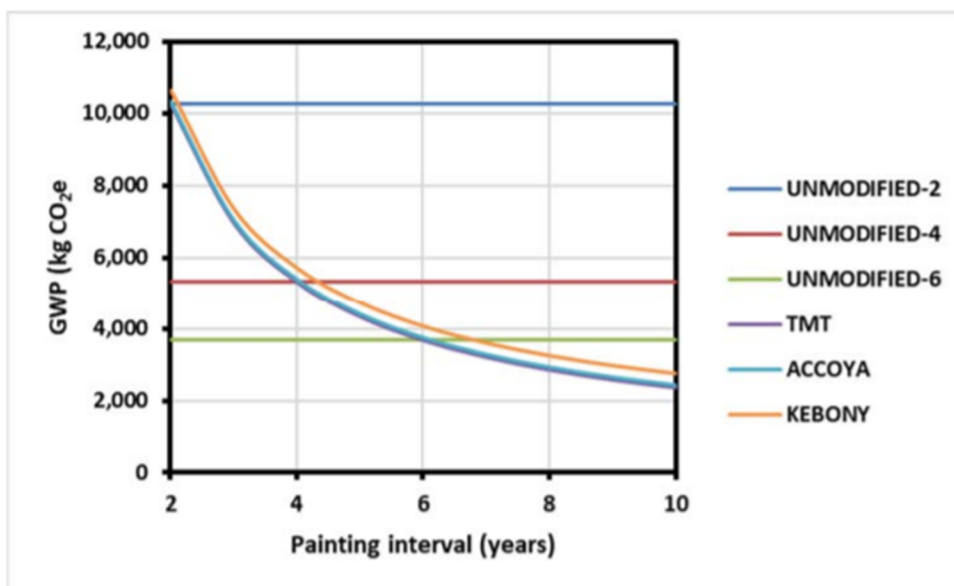
8.2 Termodřevo a jeho dopad na životní prostředí

Velmi zajímavý pohled na téma modifikací přinesl článek Environmental Impact of Wood modification, který se zabýval, jestli se z hlediska životního prostředí tepelná modifikace dřeva vyplatí, nebo jestli je lepší sortimenty po skončení jejich životnosti znovu nahradit novými. Hledělo se na životní cyklus sortimentu, který začne pokácením surového dříví a končí recyklováním dřeva. V tomto cyklu je zohledněna veškerá doprava, používání, výroba a kolik kg CO₂ se vyprodukuje. Počítalo se s tím, že nemodifikované dřevo vydrží 20 let, takže v Tabulce č.2 jsou znázorněny 3 výměny sortimentu ze dřeva. Oproti nim modifikované sortimenty – ACCOYA WOOD, TMT (Thermally Modified Timber) a Kebony wood zůstávají po celou dobu původní. Modifikované dřevo bylo každých 10 let natíráno, takto dlouhý interval mezi nátěry je možný právě díky rozměrové stabilitě modifikovaného dřeva.

Tabulka č. 2 - Srovnání dopadů modifikací na životní prostředí

Materiál	Celkové GWP (kgCo2e/m3 za 60 let)
Výměny neupraveného dřeva	4343
TMT	2342
Accoya	2416
Kebony	2741

V následujícím Grafu č.1 je ukázáno porovnání jednotlivých modifikací natíraných alkydovým nátěrem ve dvou vrstvách s nemodifikovaným dřevem natřeným stejným způsobem, ale v intervalech 2, 4, 6 let. Závěrem tedy můžeme říct, že se modifikace vyplatí i z hlediska životního prostředí, a to poměrně o hodně – rozdíl činí něco kolem 2000 jednotek (Hill a kol., 2021).



Graf č. 1 - Vliv modifikací na životní prostředí (Hill a kol. ,2021)

Metodika

Metodika probíhala na dřevu javoru klen (*Acer Pseudoplatanus*), které bylo upraveno v různých stupních (160 °C, 180 °C a 210 °C) tepelné modifikace. Samotná délka tepelné modifikace trvala 3 hodiny. Referenční vzorek nebyl modifikován. Cílem bylo zjistit změny fyzikálních a mechanických vlastností po modifikaci. Z fyzikálních se jednalo o sledování barevné změny v závislosti na termické modifikaci. U mechanických se provádělo měření změny rázové houževnatosti a pevnosti v ohybu po termické modifikaci. Metodika probíhala v několika krocích. Nejprve jsme si vybrali dřevinu, poté jsme roztřídili vzorky na jednotlivé zkoušky, vzorky změřili a zvážili. Následovalo samotné experimentální měření. Po získání hodnot ze strojů jsme vyhodnotili výsledky pomocí programu Statistica 13.

9. Výběr dřeva a příprava těles

9.1 Výběr dřeva

Pro tuto práci jsem si z nabízeného výběru dřevin vybral javor klen (*Acer Pseudoplatanus*). Jedná se o listnatou roztroušeně pórovitou dřevinu bez rozlišitelného jádra, ale může se vyskytovat nepravé jádro. Jedná se o dřevo tvrdé a středně těžké. Javor se používá v konstrukcích, kde je prvek silně namáhaný, jsou z něj dělány sportovní potřeby, ale také parkety, dýhy nebo nábytek.

Javor není typickou dřevinou pro tepelnou modifikaci, bude to asi i tím, že se javor v severských zemích, odkud hlavně proces ThermoWoodu pochází, tolik nevyskytuje. Každopádně termická modifikace se dělá hlavně kvůli zlepšení fyzikálních vlastností na úkor těch mechanických. Z pohledu využití neupraveného javoru, který se používá pro extrémně namáhané spoje ve stavebnictví nebo jako jádro různých sportovních náčiní, není tepelná modifikace úplně ideální (Zeidlera kol., 2016) (Lahtela, 2021).

9.2 Příprava těles pro praktické zkoušky

Nejprve jsme si roztřídili jednotlivé vzorky na měření souřadnic barevného prostoru LAB, rázové houževnatosti a pevnosti ohybu a označili je podle příslušné teploty modifikace. Měření a vážení proběhlo pomocí laboratorní váhy KERN PSB/PBJ a posuvného měřítka KINEX ICONIC před samotnou zkouškou.

10. Experimentální měření

10.1 Měření celkové změny barevného prostoru

Při měření celkové změny barevného prostoru dřeva jsme použili spektrofotometr Konica Minolta CM – 700 d, který je na Obrázku č.10.



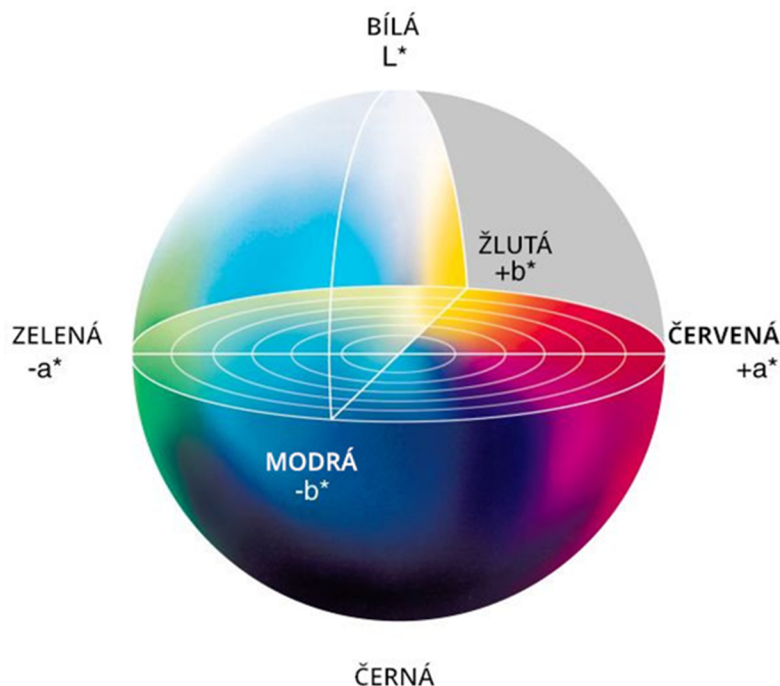
Obrázek č. 10 - Spektrofotometr Konica Minolta CM – 700 d (www.anamet.cz, 28.3.2022)

Samotnému měření předcházela kalibrace. Pomocí přístroje byly zaznamenávány souřadnice barevného prostoru LAB. Přístroj funguje na pulzní xenonové výbojky, která pošle paprsek světla, který má vlnovou délku od 400 až 700 nm, tento paprsek světla se odrazí od povrchu zkoumaného vzorku a dopadne na pole silikonových fotodiod a poté přístroj udá hodnoty barevného prostoru povrchu.

Osa a – představuje od záporné poloviny zelenou barvu, kladná červenou

Osa b – představují záporné hodnoty modrou barvu a kladné žlutou

Osa L – představuje světlost nebo tmavost (0 % je černá – 100 % bílá)



Obrázek č. 11 - Barevný prostor CIELAB (www.kopina.cz, 28.3. 2022)

Pokud známe hodnoty všech 3 souřadnic, můžeme vyjádřit celkovou změnu barevného prostoru způsobenou termickou modifikací.

Měřili jsme po jednom vzorku z každé modifikace. Pokud ovšem budeme chtít vypočítat celkovou barevnou změnu ΔE^* , tak musíme také naměřit referenční vzorek, který je označen jako Javor 20. Jednotlivé vzorky jsme měřili na 3 místech, kdy přístroj vyslal čtyři paprsky, takže provedl rovnou čtyři měření stejného místa. Výsledkem je zprůměrovaná hodnota těchto čtyř měření.

Měření proběhlo podle norem ISO 11664-2 (2007), ISO 11644-4 (2008), ISO 11664-6 (2013).

Vzorce použité pro výpočet barevné změny jsou následující:

Nejprve jsme museli vypočítat Δa^* , Δb^* , ΔL^* , abychom poté mohli vypočítat celkovou barevnou změnu ΔE^* . Jednotlivé změny na osách je vždy hodnota modifikace ($a_2, a_3 \dots a_n$) od které se odečte hodnota referenčního vzorku (a_1) viz. vzorec níže:

$$\Delta a^* = a_2 - a_1, a_3 - a_1, \dots a_n - a_1$$

To samé platí i pro Δb^* , ΔL^*

Vzorec pro celkovou změnu barevného prostoru vypadá následovně (referenční hodnota je v tomto případě na nule, protože od ní se změna odvíjí):

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

Výsledné číslo barevné změny musíme porovnat s tabulkou, abychom mohli říct, o jak velkou barevnou změnu se jedná.

10.2 Měření rázové houževnatosti

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena pomocí Charpyho kladiva. Nejprve jsme si rozdělili označené vzorky o rozměrech 10x10x70 mm, podle jednotlivých termických modifikací (20, 160, 180, 210). Vzorky byly označeny na obou stranách kvůli případné identifikaci při přeražení. Poté jsme začali provádět zkoušky jednotlivých vzorků. Každá skupina vzorků obsahovala 15 zkušebních těles. Zkouška probíhala v tangenciálním směru. Po dokončení zkoušky stroj automaticky vyhodnotil naměřené hodnoty. Po dokončení všech zkoušek se výsledky vyhodnocovaly pomocí programu Statistica 13.



Obrázek č. 12 - Instron - Stroj na měření rázové houževnatosti (www.instron.com, 28.3.2022)

10.3 Měření pevnosti v ohybu

Zkouška 3 bodového ohybu probíhala podle normy ČSN 49 0115 pomocí stroje od firmy INSTRON. Nejprve jsme si rozdělili označené vzorky o rozměrech 20x20x300 mm podle jednotlivých tepelných modifikací (20, 160, 180, 210). Vzorky byly označeny na obou stranách kvůli případné identifikaci při přelomení. Poté jsme začali provádět zkoušky jednotlivých vzorků. Každá skupina vzorků obsahovala 10 zkušebních těles. Zkouška probíhala v tangenciálním směru. Po dokončení zkoušky stroj automaticky vyhodnotil naměřené hodnoty. Po dokončení všech zkoušek se výsledky vyhodnocovaly pomocí programu Statistica 13.

Výsledky a diskuse

11. Celková změna barevného prostoru

Pomocí programu Statistica 13 jsme z naměřených hodnot vyhodnotili celkové změny barevného prostoru i jednotlivých souřadnic. Porovnávaly se jednotlivé modifikace (160, 180, 210)

a referenční vzorek, který je v tabulkách označen jako 20. Pro vyhodnocení jsme použili jednofaktorový test ANOVA.

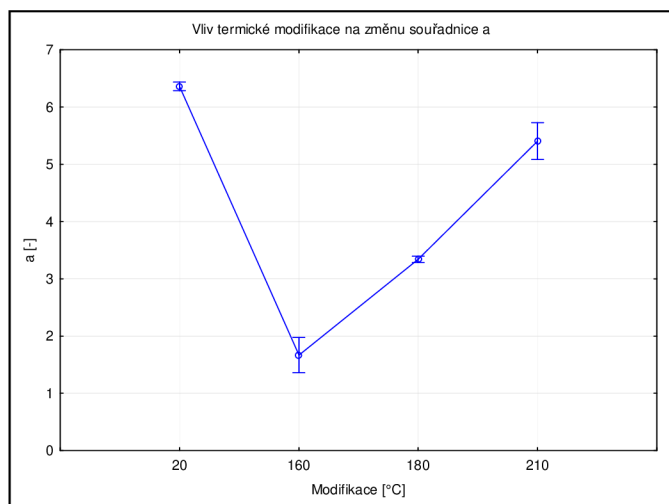
Tabulka č. 3 - Tabulka pro výpočet barevné změny

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

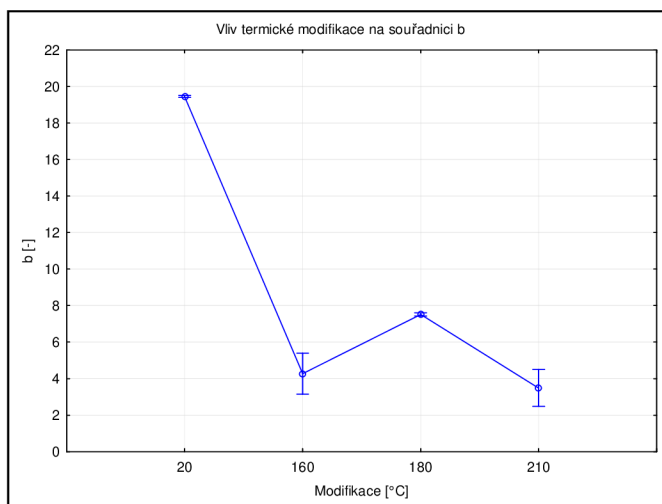
Tabulka č. 4 - Srovnání barevných změn modifikací oproti referenčnímu vzorku

Druh	Modifikace	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔE^*
JAVOR	20	6,36	19,45	80,27	-
JAVOR	160	1,67	4,27	-11,07	12,00
JAVOR	180	4,90	5,54	-32,85	33,93
JAVOR	210	5,40	3,49	-41,75	42,27

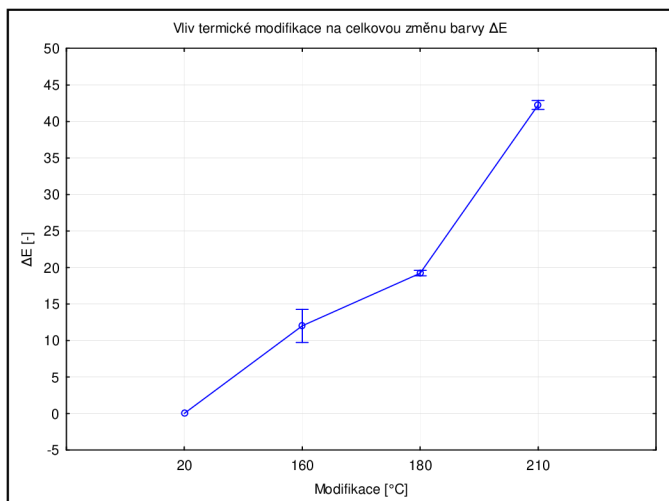
Jak je z výsledků v tabulkách vidět, tak termická modifikace má velký vliv na celkovou změnu barvy. V souhrnné tabulce jsou hodnoty zprůměrovány ze všech měření. Z Tabulky č. 4 je patrné, že hned u první modifikace se dostáváme na největší barevnou změnu a tou je odlišná barva. U ostatních modifikací je možné pozorovat stejný výsledek pouze s výraznější změnou celkového barevného prostoru, kdy se se zvyšující teplotou modifikace tento efekt projevoval výrazněji. Pokud porovnáme změny barvy jednotlivých modifikací, tak zjistíme, že jsou barevné změny natolik znatelné, že i mezi modifikacemi jsou barvy zcela odlišné, kromě změny barvy mezi modifikacemi při 180 °C a 210 °C modifikací, kde se jedná „pouze“ o vysokou barevnou změnu.



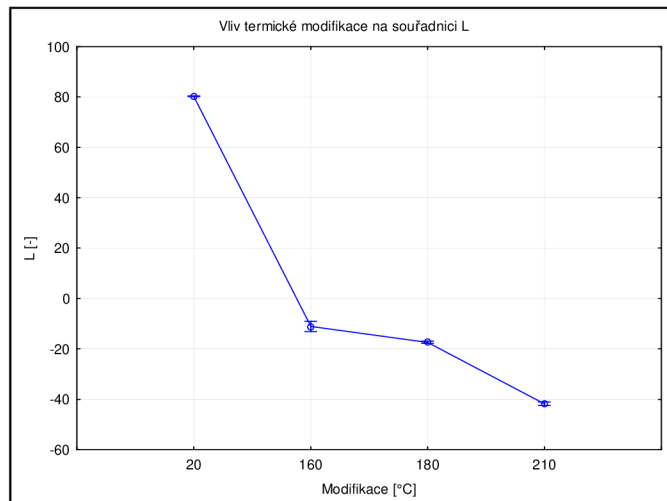
Graf č. 5 - Vliv termické modifikace na souřadnici a



Graf č. 3 - Vliv termické modifikace na souřadnici b



Graf č. 4 - Vliv termické modifikace na celkovou změnu barvy ΔE



Graf č. 2 - Vliv termické modifikace na změnu souřadnice L

Z Grafu č.4 výsledné změny barvy je jasné, že s narůstající teplotou termické modifikace narůstá i hodnota změny tohoto parametru. U jednotlivých souřadnic barevného prostoru to už tak jednoznačné není, u Grafu č.2 souřadnice a došlo při teplotě 160 °C k posunu barvy směrem k zelené (pokles) a s dalšími modifikacemi se začaly hodnoty vracet zase spíše k červené barvě (nárůst), tedy původní barvě referenčního vzorku. U souřadnice b (Graf č. 3) se pohybovala hodnota u 160 °C oproti referenčnímu vzorku nejprve rapidně dolů z 19 na 6, to znamená posun k modré barvě a poté se u 180 °C dostala na hodnotu 7 a při 210 °C zase zpět na 6. U souřadnice L (Graf č.5) byl zaznamenán největší rozdíl. Pozice na souřadnici L udává světlost/tmavost barvy, vzhledem k tomu, že je javor poměrně světlá dřevina, jak dokazuje hodnota referenčního vzorku, kde je hodnota na 80 % (100 % = bílá), tak je v tomto parametru největší rozdíl. U jiných dřevin, které jsou přirozeně tmavší jako je například mahagon, by tento rozdíl nebyl takový. Nicméně u souřadnice L jsme zaznamenali stejný průběh jako u celkové barevné změny.

Dle článku Characterization of thermally modified wood at different industrial conditions je jasné, že s narůstající teplotou se barva opravdu výrazně mění. V tomto článku byl zkoumán Jasan ztepilý při teplotách 192 °C, 202 °C a 212 °C a změna barvy oproti referenčnímu vzorku se pohybovala od 30 do 46. Důvodem změny barvy jsou chemické změny ve dřevě, které se začnou dít už při 100 °C. V tomto okamžiku dojde ke zvýšení obsahu ligninu a poklesu obsahu celulózy, zároveň se při této teplotě začnou uvolňovat méně stabilní sloučeniny extraktiv. Všechny tyto děje mají za následek zvýšení pH a kyselosti dřeva a také mají vliv na jeho smáčelnivost. Díky změně pH a kyselosti má dřevo tmavší odstíny (Diaz a kol., 2016).

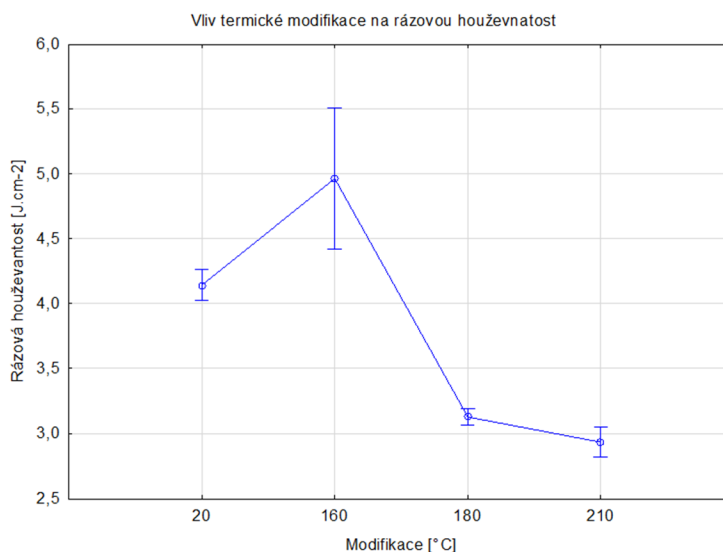
12. Rázová houževnatost

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena na stroji Instron MPX se softwarem Bluehill Impact, který splňuje normy ISO 148-1 (2017), GOST 9454 (2017), AS 1544 (2017), JIS Z 2242 (2018), JIS B 7722 (2018). Zkoušelo se vždy 15 vzorků z každé skupiny. V Tabulce č.5 jsou zprůměrované hodnoty všech 15 měření každé ze skupin. Při zkoušení těles bylo pozorováno, že u modifikace při 160 °C hodnoty vyšly s 20 % nárůstem oproti neupraveným vzorkům.

U vzorků modifikovaných při 180 °C došlo k velkému poklesu na 75 % průměrných hodnot referenčního u vzorků modifikovaných při 180 °C vyšla průměrná hodnota 2,93 J.cm⁻², což činí 71 % průměrných hodnot referenčního vzorku.

Tabulka č. 5 - Rázová houževnatost

Dřevina	Modifikace [°C]	Rázová houževnatost [J.cm ⁻²]	Rozdíl [%]
Javor	20	4,14	-
Javor	160	4,96	+20 %
Javor	180	3,13	-25 %
Javor	210	2,93	-29 %



Graf č. 6 - Vliv termické modifikace na rázovou houževnatost

Tabulka č. 6 - Duncanův test - rázová houževnatost

Duncanův test - Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 1,2259, sv = 56,000					
Č. buňky-	Modifikace	20	160	180	210
1	20		0,047147	0,014983	0,005709
2	160	0,047147		0,000099	0,000061
3	180	0,014983	0,000099		0,633559
4	210	0,005709	0,000061	0,633559	

Ve výzkumu Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood vyšel stejný průběh jako v našem případě a skutečně dojde u modifikace při 160 °C ke zlepšení rázové houževnatosti. V tomto článku zkoumali dub letní a smrk obecný. V obou případech došlo k většímu nárůstu u 160 °C modifikace, a to asi o 5 až 10 %. U modifikací při teplotách 180 °C a 210 °C došlo poté k poklesu na 60 % referenční pevnosti. Důvodem pro původní zvýšení a poté velký pokles rázové houževnatosti jsou chemické změny ve dřevě vyvolané teplotou.

V publikaci je zmíněno, že největší korelace je mezi rázovou houževnatostí a relativním obsahem celulózy. Z toho můžeme usuzovat, že opravdu nejvíce záleží na chemickém složení dřeva a termické modifikaci. To znamená, že také závisí na druhu dřeviny (Gaff a kol., 2019).

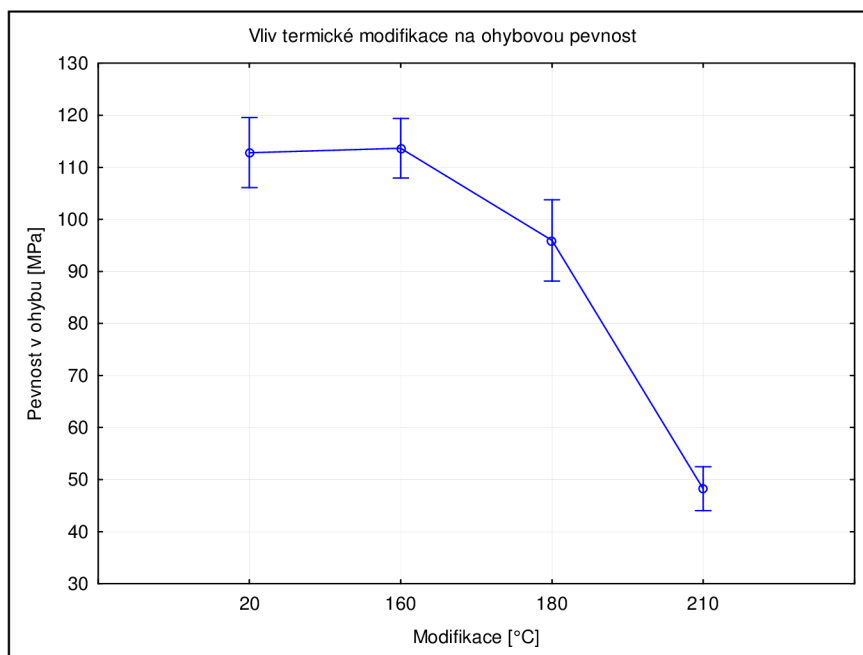
V článku Influence of combined heat treatment and densification on mechanical properties of poplar wood posuzovali topol osiku a pokud byl vystaven 160 °C po 3 hodiny, tak jeho rázová houževnatost klesla o 21 %. Pokud byl takto opravený vzorek ještě zhutněný termoplastickou modifikací, došlo k nárůstu o 26,47 %. To by znamenalo, že nejen výběr dřeviny, ale i hustota by měla mít aspoň malý vliv na výsledné hodnoty rázové houževnatosti (Sozbir a kol., 2019).

13. Pevnost v ohybu

Zkouška probíhala podle ČSN 49 0115. Zkoušelo se 10 vzorků od každé modifikace. Pevnost v ohybu měla podobný průběh jako rázová houževnatost, kdy se o něco zlepšila maximální síla i napětí u tepelné modifikace při teplotě 160 °C, nicméně zlepšení bylo pouze o jedno procento, tudíž můžeme říct, že zůstala v podstatě na stejných hodnotách. U modifikace při 180 °C došlo k výraznějšímu poklesu, přesněji řečeno o 15 % oproti referenčnímu vzorku. U modifikace při 210 °C došlo k velkému poklesu, kdy se hodnoty dostaly na méně než polovinu referenčních hodnot a to 43 %. Jak můžeme vidět v Tabulce č.7, kde jsou zprůměrované hodnoty všech měření jednotlivých modifikací.

Tabulka č. 7 - Pevnost v ohybu

Dřevina	Modifikace	Maximální síla [kN]	Oproti 20	Pevnost v ohybu [MPa]	Oproti 20
Javor	20	2,49	-	112,84	-
Javor	160	2,52	101 %	113,67	101 %
Javor	180	2,04	82 %	95,93	85 %
Javor	210	0,95	38 %	48,24	43 %



Graf č. 7 - Vliv termické modifikace na ohybovou pevnost

Tabulka č. 8 - Duncanův test – Pevnost v ohybu

Č. buňky	Duncanův test; Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = ,21261, sv = 42,000				
	Modifikace	{1}	{2}	{3}	{4}
		2,4860	2,5167	2,0425	,95083
1	20		0,874540	0,026643	0,000059
2	160	0,874540		0,023739	0,000057
3	180	0,026643	0,023739		0,000119
4	210	0,000059	0,000057	0,000119	

Podle Duncanova testu (Tabulka č. 8) vidíme, že se hodnoty mezi referenčním vzorkem a prvním stupněm modifikace zásadně neliší.

Dle článku Influence of combined heat treatment and densification on mechanical properties of poplar wood, který byl zmíněn už ve výsledcích rázové houževnatosti se zabývali i pevností v ohybu topolu, kde vyšly výsledky podobně jako v našem případě. U modifikace při 160 °C došlo sice k poklesu, ale jen o 1,59 % oproti referenčnímu vzorku. U modifikace při 200 °C došlo ke stejnému poklesu jako u modifikace javoru při teplotě 210 °C. Pokud dřevo prošlo termoplastickou modifikací pro zhutnění dřeva, tak se navýšila pevnost v ohybu o 40 % u modifikace při 160 °C, u modifikace při 200 °C došlo i po termoplastické modifikaci k poklesu této pevnosti, ale jen o 3 %. (Sozbir a kol., 2019) Podobné hodnoty vzorku modifikovaného při 160 °C a referenčního vzorku jsou zapříčiněny nízkou teplotou modifikace, kdy nedošlo k tak velkým chemickým změnám a došlo pouze ke změnám, které vedly ke snížení schopnosti dřeva vázat vodu (Borůvka a kol., 2015).

Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat vliv jednotlivých stupňů termické modifikace na fyzikální a mechanické vlastnosti na dřevu javoru (*Acer Pseudoplatanus L./Acer Platanoides L.*). Hlavním cílem bylo posoudit změnu barvy, rázovou houževnatost a pevnost v ohybu. Tepelná modifikace javoru probíhala podle metodiky procesu ThermoWoodu. Všechny modifikace byly vystaveny své nejvyšší teplotě po stejnou dobu a to 3 hodin. Modifikace byly celkem 3. První byla při teplotě 160 °C, další při teplotě modifikace 180 °C a nejvyšší teplota modifikace byla 210 °C.

Co se týká celkové změny barevného prostoru, lze konstatovat, že při termické modifikaci docházelo k vytvoření tmavšího odstínu. Tento jev byl intenzivnější se zvyšující se teplotou termické modifikace. Vůči referenčnímu vzorku vyšla celková změna barevného prostoru u všech modifikací jako jiná barva, nicméně je třeba zmínit, že takto velký rozdíl byl i mezi jednotlivými modifikacemi až na jednu výjimku mezi 180 °C a 210 °C, kdy barevná změna byla o stupeň nižší a tento stupeň se hodnotí jako vysoká barevná změna. Příčinou takových barevných změn jsou chemické změny ve dřevě, kdy dojde ke zvýšení obsahu ligninu, uvolnění extraktiv a poklesu obsahu celulózy. Tím se změní pH a kyselost dřeva a to má za následek tmavší odstíny. U tmavšího odstínu dřeva více vynikne struktura a dřevo se tak stane atraktivnější.

U rázové houževnatosti došlo ke zlepšení vlastností u modifikace při 160 °C a to o 20 % oproti referenčnímu vzorku. U ostatních dvou modifikací došlo k poklesu zhruba

o 25-30 % hodnoty rázové houževnatosti referenčního vzorku. Z literatury jsme se dozvěděli, že takový průběh je u některých dřevin běžný. Je to zapříčiněno vlivem obsahu celulózy na výsledné hodnoty a tím, že je teplota 160 °C stále nízká na větší chemické změny ve dřevě. Z toho tedy plyne, že hodnoty nejvíce ovlivňuje výběr dřeviny a teplota modifikace. Rázová pevnost je u modifikací při vyšších teplotách nízká a to je důvodem, proč se dřevo upravené podle procesu ThermoWoodu používá hlavně na obklady.

Pevnost v ohybu se u vzorku modifikovaném při 160 °C oproti referenčnímu vzorku moc nezměnila. Nicméně došlo ke zlepšení zhruba o 1 %. To, že jsou hodnoty první modifikace a referenčního vzorku podobné dokázal i Duncanův test. U modifikovaného vzorku při teplotě 180 °C došlo k poklesu o 15 % a u modifikace 210 °C došlo k rapidnímu poklesu na pouhých 43 % hodnoty pevnosti v ohybu referenčního vzorku. Pevnost v ohybu vyšla také velmi nízká a to jen dokazuje jeho nevhodnost pro konstrukční a nosné účely.

Seznam použité literatury

1. BARCÍK, Štefan, Miroslav GAŠPAŘÍK a Evgeny Y. RAZUMOV, 2015. Effect of thermal modification on the colour changes of oak wood. *Wood Research*. **60**(3), 385-396. ISSN 1336-4561.
2. BIRSCHKE, Christian, 2020. Wood Protection and Preservation. *Forests* [online]. University of Goettingen, Buesgenweg 4, D-37077 Goettingen, Germany, **11**(5), 1-2 [cit. 2022-04-07]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/f11050549>
3. BORŮVKA, Vlastimil, Aleš ZEIDLER, Tomáš HOLEČEK a Roman DUDÍK, 2018. Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood [online]. 1-18 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/f9040197>
4. BORŮVKA, Vlastimil, Aleš ZEIDLER a Tomáš HOLEČEK, 2015. Comparison of stiffness and strength properties of untreated and heat-treated wood of Douglas fir and alder. *BioResources* [online]. **10**(4), 8281-8294 [cit. 2022-04-07]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_10_4_8281_Boruvka_Stiffness_Strength_Properties_Douglas_Fir
5. DIAZ, Rene Herrera, Tomasz KRYSZTOFIK, R. LLANO-PONTE a Jalel LABIDI, 2016. Characterization of thermally modified wood at different industrial conditions. *Drewno* [online]. January 2016, **59**(127), 152-164 [cit. 2022-04-07]. ISSN 16443985. Dostupné z: doi:10.12841/wood.1644-3985.C05.15
6. DIAZ, Rene Herrera, Tomasz KRYSZTOFIK, R. LLANO-PONTE a Jalel LABIDI, 2016. Characterization of thermally modified wood at different industrial conditions. *Drewno* [online]. January 2016, **59**(127), 152-164 [cit. 2022-04-07]. ISSN 16443985. Dostupné z: doi:10.12841/wood.1644-3985.C05.15
7. ESPINOZA, Omar, Urs BUEHLMANN a Maria Fernanda LAGUARDA-MALLO, 2015. Thermally Modified Wood: Marketing Strategies of U.S. Producers. *BioResources* [online]. **10**(4), 6942-6952 [cit. 2022-04-09]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.10.4.6942-6952
8. GAFF, Milan, František KAČÍK a Miroslav GAŠPARÍK, 2019. Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak

- and Norway spruce wood. *Composite Structures* [online]. **216**, 80-88 [cit. 2022-04-07]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2019.02.091
9. GANDELOVÁ, Libuše a Petr HORÁČEK, 2002. *Nauka o dřevě*. 2. nezm. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-577-1.
 10. GANDELOVÁ, Libuše a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ, 2014. *Stavba dřeva*. 2., nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-966-7.
 11. HASAGANIĆ, Redžo, 2019. Thermal modified wood: A critical review [online]. Conference: Revitalization and Modernization of Production, RIM 2019At: Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 1-6 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335992836_THERMAL_MODIFIED_WOOD_A_CRITICAL_REVIEW
 12. HILL, Callum A. S., c2006. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. Chichester: John Wiley. ISBN 978-0-470-02172-9.
 13. HILL, Callum, Mark HUGHES a Daniel GUDSELL, 2021. Environmental Impact of Wood Modification. *Coatings* [online]. 2021, **11**(3), 1-15 [cit. 2022-04-07]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/coatings11030366>
 14. JIROUS-RAJKOVIC, Vlatka, Tomislav SEDLAR a Josip MIKLEČIĆ, 2014. Defining of Wood Colour [online]. Conference: 57th International Convention of Society of Wood Science and TechnologyAt: Zvolen, Slovakia, June 2014, 847-855 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304348546_Defining_of_Wood_Colour

15. KAMPERIDOU, Vasiliki a Ioannis BARBOUTIS, 2018. Physical and hygroscopic properties of pine and poplar wood after heat treatment [online]. Conference: 5th International Conference on Processing Technologies for the Forest and Bio-based Products Industries (PTF BPI 2018) At: Freising/Munich, September 2018, 192-199 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/340793644_Physical_and_hygroscopic_properties_of_pine_and_poplar_wood_after_heat_treatment
16. KHADEMIBAMI, Laya a Gabrielly S. BOBADILHA, 2022. Recent Developments Studies on Wood Protection Research in Academia: A Review. *Frontiers in Forests and Global Change* [online]. **5** [cit. 2022-04-07]. ISSN 2624-893X. Dostupné z: [doi:10.3389/ffgc.2022.793177](https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.793177)
17. KONDRATYEVA, Ekaterina, Kajum SAFIULLIN, Ildar MOTYGULLIN, Alexander KLOCHKOV, Murat TAGIROV a Valerie REITA, 2016. Thermal modification of wood and a complex study of its properties by magnetic resonance and other methods. *Wood Science and Technology* [online]. **50**(5), 895-916 [cit. 2022-04-07]. ISSN 0043-7719. Dostupné z: [doi:10.1007/s00226-016-0825-1](https://doi.org/10.1007/s00226-016-0825-1)
18. LAHTELA, Tero, 2021. *ThermoWood Handbook* [online]. In: . Snellmaninkatu 13, 00170 Helsinki, Finland: International Thermowood Association, s. 1-55 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/tiedostot/web_thermowood_handbook.pdf
19. LI, Tao, Da-li CHENG, Stavros AVRAMIDIS, Magnus E.P. WALINDER a Ding-guo ZHOU, 2017. *Construction and building materials*. Oxford: Elsevier, 671-676. ISBN 0950-0618. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.218](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.218).
20. PÁNEK, Miloš a Ladislav REINPRECHT, 2008. Bio-treatment of spruce wood for improving of its permeability and soaking - Part 1: Direct treatment with the bacterium *Bacillus subtilis*. *Wood Research*. (1), 1-11.
21. PANIGRAHI, Sonia a Sandeep ROUT, 2020. *Agriculture and Forestry: Current Trends, Perspectives, Issues - I: Wood modification: An alternative strategy for use and protection of wood*. Prasadampadu, Vijayawada Andhra Pradesh, India - 521108: Immortal Publications. ISBN 978-93-5426-676-8.

22. PFRIEM, Alexander, 2015. Thermally Modified Wood for Use in Musical Instruments. *Drvna industrija* [online]. **66**(3), 251-253 [cit. 2022-04-07]. ISSN 00126772. Dostupné z: doi:10.5552/drind.2015.1426
23. POŽGAJ, Alexander, 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydanie. Bratislava: Príroda. ISBN 80-07-00960-4.
24. RAPP, Andreas O., 2001. Review on heat treatments of wood. Rue de la Loi, 200, B-1049 Brussels - Belgium: The European Commission Research Directorate. ISBN 3-926301-02-3.
25. REINPRECHT, Ladislav a Miloš PÁNEK, 2016. Trvanlivost a ochrana dřeva. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2660-6.
26. SOZBIR, Gonca Duzkale, Ibrahim BEKTAS a Aysenur Kilic AK, 2019. Influence of combined heat treatment and densification on mechanical properties of poplar wood [online]. 21(4) [cit. 2022-04-07]. ISSN 0718-221X. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000405
27. ZEIDLER, Aleš a Vlastimil BORŮVKA, 2016. Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2674-3.

POUŽITÉ NORMY

28. DIN EN ISO 11664-2, 2011-07. Colorimetry - Part 2: CIE standard illuminants (ISO 11664-2:2007).
29. ČSN EN ISO/CIE 11664-4 (011720), 2020. Kolorimetrie - Část 4: Kolorimetrický prostor CIE 1976 L*a*b*: 0117 - Optika. 01/2020.
30. ČSN EN ISO 11664-6 (011720), 2017. Kolorimetrie - Část 6: CIEDE2000 vzorce výpočtu barevného rozdílu. 02/2017.
31. ČSN EN ISO 148-1 (420381), 2017. Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda. 06/2017.
32. ČSN 49 0115 (490115), 1979. Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. Neznámé.

INTERNETOVÉ ZDROJE

33. <https://www.anamet.cz>. Anamet: analytical & measuring & testing [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.anamet.cz/prenosny-spektrofotometr-cm-700-600d/#:~:text=CM%2D700d%20a%20CM%2D600d%20jsou%20celosv%C4%9Btov%C4%9B%20prvn%C3%AD%20p%C5%99%C3%ADstroje%20pro,splet%C3%AD%20kabel%C5%AF%20p%C5%99i%20konven%C4%8Dn%C3%ADm%20pou%C5%BEit%C3%AD>.
34. Instron - charpyho kladivo. Instron.com [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.instron.com/en/products/testing-systems/impact-systems/pendulums/mpx-pendulum>
35. <https://kopina.cz>. Kopina [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://kopina.cz/terminologie/36958/lab>
36. <https://momose-guitar.com>. MOMOSE Custom Craft Guitars [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://momose-guitar.com/about/thermowood>
37. TUL - sklovitý stav [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view>