

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Fyzikální – mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*)

Diplomová práce

Autor: Maxim Moscovciuc

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Maxim Moscovciuc

Dřevařské inženýrství

Dřevařské inženýrství

Název práce

Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*)

Název anglicky

Physical – mechanical properties of thermally modified wood Iroko (*Milicia excelsa*) and Padouk (*Pterocarpus soyauxii*)

Cíle práce

Cílem práce je experimentálním způsobem zjistit vliv jednotlivých stupňů termické úpravy vybraných dřevin na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky.

Metodika

1. Úvod

2. Cíle práce

3. Analýza současného stavu:

- Teorie výroby termicky modifikovaného dřeva
- Teorie zjišťování vybraných fyzikálních vlastností dřeva
- Teorie zjišťování vybraných mechanických vlastností dřeva

4. Metodika práce:

- Výběr a příprava zkušebních vzorků
- Charakteristika technologie pro termickou úpravu dřeva
- Charakteristika zařízení na měření vybraných fyzikálních vlastností dřeva
- Charakteristika zařízení na měření vybraných mechanických vlastností dřeva
- Experimentální část a sledování vlivu jednotlivých stupňů termické

úpravy vybraných dřevin na sledované charakteristiky

– Výsledky a vyhodnocení

– Přínos pro vědu a praxi

6) Závěr



Doporučený rozsah práce

80

Klíčová slova

Termicky modifikované dřevo, Thermowood, tvrdost materiálu, barevnost materiálu

Doporučené zdroje informací

Mahmood, MR et al., 2013.: Thermal Stability and Decay Resistance Properties of Tropical Wood Polymer Nanocomposites (WPNC)

Mburu, F., et al. 2007.: Evaluation of thermally modified *Grevillea robusta* heartwood as an alternative to shortage of wood resource in Kenya: Characterisation of physicochemical properties and improvement of bio-resistance

REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.

Yan, YT., et al. 2015.. Enhancement of mechanical and thermal properties of Poplar through the treatment of glyoxal-urea/nano-SiO₂

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Adam Síkora

Elektronicky schváleno dne 27. 2. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 03. 05. 2020

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „**Fyzikální – mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*)**“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD., a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... dne.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD., za odborný dohled a pomoc při psaní této diplomové práce. Děkuji také Fakultě lesnické a dřevařské za možnost pracovat v laboratoři na České zemědělské univerzitě v Praze. Poděkování také patří rodičům a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

Abstrakt

Práce se zabývá posouzením vlivu termické modifikace na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). Na zkušebních tělesech byl zjišťován účinek termické modifikace na změnu barvy, Brinelovou tvrdost a rázovou houževnatost.

Zkoušky probíhaly dle normalizovaných postupů. Za účelem rozšíření poznatků o termické modifikaci byly prozkoumány vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti termicky upravených tropických dřevin, což umožnilo zjistit více o jejich vlastnostech a výhodách.

Po zpracování naměřených dat bylo zjištěno, že teplota termické úpravy 160 °C způsobuje ve dřevě zásadní změny, které mají ať už pozitivní nebo negativní charakter na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Všechny výše uvedené metody a literární rešerše umožnili provést studium kvality, plusy a minusy termické modifikace tropického dřeva.

Klíčová slova: modifikace dřeva, termická modifikace, barevná změna, Brinellova tvrdost, rázová houževnatost.

Abstract

Work deals with the assessment of the effect of thermal modification on selected physical and mechanical properties of Iroko (*Milicia excelsa*) and Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). The effect of thermal modification on color change was determined on the test specimens, Brinell hardness and razor toughness with a Charpy hammer.

The tests were performed according to standardized procedures. In order to expand knowledge about thermal modification, the mechanical and physical properties of thermally treated tropical woody plants were investigated, which made it possible to find out more about their properties and advantages.

After processing the measured data, it was found that the temperature of heat treatment 160 °C causes fundamental changes in the wood, which have either a positive or negative character on the physical and mechanical properties of wood. All the above methods and literature searches have made it possible to study the quality, pros and cons of thermal modification of tropical wood.

Key words: wood modification, thermal modification, color change, Brinell hardness, impact toughness.

Obsah

Úvod.....	14
1. Cíl práce	15
2. Analýza literárních poznatků k předmětné problematice	16
2.1. Termická modifikace dřeva.....	16
2.1.1. Základní charakteristika TMD	18
2.1.2. Technologie TMD	18
2.1.3. Teplota a její vliv na dřevo	21
2.2. Výhody a Nevýhody termicky modifikovaného dřeva	22
2.2.1. Výhody termicky modifikovaného dřeva.....	22
2.2.2. Nevýhody termicky modifikovaného dřeva	24
2.3. Použití termicky modifikovaného dřeva	24
2.4. Mechanické vlastnosti dřeva	27
2.4.1. Pevnost	27
2.4.2. Pružnost	27
2.4.3. Deformovatelnost.....	28
2.4.4. Tvrdost.....	28
2.4.5. Rázová houževnatost	29
2.5. Fyzikální vlastnosti dřeva.....	29
2.5.1. Hustota	30
2.5.2. Barva dřeva.....	30
2.5.3. Textura.....	30
2.5.4. Tepelně – izolační vlastnosti.....	31
2.5.5. Vůně	31
2.6. Chemické vlastnosti	31
2.7. Charakteristika vybraných dřevin	34
2.7.1. Iroko	34
2.7.2. Padouk	35
3. Metodika experimentální práce.....	37

3.1. Příprava zkušebních vzorků	38
3.1.1. Barva	38
3.1.2. Tvrdost podle Brinella	38
3.1.3. Rázová houževnatost	38
3.2. Termická modifikace	40
3.3. Měření	42
3.3.1. Barva	42
3.3.2. Tvrdost podle Brinella	44
3.3.3. Rázová houževnatost	47
3.4. Vyhodnocování	49
4. Výsledky a Diskuze	50
4.1. Barva	50
4.2. Tvrdost	57
4.3. Rázová houževnatost	58
5. Závěr	63
6. Seznam literatury a použitých zdrojů	64

Seznam Obrázků

Obr. 1. Termo dřevo. Zdroj: (www.svouimirukami.ru), 2019	19
Obr. 2. Zařízení pro TMD. Zdroj: (www.lesprominform.ru), 2013	19
Obr. 3. Uložiště pro TMD, vnitřní pohled. Zdroj: (www.lesprominform.ru), 2013.....	21
Obr. 4. Uložiště pro TMD, pohled během přípravy. Zdroj: (www.sm-piter.ru), 2014.....	21
Obr. 5. Termické modifikovaného dřeva. Změna barvy. Zdroj: (www.polvamvdom.ru), 2019 ..	23
Obr. 6. Sauna z TMD. Zdroj: (www.derevovdom.ru), 2018.....	25
Obr. 7. Podlaha u bazénu. Zdroj: (www.derevovdom.ru), 2019	26
Obr. 8. Altán z TMD. Zdroj: (www.derevovdom.ru), 2019	26
Obr. 9. Kuchyň z TMD. Zdroj: (www.dreveny-nabytek.cz), 2017	26
Obr. 10. Schema zkoušky tvrdosti podle Brinella. Zdroj: (www.tirenn.com), 2011.....	29
Obr. 11. Iroko jako strom a jako materiál. Zdroj: (www.les.novosibdom.ru), 2018.....	35
Obr. 12. Padouk. Zdroj: (www.les.novosibdom.ru), 2018.....	36
Obr. 13. Padouk. Zdroj: (www.les.novosibdom.ru), 2018.....	36
Obr. 14 Zkušební těleso používané pro zkoušku rázové houževnatosti (autor).....	39
Obr. 15 Zkušební vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti (autor).....	39
Obr. 16 Vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti na digitálních.....	40
Obr. 17. Spektrofotometr. Zdoj: www.plasticportal.cz , 2018.....	43
Obr. 18 Grafické znázornění metody CIE L*a*b* (www.mimoriarty.wordpress.com)	43
Obr. 19 Model zkoušení Brinellovy zkoušky tvrdosti (www.cdp-praha.cz)	44
Obr. 20 Tvrdoměr Duravision-30 (autor).....	45
Obr. 21 Upnutí zkušebního vzorku do přístroje, ukázka rozkreslené mřížky na tělese (autor) ...	46
Obr. 22 Charpyho kladivo	
Obr. 23 Umístění zkušebního telesa na podporách	
.....	48

Seznam Tabulek

Tab. 1 Technologické parametry termické modifikace vzorků Iroko	41
Tab. 2 Technologické parametry termické modifikace vzorků Padouk	42
Tab. 3 Kritéria vyhodnocování celkové změny barvy ΔE^* [38]	43
Tab. 4 Parametry tvrdost podle Brinella	46
Tab. 5. Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících změněné L^*	50
Tab. 6. Porovnání účinků teploty tepelné úpravy pomocí Duncanova testu na průběžné změny L^*	51
Tab. 7. Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice a^*	52
Tab. 8. Porovnání účinků teploty tepelné úpravy pomocí Duncanova testu na průběžné změny a^*	52
Tab. 9. Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice b^*	53
Tab. 10. Porovnání účinků teploty tepelné úpravy pomocí Duncanova testu na průběžné změny b^*	54
Tab. 11. Změna souřadnice barevného prostoru L^* , a^* a b^* a celková změna barevného prostoru ΔE^*	54
Tab. 12. Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice ΔE	55
Tab. 13. Porovnání účinků teploty tepelné modifikace pomocí Duncanova testu na základě změn barvy ΔE	56
Tab. 14. Vyhodnocení celkové změny barvy	56
Tab. 15. Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella (Iroko) a (Padouk)	57
Tab. 16. Statistické vyhodnocení vlivu teploty tepelné úpravy a typu dřeva na tvrdost	57
Tab. 17. Průměrné hodnoty Razové houževnatosti	58
Tab. 18. Statistické zhodnocení vlivu faktorů na rázovou houževnatost	59
Tab. 19. Duncanův test	61

Seznam Grafů

Graf 1. Průběh termické úpravy vzorků Iroko použitých pro experiment (autor).....	41
Graf 2. Průběhu termické úpravy vzorků Padouk použitých pro experiment (autor).....	41
Graf 3. Grafické znázornění průběhu změny souřadnice L^* vzhledem k teplotě termické modifikace	50
Graf 4. Grafické znázornění průběhu změny souřadnice a^* vzhledem k teplotě termické modifikace	51
Graf 5. Grafické znázornění průběhu změny souřadnice b^* vzhledem k teplotě termické modifikace	53
Graf 6. Grafické znázornění průběhu celkové změny barvy ΔE vzhledem k teplotě termické modifikace	55
Graf 7. Vliv interakce teploty termické modifikace a druhu dřeviny na hodnoty tvrdosti	58
Graf 8. Vliv druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti	59
Graf 9. Vliv teploty termické modifikace na rázové houževnatosti	60
Graf 10. Vliv interakce teploty termické modifikace a druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti.....	60

Seznam použitých zkratek a symbolů

aj - a jiné

apod - a podobně

atd. - a tak dále

cca – Cirka, přibližně

event. – eventuálně

např. - například

obr. – Obrázek

Tab. – tabulka

tj - to je

tzv – tak zvaný

TM – termická modifikace

ρ_w – hustota dřeva při vlhkosti w

m_w – hmotnost dřeva při obsahu vlhkosti w

V_w – objem dřeva při obsahu vlhkosti w

w – vlhkost vzorků

m_w – váha vzorků s vlhkostí w

m_0 – váha vysušených vzorků v sušárně

CIE L*a*b*- barevné prostory

MPa – megapascal

F – síla působící na kuličku

N – newton

kg – kilogram

% - procent

m – metr

°C – stupeň Celsia

Úvod

Dřevo je jedním z nejstarších přírodních materiálů na Zemi. Dřevo má strukturu přírodního kompozitního materiálu, který je tvořen chemickým komplexem celulózy, hemicelulóz a extraktů. Tyto polymerní látky nejsou rovnoměrně rozmístěny ve stěně dřevěných buněk a jejich obsah se mění z jedné morfologické oblasti do druhé. Dřevo je univerzální a obnovitelný materiál, který se v současnosti používá v mnoha různých oblastech, jako jsou stavební a obkladové materiály, výroba nábytku, chemické zpracování (buničina, papír, bioethanol atd.) a také jako palivo [1].

Jedním z nejdiskutovanějších témat v souvislosti se dřevem je jeho vztah k vlhkosti a vodě obecně. Pomineme-li, že pomocí zvýšené vlhkosti můžeme surové dřevo chránit, tzv. mokrá ochrana dřeva, tak v ostatních případech vnímáme hygrokopické vlastnosti dřeva převážně jako negativní. Není tedy divu, že již od počátků využívání dřeva člověkem v nejrůznějších odvětvích je kladen důraz a snaha nejen o pochopení, ale zejména o eliminaci této vlastnosti. Možným způsobem, jak proti této nepřízni bojovat, je tepelná modifikace dřeva. Kromě zlepšených hygrokopických vlastností má takto upravené dřevo též lepší biologickou odolnost proti škůdcům, zvýšenou rozměrovou stabilitu, díky změně barvy do tmavších odstínů může sloužit i jako jistá náhrada exotických dřevin, a to vše bez použití chemických prostředků [2].

V posledních letech zvýšila obliba tropických dřevin, z důvodu lepší dostupnosti. Hlavní důvod obliby jsou vlastnosti, kterými jsou tropické dřeviny známé a které jsou většinou lepší než u dřevin evropských. Hlavním cílem mé diplomové práce bylo experimentálně zjistit, jaký vliv má teplota při termické úpravě na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva vybraných druhů dřevin. Při porovnání získaných výsledků vzorků neupravených a termicky modifikovaných při různých teplotách, bude možné určit, jaký úroveň termické modifikace má pozitivní nebo negativní vliv na tyto vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti [6].

Hlavním cílem modifikování dřeva je zlepšit, popř. zachovat původní vlastnosti dřeva a co nejvíc eliminovat nežádoucí. Mezi nežádoucí vlastnosti dřeva, které lze ovlivnit modifikací patří zejména rozměrová stabilita a absorpce vody [3].

1. Cíl práce

Cílem práce je experimentálním způsobem zjistit vliv teploty termické modifikace vybraných dřevin na vybrané mechanické a fyzikální charakteristiky.

Na základě zadání diplomové práce můžeme cíle práce rozdělit do několika bodů:

1. Zesumarizování literárních poznatků na dané téma.
2. Experimentálním způsobem zjistit vliv teploty termické modifikace (20 °C, 160 °C, 180 °C a 210 °C) na vybrané charakteristiky fyzikálních (změnu barvy) a mechanických (rázové houževnatosti a tvrdosti podle Brinella) vlastnosti dřeva na dvou druhů tropických dřevin a to Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*).
3. Na základě získaných poznatků zhodnotit účinek termické modifikace s jeho pozitivními i negativními účinky na uplatnění termicky modifikovaného dřeva v praxi.

2. Analýza literárních poznatků k předmětné problematice

Dřevo je pravděpodobně nejstarším stavebním materiálem. Již v 8. až 11. století z důvodu zvýšení odolnosti dřeva vůči povětrnostním vlivům, a hlavně také biologickým škůdcům se dřevěné kůly opalovaly v ohni. Termická modifikace dřeva je způsob úpravy dřeva působením vysokých teplot. Současné technologie vychází ze starých a osvědčených metod, které používali již Vikingové. Aby jejich dřevěné lodě odolávaly korozivním účinkům slané vody, severští mořeplavci své dřevo opalovali. Novodobou historii této metody datujeme rokem 1990, kdy Finové tuto technologii zmodernizovali. Krátce řečeno, termo-dřevo je tepelně upravené dřevo, které bylo „upečeno“ a dosáhlo tím vyšší třídy trvanlivosti [7].

Tomuto žádanému stavebnímu materiálu se kromě zvýšené trvanlivosti zlepšují také další vlastnosti. Termicky modifikované dřevo reaguje podstatně méně na změny vlhkosti a má lepší rozměrovou stabilitu, což je důvod, proč je to vynikající materiál pro vnější opláštění, fasády, obložení sauny či podlahy na podlahové vytápění. Dřevo jednoduše absorbuje méně vlhkosti, než neupravené dřevo; má snížené riziko vzniku plísní. To vše při zachování přirozených vlastností dřeva včetně textury a sjednoceného barevného tónu [1].

2.1. Termická modifikace dřeva

Modifikované dřevo se díky svým vlastnostem začíná více uplatňovat na trhu. Hlavně díky jeho rozměrové stabilitě, vyšší odolnosti proti napadání dřevokaznými houbami, také jeho odolnějšímu povrchu a v neposlední řadě je téměř bezúdržbové při vhodné aplikaci. Termicky modifikované dřevo nemá negativní vliv na okolí, protože při výrobě se nepoužívají žádné chemické přípravky [11].

Jako modifikaci dřeva můžeme označit proces, jímž zlepšujeme jeho vlastnosti, přičemž materiál na konci životního cyklu výrobku nepředstavuje pro životní prostředí větší nebezpečí, než nemodifikované dřevo. Použití tepelného opracování pro modifikaci vlastností dřeva není nic nového, již v roce 1920 Tiemann prokázal, že se touto metodou dá docílit snížení RVD a následně i bobtnání dřeva [28]. Kollmann zase využil vysoké teploty a zhušťování dřeva pomocí lisování za horka a nazval tento produkt Lignostone. V Evropě je z tohoto hlediska v současné době nejúspěšnější patrně produkt s názvem Thermowood, patentovaný firmou Viitaniemi roku 1997. Hlavním záměrem tepelné modifikace rostlého dřeva je připravit materiál, aby co nejvíce splňoval tato kritéria:

1. Nižší hygroskopicitata.
2. Zvýšená rozměrová stabilita.
3. Zvýšená odolnost vůči dřevokazným houbám, hmyzu a plísním.
4. Zachování nebo i zlepšení mechanických vlastností (pevnost, tuhost, tvrdost).
5. Zachování nebo i zlepšení estetické stránky (barva, textura, lesk apod.).

Bourgeois a Bartholin [12] ke stručné definici doplňují, že pod termickou modifikací dřeva se rozumí regulované působení vysokých teplot, resp. pod hydro-termickou úpravou současně i vody. Požadované změny ve struktuře dřeva nastávají hlavně působením teploty v intervalu 150 °C (170 °C) až 260 °C, působící obvykle po dobu 15 minut až 24 hodin. Celkové změny jsou podmíněny i okolním prostředím, tj. či se tepelná úprava odehrává v inertní atmosféře, jaká je vstupní vlhkost apod [12].

Celý proces tepelné úpravy se rozděluje do fází, nejprve je řezivo vystaveno teplotě 130 °C a je takto vysušeno na téměř 0 % vlhkosti. Proces probíhá za atmosférického tlaku a ve vzduchu se sníženým obsahem kyslíku, aby nedošlo k případnému vzplanutí (do komory je během sušení také přiváděna vodní pára, která zabraňuje vznícení). Vysušené dřevo je dále vystaveno teplotám od 180 °C do 250 °C po dobu 2–3 hodin za stálé přítomnosti vodní páry ve speciálně upravených komorách z nekorozního materiálu [13].

V závěru výrobního procesu se dřevo ochlazuje pomocí zařízení, které vstřikuje vodu, která dřevo ochladí na teplotu okolo 90 °C a tím získává tepelně modifikované dřevo 4 % vlhkost. Následně se dřevo klimatizuje, kde doba trvání je odvislá od použitého dřeva a teploty v rozmezí 5–15 hodin [24].

Existují tři hlavní etapy termické modifikace dřeva:

1. Sušení je nejdelší proces, jehož trvání závisí na různých faktorech: druhu a tloušťce stromu a množství vlhkosti obsažené v materiálu. Zde se používá pára a teplo, teplota v komoře se zvyšuje ze 100 na 130 stupňů, což vede k tomu, že se vlhkost dřeva sníží téměř na nulu.
2. Termická modifikace - během této fáze teplota v komoře stoupá na 180-240 ° C. Pára v tomto případě, stejně jako v procesu sušení, slouží jako ochranné prostředí a zabraňuje spálení dřeva. Doba trvání této fáze je zpravidla 2-3 hodiny.
3. Chlazení - teplota během zavlažování postupně klesá na 80-90 stupňů. Výsledkem je, že vlhkost dřeva z nuly mírně stoupá - až na 4-8%. To je nezbytné, protože úplně suché dřevo je obtížné podrobit jakémukoli zpracování. Doba trvání této fáze se může pohybovat od 5 do 15 hodin [24].

2.1.1. Základní charakteristika TMD

Při termické úpravě dřeva dochází ke změnám jeho vzhledu. Podle druhu dřeva, délky a intenzity ošetření dochází k více nebo méně výrazným změnám barvy. Jeho tmavě hnědý odstín připomíná tvrdé dřeviny. Vliv na výslednou tmavost odstínu má hlavně použitá teplota.

Tepelně upravené dřevo se liší svou buněčnou strukturou od dřeva běžného. Ta se projevuje jeho větší stabilitou při vystavení stejnému typu klimatických podmínek. Co se týče rozměrových změn, ty jsou v porovnání s dřevem neupraveným přibližně poloviční. Díky zvýšené době trvanlivosti termodřeva není potřeba jej za účelem ochrany po dobu více než třiceti let jakkoliv chemicky ošetřovat. Navíc je ThermoWood lepším tepelným izolantem než dřevo přírodní [36].

Další charakteristikou termodřeva je to, že během ošetrovacího procesu je z něj odstraněna (vytěsněna) veškerá pryskyřice. Z toho vyplývá možnost snadnější aplikace povrchové úpravy a odstranění problémů s průnikem pryskyřice na povrch přes nátěr. Kombinace všech vyjmenovaných vlastností ThermoWood snižuje náklady spojené s údržbou. Nikde však není zaznamenána zvýšená odolnost dřeva vůči UV záření. ThermoWood šedne stejně tak jako dřevo tepelně neupravené [37].

Celý tento proces provádíme zejména kvůli zvýšení jeho užitečných vlastností a zlepšení jeho odolnosti v interiérech a zejména v exteriérovém použití.

2.1.2. Technologie TMD

Termická modifikace dřeva využívá při působení vysokých teplot na dřevo v určitém čase a za předem nastavených podmínek (tlak, teplota, trvání, prostředí atd.). V současnosti průmyslně používaná termická modifikace dřeva využívá působení teplot v rozsahu od 160 do 280 °C, někdy se uvádí užší rozsah od 180 do 260 °C. Teploty nižší než 140 °C způsobují malé, nevýrazné změny, zatímco teploty nad 300 °C již zapříčiňují degradaci dřeva, která vede k výrazné zhoršení jeho vlastností. Nejpoužívanější technologie termické modifikace dřeva zahrnují 5 procesů: ThermoWood® (Finsko), PLATO® (Holandská), technologie Menz-Holz (Německo), Francouzská síťová technologie, Americká Westwood technologie, které jsou používány nejvíce. V poslední době se objevili i novější technologie termické modifikace dřeva, jako například WTT (Dánsko), Firmolin (Nizozemsko) a Termovuoto (Itálie), které jsou zatím využívány v menší míře.

Všechny průmyslně používané technologie termické modifikace se liší hlavně v podmínkách termické modifikace [41].



Obr. 1. Termo dřevo. Zdroj: (www.svouimirukami.ru), 2019



Obr. 2. Zařízení pro TMD. Zdroj: (www.lesprominform.ru), 2013

a) Finská technologie Thermowood.

Nejvíce známá technologie, kterou používají velký počet výrobců. Stellac Oy je společnost, která je vývojářem a hlavním výrobcem potřebného vybavení. Tekmaheat Oy, Valutec Oy, italská společnost Baschild, francouzská společnost BCI-MBS (Le Bois technologie Perdyur). Technologie je zaměřená na zpracování měkkých dřevin. Teplota stoupá na 180-215 °C, proces trvá 45 hodin, někdy doba tepelného zpracování dosahuje až 96 hodin. Hlavní zařízení pro výrobu termické modifikovaného dřeva představují tlakové zařízení [20].

b) Holandská technologie PLATO.

Holandská společnost PLATO Wood je vývojářem této technologie, a proto se zabývá výrobou potřebného vybavení. Technologie je určena pro zpracování měkkých druhů dřevin. Pára se zahřeje v rozmezí od 170 do 210 °C. Cyklus trvá kolem 5-8 dní. Jeho vlastností je termická modifikace cyklickou hydrotermolýzou (tepelná hydrolýza) dřeva [21].

c) Francouzská síťová technologie.

Francouzský developer REI nabízí zpracování dřeva pomocí inertního plynu. Někdy jeho aplikace vede k tvorbě dusíku v dřevě, což je hlavní nevýhoda technologie. Teplota je od 180 °C do 220 °C, tepelné zpracování trvá od 40 do 62 hodin. Firma REI aktivně propaguje na trhu komory recertifikace dřeva o objemu užitečného zatížení od 1,5 do 8 m³ [28].

d) Německá technologie Menz-Holz.

V případě použití technologie německé společnosti se sušení provádí v organickém prostředí, stojí za to si uvědomit - neškodné oleje. Doba cyklu je 32-54 hodin, teplota je kolem 180-230 °C. Všestrannost technologie spočívá také v tom, že je vhodná nejen pro zpracování měkkých druhů dřevin ale i pro zpracování jehličnatých a cenných druhů tvrdého dřeva [25].

e) Americká Westwood technologie.

Jedna z prvních technologií, která se vyvinula před 20 lety a opakovaně podstoupila různá zlepšení. S pomocí této technologie se zpracovává především tvrdé dřevo. Při použití této metody se dřevo pomalu zahřívá při teplotě kolem 220-240 °C. Doba trvání termické modifikace je asi 48 hodin [26].

V ostatních evropských zemích v Kanadě a v Rusku byly zavedeny různé technologie termické modifikace podobné výše uvedeným technologiím. Způsoby termické modifikace dřeva mohou být rozděleny následujícím způsobem: zvýšení teploty v komoře na 130-150 °C a sušením při vysoké teplotě s poklesem na téměř nulové vlhkosti. Následkem toho se zvýší teplota v komoře a v důsledku toho samotné dřevo v nasycené vodní páře na teplotu 200-240 °C. V tomto případě je v komoře vytvořen mírný přebytek tlaku ve srovnání s atmosférickým tlakem. V této fázi dřeva jsou dány určité vlastnosti a barvy, tj. E. získává se nový materiál – termo - dřevo. Potom se teplota snižuje a vlhkost dřeva se zvýší na 4-6%.

TMD se prodává a zpracovává více než 10 let v zemích jako Belgie, Francie, Finsko a Anglie. Ale i dnes je tento výrobek mezi inovačními. Ve všech evropských zemích byly průběžně prováděny různé studie a práce na zlepšení technologie pro získání TM [30].



Obr. 3. Uložiště pro TMD, vnitřní pohled. Zdroj: (www.lesprominform.ru), 2013



Obr. 4. Uložiště pro TMD, pohled během přípravy. Zdroj: (www.sm-piter.ru), 2014

2.1.3. Teplota a její vliv na dřevo

Termické modifikace se uskutečňuje v teplotním rozsahu většinou od 180 do 260 °C. Při nižších teplotách než 140 °C dochází k nepatrným změnám vlastností materiálu, a naopak při překročení hranice 300 °C již dochází k degradaci struktury [15].

Při postupném zahřívání dřeva nad 100 °C dochází k uvolňování vody vázané v buněčných stěnách polymerního řetězce, z nich vzniká kyselina octová, kyselina mravenčí nebo metanol. Postupným zvyšováním teploty se uvolňuje oxid uhličitý. Dalším zvyšováním teploty dochází ke zvětšení rozsahu reakcí, které jsou spojeny s degradací polymerů buněčných stěn. Okolo teploty

270 °C mají již probíhající reakce exotermní charakter – reakce, při kterých je teplo uvolňováno, což se významně projevuje v reakční kinetice [19].

Vůči účinkům vysokých teplot jsou nejméně odolné složky dřeva hemicelulózy, které se rozkládají při teplotách 170–240 °C [29].

Tepelnou degradaci hemicelulózy významně ovlivňuje přítomnost acetylových skupin, které jsou teplotně nestabilní a tvoří kyselinu octovou, která coby katalyzátor urychluje rozklad polysacharidů. Shimizu (1972) uvádí, že redukcí acetylových skupin v hemicelulóze se zvýší její tepelná stabilita. Degradace hemicelulózy zvyšuje podíl polysacharidové krystalinity ve dřevě.

Celulóza je vůči teplotám odolnější než hemicelulóza. Krystalická část celulózy je nejvíce degradována při teplotách od 300 do 400 °C. Během tepelné úpravy prováděné ve vzdušném prostředí dochází k produkci karbonylových a karboxylových skupin [31, 32].

2.2. Výhody a Nevýhody termicky modifikovaného dřeva

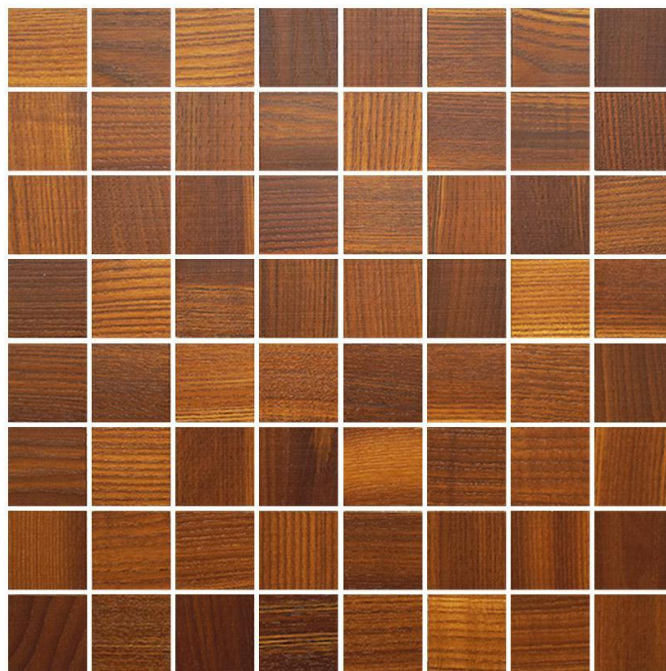
2.2.1. Výhody termicky modifikovaného dřeva

Termicky modifikované dřevo (TMD) je přírodní materiál, který je naprosto šetrný k životnímu prostředí a má řadu jedinečných vlastností ve srovnání s tradičním dřevem z okrasných a stavebních materiálů [36].

1. Pozitivní změna vnitřní struktury dřeva.
2. Lepší fyzikální a mechanické vlastnosti.
3. Tepelná vodivost je snížena o 20 - 25 %.
4. Vylepšení tepelně izolačních vlastností.
5. Nízká rovnovážná vlhkost okolo 5 - 7 %.
6. Absorpce vlhkosti je snížena o 30 – 50 %.
7. Odstranění pryskyřice a výživných látek.
8. Odolnost proti houbám a plísním.
9. Odolnost proti dřevokazným škůdcům.
10. Zvýšení odolnosti proti hnilobě.

11. Aplikace možná i bez povrchové úpravy.
12. Životnost při použití v exteriéru je 30 let.

Vlivem termické modifikace u dřeva dochází ke změně fyzikálních a dalších vlastností. Tato změna je způsobena hlavně tepelnou degradací celulózy, hemicelulózy a ligninu. Díky menšímu obsahu těchto složek termické modifikované dřevo má více vzduchu a proto má lepší tepelně izolační vlastnosti [39]. Na obrázku číslo 5 je možné vidět změnu textury a barvy dřeva při termické modifikace. V podmínkách běžné proměnlivé vlhkosti materiál TMD má rozměrovou a tvarovou stabilitu. Pod tím můžeme rozumět, že materiál nepraská nebo tvarově zakříví, nekrouťí nebo neprohýbá. Evidentní snížení bobtnání dřeva má významný vliv na lepší rozměrovou a tvarovou stálost výrobku [14]. Také u materiálu termické modifikovaného dřeva dochází ke snížení tepelné vodivosti dřeva zhruba o 20-25 %, a zlepšení tepelně izolačních vlastností dřeva. Termické modifikované dřevo může být použito na sedací plochy v saunách a parních lázních, protože nenahřívá se na slunce a v teplých místech. Termické modifikované dřevo je možné používat i bez povrchového ošetření, proto může být i jako fasádní obklad. Ale když materiál nebude povrchově ošetřen není možné garantovat, že to nebude mít vliv na jeho životnost, vznik trhlin a nestejněměrné barevné změny během času. Materiál z termické modifikovaného dřeva je naprosto ekologicky, u kterého i bez ošetření žádnými ochrannými prostředky můžeme očekávat minimální životnost až 30 let [39, 9, 10].



Obr. 5. Termické modifikovaného dřeva. Změna barvy. Zdroj: (www.polvamvdom.ru), 2019

2.2.2. Nevýhody termicky modifikovaného dřeva

1. Termicky modifikované dřevo je vysoce křehký materiál, proto vyžaduje opatrnou manipulaci jak při výrobě, tak i v procesu provozu. Použitelnost tepelně upraveného dřeva jako stavebního materiálu může být snížena kvůli hodnotám mezi pevnosti, které se při tepelné úpravě dřeva snižují o 20–30 %.

2. V současné době nebyly technologie tepelného zpracování dřeva vyvinuty pro efektivní použití materiálů v případě kontaktu se půdou. Ve většině případů nelze tepelné dřevo zakopat do země.

3. Dřevo stejně jako většina přírodních materiálů je ošetřené ultrafialovým zářením. V důsledku dlouhodobého působení přímému slunečnímu záření se barva postupně mění z hnědé na hnědou s šedivým nádechem. Ultrafialové záření může také způsobit malé praskliny na povrchu, pokud dřevo nebylo natřeno lakem nebo barvou. Abyste tomu zabránili, doporučuje se používat běžnou pigmentovanou povrchovou ochranu před UV zářením.

4. Mechanické ošetření termicky modifikovaného dřeva vede ke vzniku dřevního prachu, který je škodlivý pro lidské dýchání.

5. Některé druhy termicky modifikovaného dřeva mají vůni spáleného dřeva. Jeho zvětvávání může trvat poměrně dlouhou dobu.

6. Významné náklady na termicky modifikované dřevo, které se vztahují na prvotřídní materiály. Výrobci se snaží zdůraznit, že vysoká cena tepelného dřeva je odůvodněna následnými úsporami během provozu.

7. Z hlediska marketingu je nevýhodou termicky modifikovaného dřeva to, že je často obtížné i pro odborníky rozlišit tepelné modifikované dřevo od běžného dřeva nebo dřeva impregnovaného speciálními složkami.

2.3. Použití termicky modifikovaného dřeva

Obrovský rozsah použití termicky modifikovaného dřeva je způsoben třemi hlavními vlastnostmi materiálu: trvanlivost, nízká hygroskopicitata a rozměrová stabilita. Je důležité si uvědomit, že v některých oblastech se kombinace několika nebo všech uvedených vlastností stává jedinečnou.

Používá se termické modifikované dřevo (TMD):

1. V konstrukci a obložení domů (vnitřní a vnější dekorace domu, falsh-fachwerks, dekorativní trámy, podšívka, blokový dům, stěnové panely, imitace baru, zimní zahrady, schody, altány).
2. Pro výrobu dveří, oken, jiných konstrukčních prvků, kde je důležitá stabilní geometrie produktu.
3. Pro výrobu nábytku (včetně kuchyňského nábytku, pultu, koupelnového nábytku a umyvadel z masivního dřeva, nábytku do interiéru a zahrady).
4. Pro dokončení saun, van, bazénů, koupelen, kotvicích lodí, jachet, člunů, lodí a jiné předměty, které mají přímý kontakt s vodou.
5. Pro výrobu podlah (parkety, parketové desky, vlysy, podlahové desky), včetně různých teplých podlah.
6. Při restaurování.
7. Pro výrobu hudebních nástrojů.
8. Pro jakékoliv konstrukční řešení.
9. Oplocení.
10. Návrh krajiny.
11. Zboží šetrné k životnímu prostředí pro děti (nábytek, hračky) [17, 18].

TMD je jedná se o čtvrtinu, která lépe tepelně izoluje místnost než běžné dřevo. Tím se výrazně sníží náklady na rozněcování sauny a zvýší se pohodlí. Proto je lepší použít TMD pro výrobu sauny.



Obr. 6. Sauna z TMD. Zdroj: (www.derevovdom.ru), 2018

TMD chráněné proti hniloby, protože polysacharidy stromů se během tepelného zpracování rozkládají, což zabraňuje tvorbě plísní a jiných hub. Co umožňuje jeho použití venku.



Obr. 7. Podlaha u bazénu. Zdroj: (www.derevovdom.ru), 2019



Obr. 8. Altán z TMD. Zdroj: (www.derevovdom.ru), 2019

Po tepelném zpracování se barva dřeva mění a vypadá dražší a krásnější, proto se často používá nejen v exteriéru, ale i v interiéru, například pro výrobu kuchyní.



Obr. 9. Kuchyň z TMD. Zdroj: (www.dreveny-nabytek.cz), 2017

Potenciální rozsah tepelného dřeva je tak široký jako rozsah běžného dřeva: součásti, hudební nástroje, bytové doplňky, malé architektonické formy, zahradní a parkové konstrukce atd. Mohou být vyrobeny z tepelného dřeva.

V současné době je hlavní oblastí vědeckého výzkumu využití termické modifikovaného dřeva jako materiálu nosných konstrukcí. Funkce termické modifikovaného dřeva spočívají v

udržování rozměrové stability a působení vnějšího prostředí. Kromě lepených nosníků je na trhu ještě další konstrukční materiál - tepelně upravené masivní (profilové) nosníky [18].

2.4. Mechanické vlastnosti dřeva

Dřevo má různé vlastnosti, nejdůležitější jsou:

1. Mechanické: pevnost, tvrdost, deformovatelnost, charakteristiky výkonu, technologické charakteristiky, odolnost proti opotřebení, schopnost zadržovat spojovací prvky, pružnost;
2. Fyzikální: Vzhled (textura, lesk, zbarvení), vlhkost (smrštění, bobtnání, hygroskopičnost, hustota), tepelně (tepelná vodivost), zvuk (akustická impedance, zvuková vodivost), elektrické (dielektrické vlastnosti, elektrická vodivost, dielektrické pevnosti);
3. Chemické vlastnosti [43].

2.4.1. Pevnost

Pevnost - schopnost dřeva odolávat destrukci mechanickými silami charakterizovanými pevností v tahu. Síla dřeva závisí na směru působení zátěže, druhu dřeva, hustotě, vlhkosti, přítomnosti vad. Významný účinek na pevnost dřeva je zajištěn pouze vázanou vlhkostí obsaženou v buněčných membránách. Se zvýšením množství vázané vlhkosti klesá pevnost dřeva (zejména při obsahu vlhkosti 20-25%). Další zvýšení vlhkosti nad hygroskopičnost (30%) nemá vliv na pevnost dřeva. Indexy pevnosti lze srovnávat pouze se stejnou vlhkostí dřeva. Kromě vlhkosti ovlivňuje doba zatížení také ukazatele mechanických vlastností dřeva [29].

2.4.2. Pružnost

Pružnost je schopnost dřeva deformovat se pod vlivem vnějších sil. Technologicky je ohýbací operace založena na schopnosti dřeva relativně snadno se deformovat, když je vystaveno ohýbacím zařízením, zejména když je zahřáté a mokré. Během ochlazování a sušení pod zatížením se podstatná část elastických deformací stává zbytkovou, nový tvar součásti je fixován. Mokré dřevo má lepší ohybovou schopnost než suché dřevo. Největší ohýbací schopnost mají listnaté dřeviny (dub, jasan) a difuzní cévka (buk, bříza). U jehličnanů je tato schopnost velmi nízká [45].

2.4.3. Deformovatelnost

Při krátkodobém zatížení dochází u dřeva převážně k elastickým deformacím, které po zatížení zmizí. Do jisté míry je vztah mezi stresem a napětím téměř lineární (Hookeův zákon). Hlavním indikátorem deformovatelnosti je koeficient proporcionality - modul pružnosti. Modul pružnosti podél vláken je $E = 12-16$ GPa, což je 20 krát více než napříč vlákny [35]. Čím větší je modul pružnosti, tím pevnější je dřevo. Se zvýšením obsahu vázané vody a teploty dřeva klesá její tvrdost. Zmizí při zahřátí nebo zvlhčení. Protože dřevo sestává převážně z polymerů s dlouhými molekulami flexibilního řetězce, jeho deformovatelnost závisí na době působení zatížení. Mechanické vlastnosti dřeva, stejně jako ostatní polymery, jsou studovány na základě obecné vědy o reologii. Tato věda zvažuje obecné zákony deformace materiálů pod vlivem zatížení, s přihlédnutím k časovému faktoru [40].

2.4.4. Tvrdost

Tvrdost je vlastnost dřeva, která odolává zavedení těla určitého tvaru. Tvrdost koncového povrchu je vyšší než tvrdost bočního povrchu (tangenciální a radiální) o 30% u tvrdého dřeva a 40% u jehličnanů. Podle tvrdosti lze všechny druhy stromů rozdělit do tří skupin: 1) měkké - 40 MPa a méně (borovice, smrk, cedr, jedle, jalovec, topol, lípa, osika, olše, kaštan); 2) tvrdý - 40,1 - 80 MPa (modřín, sibiřská bříza, buk, dub, jilm, ořech, jabloň, jasan); 3) velmi tvrdé - více než 80 MPa (bílá akát, habr, pistácie, tis) [46].

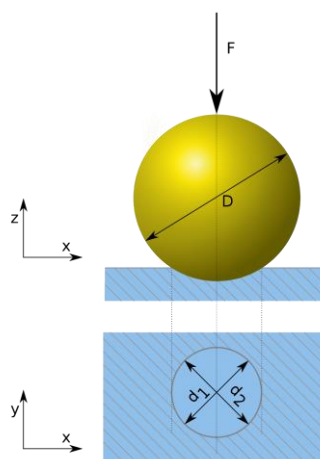
Tvrdost dřeva je nezbytná při zpracování reznými nástroji: frézování, řezání, loupání a také v případech, kdy je při instalaci podlah vystaveno otěru, zábradlí schodišť [47]. Na obrázku 10 je schema zkoušky tvrdosti podle Brinella. Ocelová kulička je vtlačována statickým zatížením do ploch dřeva.

Tvrdost HB je dána vztahem:

$$H_B = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

F – síla půdobicí na kuličku [N]

D – průměr kuličky [mm]



Obr. 10. Schema zkoušky tvrdosti podle Brinella. Zdroj: (www.tirenn.com), 2011

2.4.5. Rázová houževnatost

Rázová houževnatost charakterizuje schopnost dřeva absorbovat práci při nárazu bez destrukce a je určována během zkoušek ohybem. Rázová houževnatost tvrdého dřeva je v průměru dvakrát větší než rázová houževnatost jehličnatého dřeva. Tvrdost rázem se stanoví položením ocelové kuličky o průměru 25 mm z výšky 0,5 m na povrch vzorku, jehož velikost je větší, čím nižší je tvrdost dřeva [49].

Rázová houževnatost, určená pomocí Charhyho kladiva, je dana vztahem:

$$A_W = \frac{W}{b \cdot h} * [J * cm^{-2}] \quad (2)$$

A_W – rázová houževnatost,

W – práce spotřebovaná přeražení tělesa (J),

b, h – rozměry tělesa v radiálním a tangenciálním směru (cm).

2.5. Fyzikální vlastnosti dřeva

Dřevo je cenný přírodní materiál, má výjimečné fyzikální vlastnosti, je obnovitelný a dá se všestranně využívat. Každý kousek dřeva je unikátní. Pro dřevo je charakteristické, že se jeho vlastnosti v jednotlivých směrech liší a jeho vnitřní struktura ovlivňuje výsledné materiálové vlastnosti, s čímž je třeba počítat při posuzování jeho vlastností. Do fyzikálních vlastností dřeva a materiálů na bázi dřeva se zařazují: povrchové a vzhledové vlastnosti, vlhkost a vlastnosti a s ní spojené, hustota, barva, textura, atd. [61].

2.5.1. Hustota

Hustota dřeva je jednou z nejvýznamnějších charakteristik dřeva, která významně ovlivňuje většinu fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Můžeme ji tedy považovat za nejlepší kritérium pro posuzování vlastností dřeva. Vyjadřuje se podílem hmotnosti dřeva a jeho objemu a udává se zpravidla v kg/m³. Hustota dřeva se ovšem mění s jeho vlhkostí, a proto je nutné vždy uvádět, pro jakou vlhkost dřeva je uvedená hustota platná. Běžně se udává hustota při vlhkosti 12%, protože to je průměrná hodnota vlhkosti, při které jsou výrobky užívány. Hustotu dřeva při dané vlhkosti je možné odečíst z nomogramu. V našich podmínkách se hustota dřeva pohybuje v širokém intervalu [59].

2.5.2. Barva dřeva

Barva dřeva je charakteristická pro jednotlivé dřeviny. Je vlastností velmi proměnlivou, měnící se vlivem světla, vzduchu a vlhkosti. Také je podmíněna klimatickými podmínkami, ve kterých je dřevo uloženo. Dřeviny mírného pásma mají zpravidla světlejší zbarvení než dřeviny tropického pásma. Barva se mění také v důsledku technologických operací, jako je paření, moření a další způsoby povrchové úpravy dřeva [48].

Bělové dřevo některých dřev je náchylné na napadení dřevoz-barvujícími houbami. Tyto houby svou činností způsobují barevné změny, ale nemění vlastnosti dřeva. Poškození má tedy výhradně estetický charakter. Například u dřeva borovic často dochází k tzv. zamodráním bělí, dubové dřevo v důsledku sloučení tríslování se solemi železa a působením vody černá, barva bělového borového dřeva je po plavení nažloutlá, dřevo břízy zoranžová [50]. Pařením dřeva buku se dosáhne rovnoměrného načervenalého zbarvení. V nábytkářství se dřevo často barví chemikáliemi nebo se moří. Moření dřeva může být povrchové a hloubkové (impregnace). Velmi dobře se barví dřeva listnáčů s roztroušeně porovitou stavbou například dřevo olše se imituje na mahogon, hrušky na eben. Nejhůře se upravují dřeva jehličnanů. A při pomoci spektrofotometra můžeme měřit barvu dřeva [34].

2.5.3. Textura

Textura dřeva se vytváří kombinací jednotlivých makroskopických znaků. Je typická pro určitý řez a druh dřeva. Texturu pozorujeme nejlépe na povrchu opracovaného dřeva. U některých dřevin je základní struktura dřeva obohacena například o zvláštní texturu. Mezi zvláštnosti textury řadíme například tyto speciální struktury:

- Očková kresba: Pro svoji zajímavou texturu je velmi vyhledávána v nábytkářském průmyslu. Očka představují zárodky nevyvinutých větví, tzv. zarostlé spící pupeny. Je typická pro dřevo javoru, kde mohou očka ojediněle dosahovat větších rozměrů, nebo se vyskytuje větší množství drobných oček. Očková kresby se také může vyskytovat u dřeva topolu, vrby, ořešáku aj. [63],
- Kořenice: Toto dřevo se získává z oddenkové části kmene (místo mezi kmenem a kořeny)- Rozmanitá kresba je výsledkem vrůstání letokruhů kořenů do spodní kmenové části. K charakteristickým znakům kořenicové dýhy patří i vlnitý lesk. Kořenicová dýha je v nábytkářství velmi ceněna. Kořenicí lze získat z jakékoliv dřeviny, ale nejčastěji se získává ze dřeva ořešáku, jasanu, javoru, topolu a břízy [33].

2.5.4. Tepelně – izolační vlastnosti

Tepelná vodivost je vlastnost vedení tepla. Tento ukazatel závisí na dalších vlastnostech dřeva, vlhkosti a hustotě. Mokrý dřevo má nižší tepelnou vodivost. A s hustotou je vztah opačný, to znamená, že hustší dřevo lépe přenáší teplo. Tepelné izolační vlastnosti jsou důležité pro stavbu, protože účel domu, včetně izolace, je z nepříznivých účinků nízkých teplot. Pro tyto účely jsou dřevěné stěny vhodnější, protože zeď ze 100 mm dřevěných trámů má stejnou tepelnou vodivost jako cihlová zeď o tloušťce 510 mm [51]. Termicky upravené dřevo má vysokou izolační vodivost ideální materiál pro zdobení vany a sauny, protože jeho tepelné izolační vlastnosti jsou o 30 procent vyšší než u přírodního dřeva.

2.5.5. Vůně

Termicky modifikované dřevo získává charakteristickou vůni podobnou karamelu. Příčinou jsou vyluhovatelné organické produkty (VOC) vznikající rozkladem hemicelulóz. Termicky modifikovaná dřeva s vyšším podílem těchto vyluhovatelných látek v určitém smyslu zapáchají, což občas bývá drobnou překážkou jeho širšího využití v interiérech budov [52].

2.6. Chemické vlastnosti

Dřevo se skládá převážně z organických látek (99% celkové hmotnosti). Elementární chemické složení dřeva různých druhů je téměř stejné. Absolutně suché dřevo v průměru obsahuje

49% uhlíku, 44% kyslíku, 6% vodíku, 0,1-0,3% dusíku. Při spalování dřeva zůstává jeho anorganická část - popel. Složení popela zahrnuje vápník, draslík, sodík, hořčík a další prvky.

Uvedené chemické prvky tvoří hlavní organické látky: celulózu, lignin a hemicelulózy [64, 31].

2.6.1. Celulóza

Celulóza je přirozeně se vyskytující polymer, polysacharid s dlouhým řetězcem. Celulózový vzorec $(C_6H_{10}O_5)_n$, kde n je stupeň polymerace, se rovná 6000-14000. Je to velmi perzistentní látka, nerozpustná ve vodě a běžných organických rozpouštědlech (alkohol, ether atd.), Bílá. Trsy celulózových makromolekul - nejtenčí vlákna se nazývají mikrofibrily. Tvoří celulózový skelet buněčné stěny. Mikrofibrily jsou orientovány hlavně podél dlouhé osy buňky, mezi nimi je lignin, hemicelulóza a voda [30].

2.6.2. Lignin

Lignin je polymer aromatické povahy (polyfenol) se složitou strukturou; obsahuje více uhlíku a méně kyslíku než celulóza. S touto látkou je spojen proces lignifikace mladé buněčné stěny. Lignin je chemicky nestabilní, snadno oxidovatelný, interaguje s chlorem a rozpouští se při zahřívání v zásadách, vodných roztocích kyseliny sírové a jejích kyselých solí [55].

2.6.3. Hemicelulózy

Hemicelulózy jsou skupina polysacharidů, které zahrnují pentosany $(C_5H_8O_4)_n$ a hexosany $(C_6H_{10}O_5)_n$. Hexosanová formulace je na první pohled identická s celulózovou formulí. Stupeň polymerizace ve všech hemicelulózách je však mnohem menší a činí 60-200. To ukazuje na kratší řetězec molekul a nižší odolnost těchto látek ve srovnání s celulózou [29].

Deriváty celulózy jsou široce používány. Když celulóza interaguje s roztoky hydroxidu sodného, kyseliny dusičné a kyseliny sírové nebo acetanhydridu, umělých tkanin (střížových, viskózových a acetátových hedvábí), kordonových vláken pro výrobu automobilových a leteckých pneumatik, celofánu, celuloidů, nitro-laků, nitro-lepidel a ostatních produktu [57].

Při interakci vodných roztoků kyselin se dřevem dochází k hydrolýze celulózy a hemicelulóz, které se mění na jednoduché cukry (glukóza, xylóza atd.), které lze chemicky

zpracovat na xylitol, sorbitol a další produkty. Průmysl hydrolyzy se však zaměřuje hlavně na následné biochemické zpracování cukrů [54].

K hydrolytické reakci dochází při poměrně vysoké teplotě (150-190 °C). Při chlazení hydrolyzátu (vodný roztok jednoduchých cukrů) se vytvářejí páry, z nichž se získá furfural. Používá se při výrobě plastů, syntetických vláken (nylon), pryskyřic, výroby léčiv (furatsilina atd.), Barviv a dalších produktů [28].

Dalším zpracováním hydrolyzátu se získají krmná kvasnice, ethylalkohol (ethanol) a oxid uhličitý. Ethanol se získává pouze z jehličnatého dřeva, používá se jako rozpouštědlo a stále více jako palivo [56].

Při zahřívání dřeva bez vzduchu dochází k pyrolýze. V důsledku pyrolýzy se tvoří uhlí, kaše a plyny. Uhlí, které se vyznačuje vysokou sorpční schopností, se používá k čištění průmyslových roztoků, odpadních vod, při výrobě cukru, při tavení neželezných kovů, při výrobě léčiv, polovodičů, elektrod a pro mnoho dalších účelů [59].

Zizka - roztok rozkladných produktů, se používá při výrobě antiseptik, fenolů, kyseliny octové, methylalkoholu, acetonu. Jako palivo se používají plyny vznikající při pyrolýze dřeva [40]. Výtažky jsou surovinou pro dřevařský průmysl kromě nekvalitního dřeva. Extrakce pryskyřice (pryskyřice) z jehličnanů se provádí odpichováním. Za tímto účelem se na povrch kmenů borovice nebo cedru aplikuje při pádu speciální rána (carr), ze které pryskyřice proudí do kónického přijímače. Zpracování gumy se provádí v dřevařských chemických podnicích, kde těkavá část, terpentýn a kalafuna jsou vařeny vodní párou [62].

Terpentýn je široce používán jako rozpouštědlo v malířském průmyslu pro výrobu syntetického gáforu. Kafr se používá při výrobě celulózy, laků a filmu. Kalafuna se používá při výrobě pryže, papíru, nitro-laků, elektrických izolačních materiálů atd.

Taniny používané v koženém obvazu se získávají z vrbové kůry, smrku, modřínu, jedle a také z dubového a kaštanového dřeva [64].

2.7. Charakteristika vybraných dřevin

2.7.1. Iroko

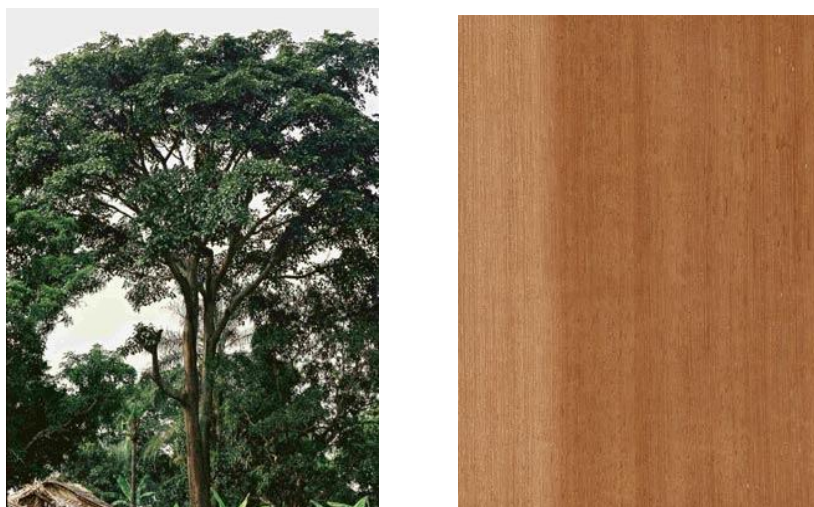
Iroko (*Milicia excelsa*) rodina *Moraceae* (Mulberry). Původní jméno bylo uděleno na počest Senhora Milicia, manažera státu, který se v současnosti nazývá Mozambik. *Excelsa* znamená latinu vysoko nebo dlouho. Synonymum je jméno *Chlorophora excelsa*. Další názvy: Mvule, Odum, platýs, volant Moreira, africký dub, Oroko, Osan. Iroko roste v rozlehlých oblastech a jeho lesy se táhnou od východu na západ od celého afrického kontinentu, ale nejčastěji se toto plemeno nachází v lesích táhnoucích se od Pobřeží slonoviny po Kamerun [5].

Strom Iroko může dosáhnout výšky 48 m při průměru kmene až 3 m. Comel je prakticky nepřítomný a kmen má během prvních 21 m téměř uzlů. Kůra má bledě popelově šedou barvu, která se mění v černou. Listy mladých stromů nahoře mají drsný povrch připomínající brusný papír a dole jsou pokryty lehkou chmýří. Tvar listů je eliptický nebo oválný, velikost od 10 cm na šířku do 25 na délku. Dřevo má širokou škálu barev od světle po tmavě hnědou. Bílou dřevinu lze snadno rozeznat od zralého dřeva - má bledě matnou hnědou barvu. Často existují tmavé pruhy a čáry. Průměrná hustota dřeva je 0,55 (hmotnost sušeného dřeva / objem čerstvě řezaného dřeva), což odpovídá hustotě vzduchu sušeného na vzduchu 672 kg / m³. Barva a vůně nejsou významné. Povrch dřeva je středně lesklý, vlákna jsou propletena [38].

Textura je středně velká a rovnoměrná. Možná, v důsledku poškození stromu v buněčné dutině, lze najít uhličitán vápenatý, který tvoří pevné sekce, jako je kámen, ve dřevě. Pokud porovnáme Iroko s Teakem, pak tyto horniny mají téměř stejné pevnostní charakteristiky, tvrdost a odolnost vůči aplikovaným zatížením. Iroko je však v ohybu o něco slabší než Teak a má podél vláken nižší hustotu [5].

Dřevo suší dobře a rychle bez problémů. Existuje malá tendence k rozdělení a změně geometrie. Poměr vysychání: 2,8% radiální; 3,8% tangenciální; 8,8% obj. Iroko je mimořádně odolné a nikdy nevyžaduje konzervační látky. Na bělici se však útočí vrtáním červů. Iroko se používá tam, kde je nejdůležitější pevnost a odolnost. Doporučuje se použití tohoto dřeva pro výrobu stolních desek s vysokou intenzitou použití. Používá se při výrobě okenních rámců, parapetů, dveří, dých, nábytku a při stavbě lodí. Jak vidíte, mnoho oblastí použití iroko patří do výklenku teaku, protože iroko plní téměř stejnou funkci jako teak, ale za mnohem nižší cenu. Iroko proto lze bezpečně nazvat lidovou nebo masivní náhražkou stromů za elitní teak [53].

Obecně platí, že iroko dřevo funguje dobře a pohodlně. Desky obsahující kamenité inkluze působí na nástroj jako brusný papír. Hřebíky a šrouby dobře drží, snadno drží pohromadě. Před leštěním se doporučuje základní nátěr, v takovém případě bude povrch vysoce lesklý [53].



Obr. 11. Iroko jako strom a jako materiál. Zdroj: (www.les.novosibdom.ru), 2018

2.7.2. Padouk

Padouk - *Pterocarpus soyauxii*. Název pochází z řeckého slova „ptero“, což znamená křídlo a „carpus“, což znamená masitý a šťavnatý stonek ovoce. Specifický epiteton naznačuje, že rostlina pochází z Indie. V pantropických oblastech roste nejméně 70 druhů padouků. Kromě toho je Padouk, který je filipínského původu a nazývá se zde Narra, známý také jako new guinejský mahagon, barmský mahagon. Často se kořen padouků nazývá Amboyne, který je oblíbený ve výrobě dýh. Velké množství poddruhů *Pterocarpus* je komerčně známé jako Padouk [21].

Padouk je rodák z Malajsie, Indonésie a Filipín. Přes tuto skutečnost je velmi rozšířený po celé jihovýchodní Asii a Austrálii. Padouk je nádherný, krásný strom s rozprostřenou korunou, dosahující výšky 30 metrů a průměru kmene až 2 m. Jeden z nejúžasnějších stinných tropických stromů. Má širokou korunu, dlouhé větve se téměř dotýkají země, podobné větvím plačící vrby. Listy *Cirrus* jsou tmavé barvy se nazelenalým nádechem nahoře a světle tmavě zelenou na zádech. Strom lze říci, že je vždyzelený, ale někdy stále listy. K tomu dochází v době klimatických změn, ale pak nové listy okamžitě rostou. Semena mají zaoblený tvar s křídly. Kůra při rozštěpení nebo zranění vydává jasně červenou bělinu. Padouk je uznáván jako národní strom Filipín [65].

Padouk je masivní tvrdé dřevo s celou řadou barev od světle žluté do sytě červené, které se vyskytuje téměř ve všech odrůdách *Pterocarpus*. Padovské dřevo z Filipín je tříděno podle barvy.

Světlejší dřevo je umístěno jako žlutá a tmavší dřevo - červená. Vlákná jsou často rovná, ale někdy propletená a vytvářejí tak zajímavý vzor. Při práci se dřevem je detekován slabý vůně cedru. Hustota dřeva se velmi liší v závislosti na místě růstu stromu, ale průměrná hustota se považuje za rovnou 0,52 (poměr hmotnosti sušeného dřeva k objemu čerstvě řezaného dřeva), což odpovídá 640 kg / m³. Padouk velmi dobře schne s minimálním praskáním a tvorbou mýsy. Průměrné poměry smrštění: radiální 2,8%, tangenciální 4,0%. Dřevo je extrémně odolné. Průměrná životnost dřeva ve styku s půdou je 25 let. Je však náchylné k napadení škůdci [57].

Můžete s ním pracovat s nejprimitivnějšími nástroji. Zpracovává se dobře na zařízení, při hoblování se však mohou objevit malé potíže, a to v místech, kde jsou vlákna propletena. Dobře drží, leští a dokonale nasává. Hřebíky a šrouby dobře drží. Padouk má velmi široké uplatnění: kusové parkety, masivní prkna, stavba lodí, nábytek, hudební nástroje, dýha, vyřezávané výrobky, soustružené výrobky [21].

K otázce nákupu tohoto druhu je nutné přistupovat opatrně, protože název Padouk je spojován s velkým počtem dalších druhů dřeva ze skupiny Pterocarpus. Mnoho obchodních společností na světovém trhu nabízí padouk, ale jen málo z nich uvádí botanický název plemene - Pterocarpus indicus. Nabídka není nijak zvlášť velká a dřevo je ve vysoké cenové kategorii [65].



Obr. 12. Padouk. Zdroj: (www.les.novosibdom.ru), 2018



Obr. 13. Padouk. Zdroj: (www.les.novosibdom.ru), 2018

3. Metodika experimentální práce

Na základě cíle diplomové práce je možné metodiku rozdělit do následujících bodů:

1. Příprava zkušebních těles.
2. Termická modifikace.
3. Měření.
4. Vyhodnocování.

Metodika byla zaměřená na sledování vlivu stupně termické modifikace ($T = 20\text{ °C}$, $T = 160\text{ °C}$, $T = 180\text{ °C}$, $T = 210\text{ °C}$) na sledované charakteristiky:

1. Sledovanými fyzikálními charakteristikami byly:

- 1.1. Účinek termické úpravy na barevné změny.

2. Sledovanými mechanickými charakteristikami byly:

- 2.1 Tvrдость podle Brinella (BH).
- 2.2. Rázová houževnatost (MPa).

.Všechny experimenty byly provedené na dvou dřevinách a to:

- Padouk (*Pterocarpus soyauxii*).
- Iroko (*Milicia excelsa*).

3.1. Příprava zkušebních vzorků

3.1.1. Barva

Pro testování barevných změn byla použita zkušební tělesa dřevo Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). Zkušební tělesa výše uvedených dřevin byli rozděleny do dvou základních souborů podle teploty termické modifikace. První soubor zkušebních těles nebyl termicky upraven a byl označen jako 20 °C. Druhý soubor zkušebních těles byl termicky upraven a byl dále rozdělen podle teploty termické modifikace na 160 °C, 180 °C a 210 °C. Pro experiment posouzení barevných změn bylo použito 20 vzorků každé teploty termické modifikace.

Na testování termické modifikace na barevné změny byly použity vzorky s rozměry 20 x 100 x 200 mm (h x š x l), které byly radiálně řezané.

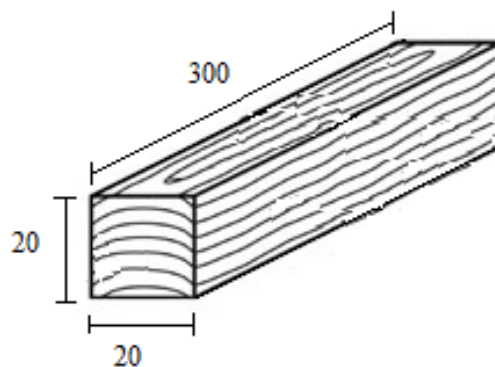
3.1.2. Tvrdost podle Brinella

Pro tento experiment příprava zkušebních těles probíhala podle normy EN 1534 (2010) [68]. Vzorky měly rozměry 20 x 100 x 200 mm (h x š x l) řezané ve směru vláken. Měření probíhalo na vzorcích Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). Které byly rozděleny na dva soubory: termicky upravené vzorky a neupravené vzorky. Soubor s termicky upravenými vzorky byl dále rozdělen na podsoubory podle teploty termické modifikace na 160 °C, 180 °C, 210 °. Pro provedení zkoušky bylo použito 20 vzorků každé teploty termické modifikace. Zkušební vzorky byly řádně označeny, poté bylo provedeno měření posuvným měřítkem, které mělo přesnost 0,01 mm a následně vzorky byly zváženy na digitálních laboratorních vahách s přesností 0,01 g. Získané výsledky byly zapsány do tabulek.

3.1.3. Rázová houževnatost

Pro zkoušku rázové houževnatosti příprava zkušebních těles probíhala podle normy ČSN 49 0117 [66]. Vzorky měly tvar pravoúhlého hranolu s příčnými rozměry 20x20 mm a délkou 300 mm (Obr. 14). Měření probíhalo na vzorcích Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*).

Pro tento experiment vzorky byly rozdělené do dvou souborů, konkrétně na tepelně upravené vzorky a vzorky neupravené.



Obr. 14 Zkušební těleso používané pro zkoušku rázové houževnatosti (autor)

Vzorky tepelně upravené byly rozděleny do podsouboru podle teploty termické modifikace na 160 °C, 180 °C a 210 °C (Obr. 15). Každá dřevina měla svůj podsoubor vzorků, které byly rozděleny podle termické modifikace a bez úpravy.

Pro zkoušku rázové houževnatosti bylo použito 20 vzorků zkušebních těles od každé teploty.



Obr. 15 Zkušební vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti (autor)

Zkušební vzorky byly příslušně označena a pak v jejich středu bylo provedeno měření posuvným měřítkem, které má přesnost 0,01 mm a na laboratorních digitálních vahách s přesností 0,01 g vzorky byly zváženy (Obr. 16). Výsledky byly zapsány do tabulek.



Obr. 16 Vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti na digitálních vahách (autor)

3.2. Termická modifikace

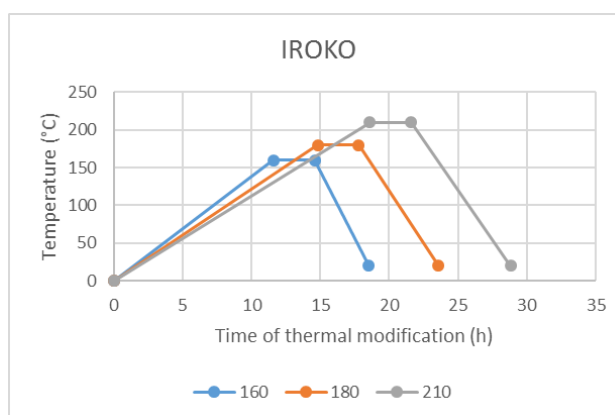
Termická modifikace byla provedena na vzorcích Iroko (*Milicia excelsa*) a Padouk (*Pterocarpus soyauxii*) v tři kroky.

1. Ohřev a sušení – V první fázi při zvýšení teploty v sušárně přibližně na 100 °C působí pára. Jako sušící medium je horký vzduch. Po dokončení této fáze dřevo má vlhkost blízkou k nule.

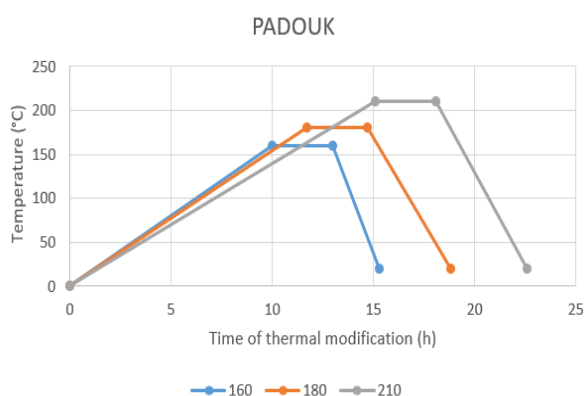
2. Termická modifikace – Ve druhém kroku se teplota zvýší na úroveň termické modifikace (185-230 °C) na dobu 2-3 hodin. Kombinace míry teploty a doby působení jsou dány požadavky třídy výrobků Thermowood (Thermo-S a Thermo-D).

3. Chlazení a klimatizace – Ve třetí fázi, dochází ke snížení teploty dřeva na 80-90 °C a upravení vlhkost vzduchu tak, že konečný obsah vlhkosti se ustálí přibližně na 4-7 %.

V grafech je znázorněn průběh termické modifikace pro každou dřevinu. Iroko je zobrazen na (Grafu 1), a Padouk je zobrazen na (Grafu 2).



Graf 1. Průběh termické úpravy vzorků Iroko použitých pro experiment (autor)



Graf 2. Průběhu termické úpravy vzorků Padouk použitých pro experiment (autor)

Parametry termické úpravy vzorků Iroko a Padouk použitých pro tento experiment jsou podrobněji uvedeny v tabulkách Tab. 1,

Tab. 1 Technologické parametry termické modifikace vzorků Iroko

	Vstupní technologické parametry		
Vlhkost dřeva	2 to 4 %		
Kapacita pec pro termickou úpravu	0,8 m ³		
Maximální dosažená teplota	210 °C		
	Proces termické modifikace		
	160 °C	180 °C	210 °C
Čas ohřevu	11,6	14,8	18,6
Čas tepelné úpravy	3	3	3
Čas chlazení	3,92	5,76	7,2
Celkový čas úpravy	18,52	23,56	28,8

Tab. 2 Technologické parametry termické modifikace vzorků Padouk

	Vstupní technologické paametry		
Vlhkost dřeva	2 to 4 %		
Kapacita pec pro termickou úpravu	0,8 m ³		
Maximalní dasažená teplota	210 °C		
	Proces termické modifikace		
	160 °C	180 °C	210 °C
Čas ohřevu	10	11,7	15,1
Čas tepelné úpravy	3	3	3
Čas chlazení	2,3	4,1	4,5
Celkový čas úpravy	15,3	18,8	22,6

3.3. Měření

3.3.1. Barva

Pomoci spektrofotometru (obr.18) bylo prováděno měření barevných změn. Principem měření barvy je spektrální odraz s vlnovými délkami 400–700 nm. Spektrofotometr má LED diody, které využívají světlo se stálou vlnovou délkou. V kruhovém vzorci světelný paprsek je odražen pod 45° úhlem a úhel pozorování je 0° [52].

Zprvė byla měřena barva na vzorcích před tepelnou modifikací, aby bylo možné získat referenční hodnoty, které umožňují přepočítat celkovou změnu barvy ΔE^* . Na každém vzorku měření bylo provedeno ve třech bodech, z důvodu zajištění co nejpresnější výsledky.

Pro tento experiment byla použita metoda barevné stupnice CIE-L*a*b* (CIELab), protože je nejpoužívanější a často je popsána v literatuře, což nám umožňuje lehce porovnávat naměřené hodnoty a výsledky. V Tab. 3 jsou uvedena kritéria pro vyhodnocování celkové změny barvy ΔE^* .

CIE-L*a*b* metoda je metoda, která je popsána jako barevný prostor (Obr. 18) uspořádaný pravoúhle do formy krychle, která je vymezena třemi osami, které označuje:

L* - vyjádření jasu v % (0 % černá, 100 % bílá),

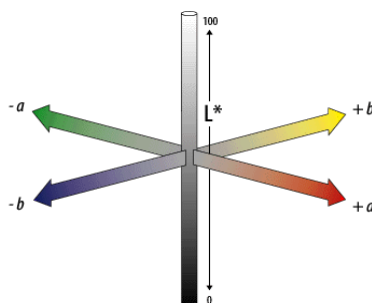
a* – chromatická zeleno-červená osa,

b* – chromatická modro-žlutá osa.



Obr. 17. Spektrofotometr. Zdoj: www.plasticportal.cz, 2018

V rozmezí od 0 – černá až do 100 – bílá se pohybuje stupnice světlosti. Parametry a^* a b^* popisují barevnost plochy, tyto parametry nemají žádné hodnotové ohraničení.



Obr. 18 Grafické znázornění metody CIE $L^*a^*b^*$ (www.mimoriarty.wordpress.com)

Tab. 3 Kritéria vyhodnocování celkové změny barvy ΔE^* [38]

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

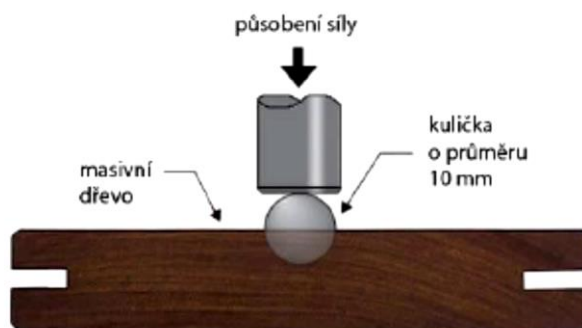
Měření bylo provedeno podle příslušných norem ISO 11664-2 (2007) [69], ISO 11644-4 (2009) [70] a ISO 11664-6 (2014) [71]. Barevné rozdíly byly vyhodnocovány podle celkové barevné změny, která byla vypočítána podle vzorce [38] :

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}} \quad (3)$$

Kde ΔE^* je celková změna barvy a ΔL^* , Δa^* a Δb^* jsou rozdíly mezi referenčními hodnotami a hodnotami získanými po termické modifikace vzorků.

3.3.2. Tvrdost podle Brinella

Principem měření tvrdosti podle Brinella je založen na zatačování kuličky z kalené oceli nebo pro tvrdší materiály ze slinutých karbidů. Průměr této kuličky dan statickým zatížením v našem případě do tangenciálních ploch dřeva, to znamená v radiálním směru (Obr. 19).



Obr. 19 Model zkoušení Brinellovy zkoušky tvrdosti (www.cdp-praha.cz)

Zkouška měření tvrdosti byla provedena podle normy ČSN EN ISO 6506-1 (2005) [67]. V průběhu zkoušky těleso musí být pevně zachyceno a podloženo tvrdou podložkou, z důvodu zamezení jeho pohnutí. Povrch musí být hladký a rovný bez cizích těles a špíny. Měření tvrdosti probíhalo podle normy EN 1534 (2010) [68]. Pro zkoušku byl použit tvrdoměr značky DuraVision-30 s karbidovým indikátorem od firmy Struer. Jeho součástí je pevná testovací hlava, která automaticky vyhodnocuje výsledky. DuraVision patří mezi univerzální tvrdoměry, které umožňují měření pro několik metod (Obr. 20).

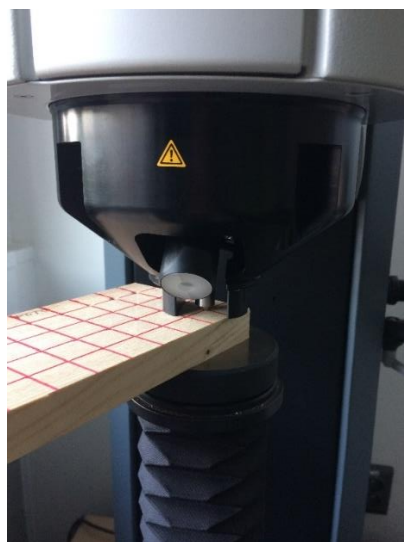


Obr. 20 Tvrdoměr Duravision-30 (autor)

Zkouška měření tvrdostí se skládala z několika kroků. Před samotným měřením musí byly nastaveny správné parametry pro měření. Zkušební vzorek se byl vložen a upevněn na pracovní desku tvrdoměru. Spuštění měření tvrdosti je na dotykovém display, které se nachází vedle přístroje. Získané hodnoty byly zapsány do tabulek v jednotkách MPa. Poté vzorek byl uvolněn z upnutí, přemístěn do druhé polohy a postup se opět opakoval. Tvrdoměr je plně automatický za výjimkou ručního vkládání zkušebních vzorků. Výsledky tvrdosti zpracují přímo na dotykovém displayi. Přístroj automaticky měří předepsanou sílu zatěžování, měří hloubku a průměr otláčení a pak je z těchto výsledku schopen vypočítat hodnotu tvrdosti.

Doba kalibrace a vtisku indikátoru trvalo přibližně 1 minutu. Přímý proces vtisku indikátoru do zkušební tělesa je 10 sekund. Na každém vzorku měření bylo provedeno na několika zkušebních místech, z důvodu stanovení variability tvrdosti. Na tělesa byla nanášena mřížka po cca 20 x 20 mm (Obr. 21) v překřížení probíhalo měření tvrdosti. Parametry měření tvrdosti podle Brinella jsou uvedeny v

Tab. 4.



Obr. 21 Upnutí zkušební vzorku do přístroje, ukázka rozkreslené mřížky na tělese (autor)

Tab. 4 Parametry tvrdost podle Brinella

Tvrdost podle Brinella		
Dřevina	Podmínky	Popis
Iroko	H _{BW} 10 ¹ /500 ² /10 ³	¹ 10 = průměr karbidové kuličky (mm)
Padouk		² 250 a 500 = konstantní zatěžovací síla (N)
		³ 10 = čas měření (sec)

Tvrdost podle Brinella H_{BW} byla spočítána pomocí následujícího vzorce dle normy EN 1534 (2010) [68]:

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

kde:

H_{BW} – Tvrdost dřeva podle Brinella (MPa)

F – síla působící na kuličku (N)

D – průměr kuličky (mm)

Dále naměřené hodnoty tvrdosti podle Brinella byly následně převedeny na 12 % obsah vlhkosti podle vzorku:

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

Kde:

H_{BW12} – tvrdost dřeva při vlhkosti 12 % (MPa),

H_B - tvrdost dřeva při zkoušení vlhkosti,

w – vlhkost zkušebních těles při zkoušce (%),

α – opravný vlhkostní koeficient pro tvrdost kolmo na vlákna pro všechny dřeviny

Vlhkost dřeva byla stanovena během zkoušení podle normy ISO 13061-2 (2014) [72] následujícím vzorcem:

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

kde:

ρ_w – hustota dřeva při vlhkosti w (kg/m^3),

m_w – hmotnost dřeva při obsahu vlhkosti w (kg),

V_w – objem dřeva při obsahu vlhkosti w (m^3).

Obsah vlhkosti ve vzorcích byl stanoven v souladu s normou ISO 13061-1 (2014) [73] a podle vzorce:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (7)$$

kde:

w – vlhkost vzorků (%),

m_w – váha vzorků s vlhkostí w (kg),

m_0 – váha vysušených vzorků v sušárně (kg).

3.3.3. Rázová houževnatost

Houževnatost je vlastnost materiálu, kterou můžeme popsat jako schopnost materiálu setrvat při ohýbání a nárazech vcelku, tedy bez tvorby trhlin. Rázová houževnatost zjišťuje, kolik energie se spotřebuje na rozbití zkušebního vzorku.

Měření a zkouška rázové houževnatosti probíhala dle normy ČSN 49 0117 [66]. Zkušební tělesa byly symetricky položena na podpěry Charpyho kladiva (Obr. 22 a Obr.23), které mají středovou vzdálenost 240 mm. Zkušební těleso bylo umístěno na podpěry tak, aby bylo rozbito na

radiální ploše. Dále se kladivo uvolní z počáteční horní polohy, pohybuje se po kruhové dráze, přerazí zkušební těleso a vychýlí se do konečné polohy. Energie, kterou těleso spotřebovalo při rozbití vzorku, byla změřena na přesnost 0,5 J.



Obr. 22 Charpyho kladivo
(autor)



Obr. 23 Umístění zkušební tělesa na podporách kladiva (autor)

Zkoušení rázové houževnatosti probíhalo při relativní vlhkosti vzduchu 65% a teplotě 20°C. Pro výpočet byly použity tyto vzorce:

$$A_w = \frac{w}{b \times h} [J \times cm^{-2}] \quad (8)$$

kde:

A_w – rázová houževnatost,

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J],

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

Přepočet na 12% vlhkost:

$$A_{12} = A_w \cdot [1 + \alpha \cdot (W - 12)] [J \cdot cm^{-2}] \quad (9)$$

kde:

α – opravný koeficient 0,02 pro všechny dřeviny

w – vlhkost dřeva [%]

(Podle normy ,ČSN 49 0117).

3.4. Vyhodnocování

V softwaru Statistica 12 byla použita vice-faktorová analýza rozptylu pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich dvou, tří nebo čtyř vzájemných kombinací. K tomuto hodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný nebo nevýznamný. Testovaný faktor lze hodnotit podle hodnoty P:

- $P < 0,05$ – vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ – vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ – vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ – faktory působí,
- $P < 0,001$ – vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ – vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný.

Statistická analýza

Pomocí čtyřfaktorové analýzy rozptylu získané hodnoty byly statisticky vyhodnoceny, aby se zjistil vliv každého faktoru na jeho vlastnosti. Schémata byla vytvořena pro 95% interval spolehlivosti a dále pomocí Duncanových testů byly ověřeny výsledky. Začínaje hodnotami koeficientu determinace byla snadno vyhodnocena závislost sledovaných charakteristik na interakci s hustotou dřeva a nakonec byla analyzována korelační analýza interakce mezi sledovanými charakteristikami.

4. Výsledky a Diskuze

4.1. Barva

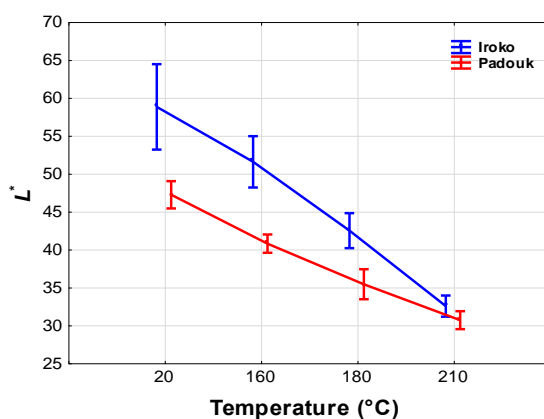
Po porovnání hodnot hladiny významnosti „p“ můžeme říci, že byl zjištěn statistický významný účinek jednotlivých stupňů termické modifikace stejně jako druhu dřeva a jejich interakce na změny souřadnice barevného prostoru L*. (Tab. 5)

Tab. 5. Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících změněné L *

Monitorovaný faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Odchylka	Fisherův F- Test	Úroveň významnosti P
Abs. Člen	143485,5	1	143485,5	9714,349	***
Druh dřeva „WS“	1224,3	1	1224,3	82,887	***
Tepelná modifice „TM“	5101,3	3	1700,4	115,124	***
WS *TM	295,7	3	98,6	6,672	***
Chyba	1063,5	72	14,8		

NS - nevýznamné, *** - významné, $p < 0,00$

Na Grafu 3 je zobrazena změna souřadnice barevného prostoru L*. Tato souřadnice vykazovala se stoupající teplotou stálý pokles jejich hodnot. U vzorku Iroko pokles hodnoty s 20 °C na 210 °C byl kolem 27 % a u Padouk kolem 16 %. Při teplotě 20 °C vzorek Padouka měl hodnoty o 10 % nižší než Iroko, ale při teplotě termické úpravy na 210 °C obojí dřeviny mají stejnou hodnotu souřadnice L*.



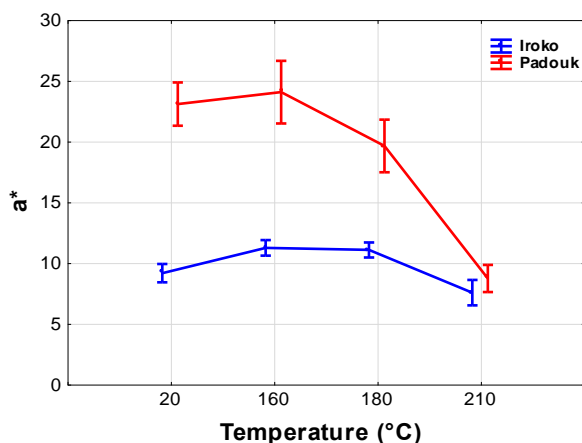
Graf 3. Grafické znázornění průběhu změny souřadnice L* vzhledem k teplotě termické modifikace

Výsledky Duncanovho testů uvedené v tabuce číslo 6 znázorňují, že rozdíl všech hodnot souřadnice L* ovlivneny účinkem aplikovaných teplot na jednotlivých druzích použitého dřeva byl statisticky velmi rozdílný s hladinou významnosti P = 0.000.

Tab. 6. Porovnání účinků teploty tepelné úpravy pomocí Duncanova testu na průběžné změny L *

WS	Teplota (°C)								
		1	2	3	4	5	6	7	8
		58,716	51,480	42,401	32,453	47,134	40,689	35,333	30,599
Iroko	20		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Iroko	160	0,000		0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000
Iroko	180	0,000	0,000		0,000	0,008	0,323	0,000	0,000
Iroko	210	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,098	0,284
Padouk	20	0,000	0,014	0,008	0,000		0,001	0,000	0,000
Padouk	160	0,000	0,000	0,323	0,000	0,001		0,003	0,000
Padouk	180	0,000	0,000	0,000	0,098	0,000	0,003		0,010
Padouk	210	0,000	0,000	0,000	0,284	0,000	0,000	0,010	

Na Grafu 4 je zobrazena změna souřadnice barevného prostoru a*. Tato souřadnice vykazovala se stoupající teplotou nejprve velmi mírný vzestup na hodnoty, které u Iroko si udržela jak na teplotě 160 °C tak na 180 °C, za to na teplotě 210 °C byl zaznamenán pokles kolem 3 bodu pod hodnoty naměřené na referenčních vzorcích. U vzorku Padouka mírný pokles hodnot byl zaznamenán při teplotě termické úpravy 180 °C, a pak při teplotě 210 °C byl významný pokles kolem 20 bodu pod hodnoty naměřené na referenčních vzorcích.



Graf 4. Grafické znázornění průběhu změny souřadnice a* vzhledem k teplotě termické modifikace

Po porovnání hodnot hladiny významnosti „p“ můžeme říci, že byl zjištěn statistický významný účinek jednotlivých stupňů termické modifikace, tabulka ukazuje také vliv použitého dřeva a interakci TM a druhu dřeva na změny souřadnice barevného prostoru a*. (Tab. 7)

Tab. 7. Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice a*

Monitorovaný faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Odchylka	Fisherův F- Test	Úroveň významnosti P
Abs. Člen	16274,27	1	16274,27	3658,143	***
Druh dřeva „WS“	1661,36	1	1661,36	373,442	***
Tepelná modifice „TM“	1072,79	3	357,60	80,381	***
WS *TM	501,34	3	167,11	37,564	***
Chyba	320,31	72	4,45		

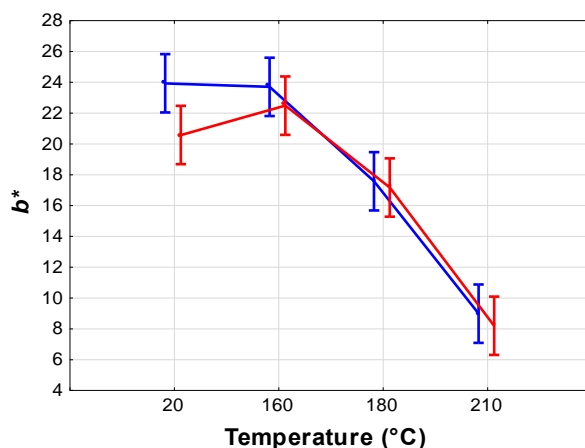
NS - nevýznamné, *** - významné, $p < 0,005$

Výsledky Duncanového testu uvedené v tabulce číslo 8 ukazují, že rozdíl hodnot souřadnice a* ovlivněný účinkem aplikovaných teplot byl statisticky velmi rozdílný s hladinou významnosti $P = 0.000$ s výjimkou termické modifikace na 160 °C a 180 °C, kde byl zjištěn statisticky nevýznamný rozdíl. V rámci jednotlivých dřevin byla prokázána statistická nezávislost mezi hodnotami a* měřenými při 20 °C a 210 °C. U Iroka je nevýznamný rozdíl u 160 °C a 180 °C stupňové modifikaci. U Padouku pak lze pozorovat nevýznamný rozdíl u 20 °C a 160 °C modifikací.

Tab. 8. Porovnání účinků teploty tepelné úpravy pomocí Duncanova testu na průběžné změny a *

WS	Teplota (°C)								
		1	2	3	4	5	6	7	8
		9,108	11,192	11,021	7,501	23,028	24,005	19,580	8,666
Iroko	20		0,039	0,046	0,112	0,000	0,000	0,000	0,641
Iroko	160	0,039		0,856	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015
Iroko	180	0,046	0,856		0,001	0,000	0,000	0,000	0,020
Iroko	210	0,112	0,000	0,001		0,000	0,000	0,000	0,221
Padouk	20	0,000	0,000	0,000	0,000		0,304	0,001	0,000
Padouk	160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,304		0,000	0,000
Padouk	180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000		0,000
Padouk	210	0,641	0,015	0,020	0,221	0,000	0,000	0,000	

Na Grafu 5 je zobrazena změna souřadnice barevného prostoru b^* . Tato souřadnice si při teplotě 160 °C u Iroko udržovala podobné hodnoty jako na referenčních vzorcích, ale poté se vzrůstající teplotou byl zaznamenán velmi výrazný pokles hodnot kolem 15 bodu. U vzorku Padouka zaprvé při teplotě termické modifikace 160 °C byl zaznamenán mírný vzestup na hodnoty kolem 3 bodu a pak při zvýšení teploty modifikace stejně jako u Iroka byl zaznamenán velmi výrazný pokles hodnot kolem 14 bodu pod hodnoty naměřené na referenčních vzorcích.



Graf 5. Grafické znázornění průběhu změny souřadnice b^* vzhledem k teplotě termické modifikace

Po porovnání hodnot hladiny významnosti „p“ můžeme říci, že byl zjištěn statistický významný účinek jednotlivých stupňů termické modifikace, tabulka ukazuje také vliv použitého dřeva a interakci TM a druhu dřeva na změny souřadnice barevného prostoru b^* . Zrovna u téhle analýzy je možné vidět že jak druh dřeva tak stupně TM jsou samostatně významné faktory, ale jejich interakce je statisticky nevýznamná. (Tab. 10)

Tab. 9. Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice b^*

Monitorovaný faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Odchylka	Fisherův F- Test	Úroveň významnosti P
Abs. Člen	25191,16	1	25191,16	2788,746	***
Druh dřeva „WS“	41,58	1	41,58	4,603	***
Tepelná modifice „TM“	2656,71	3	885,57	98,035	***
WS *TM	26,05	3	8,68	0,961	NS
Chyba	650,39	72	9,03		

NS - nevýznamné, *** - významné, $p < 0,005$

Výsledky Duncanovho testu uvedené v tabulce číslo 10 znázorňují, že rozdíl všech hodnot souřadnice L* ovlivněný účinkem aplikovaných teplot byl statisticky velmi rozdílný s hladinou významnosti P = 0.000.

Tab. 10. Porovnání účinků teploty tepelné úpravy pomocí Duncanova testu na průběžné změny b *

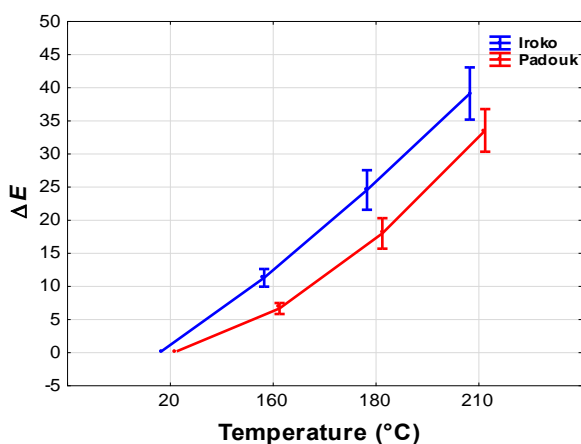
WS	Temperature (°C)								
		1	2	3	4	5	6	7	8
		23,848	23,618	17,495	8,903	20,493	22,402	17,090	8,112
Iroko	20		0,865	0,000	0,000	0,024	0,316	0,000	0,000
Iroko	160	0,865		0,000	0,000	0,030	0,369	0,000	0,000
Iroko	180	0,000	0,000		0,000	0,029	0,001	0,764	0,000
Iroko	210	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,558
Padouk	20	0,024	0,030	0,029	0,000		0,160	0,018	0,000
Padouk	160	0,316	0,369	0,001	0,000	0,160		0,000	0,000
Padouk	180	0,000	0,000	0,764	0,000	0,018	0,000		0,000
Padouk	210	0,000	0,000	0,000	0,558	0,000	0,000	0,000	

V Tab. 11 jsou uvedeny průměrné hodnoty souřadnic barevného prostoru L*, a*, b* a průměrné hodnoty celkové změny barvy ΔE pro různé tepelné modifikace Iroka a Padouk.

Tab. 11. Změna souřadnice barevného prostoru L*, a* a b* a celková změna barevného prostoru ΔE^*

Dřevina	Templota (°C)	Barevné souřadnice			Celková barevná změna
		L*	a*	b*	ΔE^*
Iroko	20	58.72	9.11	23.85	-
	160	51.48	11.19	23.62	12.25
	180	42.4	11.02	17.5	22.26
	210	32.45	7.5	9.2	38.7
Padouk	20	47.13	23.03	20.49	-
	160	40.69	24	22.4	6.47
	180	35.33	19.58	17.09	17.8
	210	30.6	8.66	8.11	33.35

Jak je možné vidět na grafu zobrazeném na Grafu číslo 6 se stoupající teplotou termické modifikace, celková změna barvy ΔE , se velmi výrazně mění a vykazuje vzestup hodnot kolem 35 bodu.



Graf 6. Grafické znázornění průběhu celkové změny barvy ΔE vzhledem k teplotě termické modifikace

Po porovnání hodnot hladiny významnosti „p“ můžeme říci, že byl zjištěn statistický významný účinek jednotlivých stupňů termické modifikace, tabulka ukazuje také vliv použitého dřeva a interakci TM a druhu dřeva na celkovou změnu barevného prostoru ΔE^* . (Tab. 12)

Tab. 12. Významnost jednotlivých faktorů na změnu souřadnice ΔE

Monitorovaný faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Odchylka	Fisherův F- Test	Úroveň významnosti P
Abs. Člen	21791,61	1	21791,61	2097,627	***
Druh dřeva „WS“	351,63	1	351,63	33,847	***
Tepelná modifikace „TM“	14768,23	3	4922,74	473,856	***
WS *TM	126,53	3	42,18	4,060	***
Chyba	747,99	72	10,39		

NS - nevýznamné, *** - významné, $p < 0,005$

Výsledky Duncanového testu uvedené v tabulce číslo 13 ukazují, že rozdíl všech hodnot změny barevného prostoru ΔE ovlivněný v rámci jednotlivých druhů dřeva účinkem aplikovaných teplot byl statisticky velmi rozdílný s hladinou významnosti $P = 0.000$.

Tab. 13. Porovnání účinků teploty tepelné modifikace pomocí Duncanova testu na základě změn barvy ΔE

WS	Teplota (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8
		0,000	11,107	24,367	38,930	0,0000	6,4763	17,806	33,349
Iroko	20		0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
Iroko	160	0,000		0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
Iroko	180	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Iroko	210	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
Padouk	20	1,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
Padouk	160	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
Padouk	180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
Padouk	210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Jak vidíme z Tab. 14 celková změna barvy ΔE se měnila velice výrazně s rostoucí teplotou termické úpravy. Podle běžně používaných kritérií, hodnoty celkové změny barvy ukazují, že při všech stupních termické modifikace bylo dosaženo nejvyššího stupně změny barvy (Tab. 14). Nejvyšší stupeň změny barvy odpovídá zcela odlišné barvě, vzhledem k barvě zkušebních vzorků před termickou modifikací.

Tab. 14. Vyhodnocení celkové změny barvy

Dřevina	Teplota (°C)	Celková barevná změna	Vyhodnocení	
		ΔE^*	Kritéria	Popis
Iroko	160	12,25	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
	180	22,26	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
	210	38,7	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
Padouk	160	6,47	$6 < \Delta E < 12$	Výrazná barevná změna
	180	17,8	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
	210	33,35	$\Delta E < 12$	Odlišná barva

4.2. Tvrdost

V Tab. 15 jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených tvrdostí a hustoty, stejně tak je uveden příslušný variační koeficient.

Tab. 15. Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella (Iroko) a (Padouk)

Material	Teplota termické modifikace (°C)	Tvrdost (MPa)	
Iroko	20	6,8	(11,4)
Iroko	160	7,3	(8,7)
Iroko	180	6,8	(15,3)
Iroko	210	6,4	(18,1)
Padouk	20	7,8	(2,3)
Padouk	160	8	(3,7)
Padouk	180	7,3	(7,2)
Padouk	210	5,8	(12,3)

* Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (CV) v %

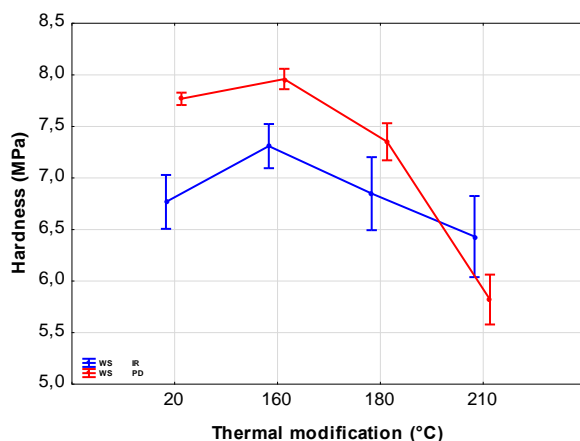
V Tab.16 můžeme sledovat vliv teploty tepelné úpravy na tvrdost. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“, můžeme hodnotit, že druh dřeviny má statistický velmi významný vliv na hodnoty sledovaných charakteristik. Takže jak i termická modifikace má významný vliv. Významným účinkem také se projevila i interakce mezi obojími sledovanými faktory.

Tab. 16. Statistické vyhodnocení vlivu teploty tepelné úpravy a typu dřeva na tvrdost

Extraktivní látky (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Abs. Člen	14203,15	1	14203,15	26088,89	***
Druh dřeviny	10,70	1	10,70	19,65	***
Teplota (°C)	89,55	3	29,85	54,83	***
Druh dřeviny *Teplota (°C)	26,18	3	8,73	16,03	***
Chyba	152,44	280	0,54		
Příslušný model popisuje zhruba 99.9 % z celkového počtu čtverců.					

NV – nevýznamné, *** - významné, $p < 0.005$

Jak můžeme vidět na grafu číslo 7 při 160 °C byl patrný nárůst hodnot tvrdosti vzhledem k referenčním údajům u obojích dřevin. Z grafu je zřejmé že hodnoty tvrdosti u Padouka měřeny na vzorcích termicky modifikovaných na 180 °C byly přibližně stejné jako hodnoty získané na referenčních vzorcích. Zato v případě Iroko bylo zřejmé, že hodnoty tvrdosti dosahovaly nižších hodnot než hodnoty získané na referenčních vzorcích. Také lze říct, že vzorek Iroko při termické modifikace na 210 °C dosáhl nejnižších hodnot.



Graf 7. Vliv interakce teploty termické modifikace a druhu dřeviny na hodnoty tvrdosti

4.3. Razová houževnatost

V tabulce 18 jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených rázové houževnatosti a hustoty pro určitou dřevinu a teploty termické modifikace, také uveden příslušný variační koeficient.

Tab. 17. Průměrné hodnoty Razové houževnatosti

Material	Termická modifikace (°C)	Aw (J.cm-2)	
		Mean	(CV)
Padouk	20	10	(10,2)
Padouk	160	10	(7,0)
Padouk	180	9	(10,9)
Padouk	210	8	(9,4)
Iroko	20	10	(11,8)
Iroko	160	9	(26,4)
Iroko	180	8	(25,8)
Iroko	210	7	(19,4)

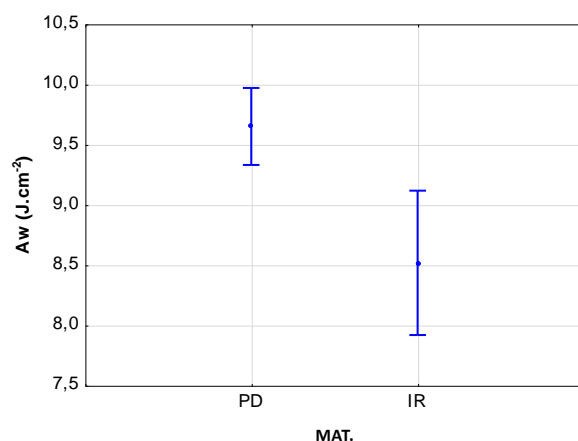
Hodnoty v závorkách označují variační koeficienty (CV), n = 30.

V tabulce 19 je uvedena významnost vlivy jednotlivých faktorů na rázovou houževnatost. Na základě hodnot hladiny významnosti P, můžeme říct, že teplota termické modifikace, stejně jako druh dřeviny, má statisticky velmi významný vliv na hodnoty rázové houževnatosti. Interakce mezi obou faktory také se projevila jako významný účinek.

Tab. 18. Statistické zhodnocení vlivu faktorů na rázovou houževnatost

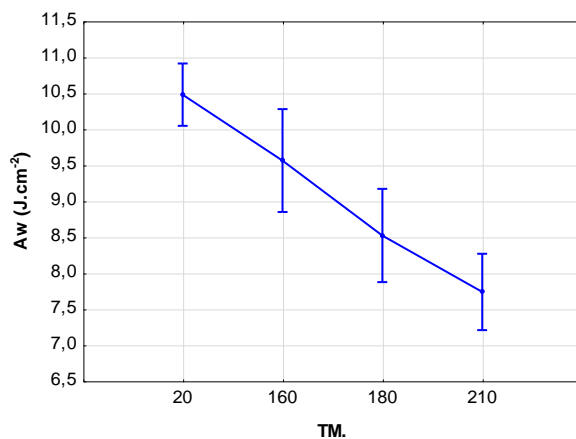
Povrchová zvlňení (μm)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův <i>F</i> -test	Hladina významnosti <i>P</i>
Intercept	9305,676	1	9305,676	4681,905	***
Druh dřeviny	41,862	1	41,862	21,062	***
Teplota (°C)	127,871	3	42,624	21,445	***
Druh dřeviny *Teplota (°C)	18,103	3	6,034	3,036	***
Chyba	212,671	107	1,988		
Příslušný model vysvětluje zhruba 57,3% z celkového součtu čtverců.					

Jak můžeme vidět na grafu 8 druh dřeviny je pro měření rázové houževnatosti dřeva statisticky velice významný. Celkově největších hodnot při zkoušení rázové houževnatosti na Charpyho kládě dosáhl Padouk. Iroko dosáhl hodnot nižších než Padouk.



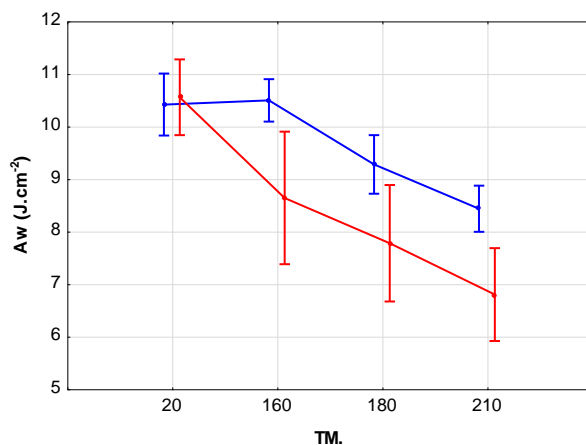
Graf 8. Vliv druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti

Z grafu 9 vidíme, že se stoupající teplotou termické modifikace klesá hodnota rázové houževnatosti kolem 3 bodu. Zkušební vzorky bez termické modifikace s teplotou 20°C vykazují u dřevin největších dosažených hodnot rázové houževnatosti.



Graf 9. Vliv teploty termické modifikace na rázové houževnatosti

Na grafu 10 je znázorněn vliv interakce teploty termické modifikace a druhu dřeviny na rázovou houževnatost. Padouk a Iroko mají podobné hodnoty rázové houževnatosti. Mezi těmito dřevinami není statistický významný rozdíl. Nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti Padouk a Iroko vykazují při teplotě termické modifikace 160 °C, pak při stoupající teplotě u obou dřevin dochází k významnému poklesu.



Graf 10. Vliv interakce teploty termické modifikace a druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti

Pro hlubší analýzu vlivu teploty termické úpravy na sledované charakteristiky byl použit Duncanův test, jehož výsledky jsou zaneseny v Tab. 20. Jediná nevýznamnost v rámci dřevin je vidět u Padouku mezi 20 °C a 180 °C. A potom lze vypožorovat nevýznamný rozdíl mezi referenčním vzorkem Padouka a referenčním vzorkem Iroko.

Tab. 19. Duncanův test

Material	TM.	1 (10,409)	2 (10,490)	3 (9,269)	4 (8,427)	5 (10,548)	6 (8,632)	7 (7,770)	8 (6,792)
Padouk	20		0,879	0,033	0,001	0,806	0,002	0,000	0,000
Padouk	160	0,879		0,030	0,000	0,912	0,001	0,000	0,000
Padouk	180	0,033	0,030		0,136	0,027	0,231	0,009	0,000
Padouk	210	0,001	0,000	0,136		0,000	0,699	0,217	0,004
Iroko	20	0,806	0,912	0,027	0,000		0,001	0,000	0,000
Iroko	160	0,002	0,001	0,231	0,699	0,001		0,127	0,001
Iroko	180	0,000	0,000	0,009	0,217	0,000	0,127		0,067
Iroko	210	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,001	0,067	

Milan Gaff a kolektiv v roce 2019 prováděl studie, které se zabývá dopadem různých teplot tepelné modifikace (160 °C, 180 °C a 210 °C) na změny základních chemických složek dřeva a dopadem těchto změn ve dřevě na rázovou houževnatost evropského dubu (*Quercus*) a smrku norského (*Picea*). Výsledky této práce ukazuje, že při teplotě modifikace 160 °C se rázová houževnatost zvyšuje asi o 30% u obou druhů dřeva a vyšší teploty způsobují její pokles o 32% (dub) a 19% (smrk) ve srovnání s nemodifikovaným dřevem. Nejnižší hodnoty byly získány v obou vzorků při 210 °C [72]. V mé práci byli vybrány dřeviny Padouk a Iroko, které obdrželi podobné výsledky.

Z tohoto srovnání můžeme předpokládat, že tropické stromy mají podobné vlastnosti rázové houževnatosti jako i evropské druhy dřevin ovlivněné termickou modifikací.

V práci «Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood» byla sledována změna barvy při termické modifikace u smrku (*Picea*) a dubového dřeva (*Quercus*). Tepelná modifikace byla prováděna při teplotě 160 °C, 180 °C a 210 °C v souladu s Thermowood procesem. Během termické modifikace smrkového a dubového dřeva byly pozorovány barevné změny. Souřadnice barevného prostoru L* klesá se vzrůstem teploty zpracování o 50% u obou druhů dřeva (53,23% u smrku a 52,96% u dubu). Hodnoty souřadnice barevného prostoru (a* a b*) zaznamenaly větší změny u smrku než u dubového dřeva. Pro oba druhy dřeva byl dosažen nejvyšší celkový barevný rozdíl (ΔE^*) při 210 °C (hodnoceno jako velmi významné barevné změny) [73]. V mé práci byly dosažené podobné výsledky jako celková

změna barvy ΔE , se velmi výrazně mění se stoupající teplotou termické modifikace u vzorku Iroko a Padouk.

Na základě těchto studií a různých jiných prací zaměřených na termické modifikace dřeva můžeme předpokládat, že evropské a tropické druhy dřevin mají během termické úpravy podobné změny mechanických a fyzikálních vlastností. Přesto, aby bylo dosaženo přesnějších výsledků můžeme dál sledovat změny dalších vlastností u termické modifikovaných tropických dřevin.

5. Závěr

Cílem práce bylo experimentálním způsobem zjistit vliv jednotlivých stupňů termické úpravy vybraných dřevin na vybrané mechanické a fyzikální charakteristiky. Na základě naměřených dat a jejich zpracování bylo dospěno k následujícím závěrům:

Na základě naměřených hodnot u termicky upravených dřevin celková změna barvy dosáhla nejnižších hodnot u Padouku. Po zkouškách vyšla závislost, že čím vyšší teplota termické úpravy, tím se více změnila barva. U zkušebních těles z Padouku celková změna barvy byla nejvýraznější než u Iroka.

Nejvyšších hodnot tvrdosti dosahují všechny dřeviny při termické úpravě 160°C, ale tyto hodnoty byli přibližně stejné jako u zkušebních těles. Při termické modifikaci s vyšším teplotním stupněm nad 160°C tvrdost stoupá. Na základě našich zkušebních těles můžeme prohlásit, že rozdílná teplota termické modifikace má významný negativní vliv na tvrdost dřevin. Termická modifikace má větší vliv na tvrdost Padouku než na tvrdost Iroka, to je způsobeno stabilitou Iroka.

Celkově největších hodnot při zkoušení rázové houževnatosti dosáhlo Iroko, ale tělesa Padouku vykazovala podobné hodnoty. Mezi těmito dřevinami nepanuje statisticky významný rozdíl. Padouk a Iroko vykazují nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti při teplotě termické úpravy 160°C, poté dochází u obou dřevin k významnému poklesu.

Ze všech výsledků, která byly získány měřením několika vybraných vlastností dřeva jak fyzikálních, tak mechanických, můžeme prohlásit, že Iroko a Padouk při termické úpravě je víceméně ve všech vlastnostech ovlivňují vlastnosti dřeva jak už pozitivně, tak i negativně.

6. Seznam literatury a použitých zdrojů

1. ALTGEN, D., M. ALTGEN, S. KYRÖ, L. RAUTKARI a C. MAI. Time-dependent wettability changes on plasma-treated surfaces of unmodified and thermally modified European beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products: Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2020, 78(2), 417-420 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1007/s00107-020-01505-0. ISSN 00183768.
2. ARSYAD, W. M. FUNGAL. Decay resistance of 16 tropical wood species embedded with metal screws. *Journal of Tropical Forest Science* [online]. 2019, 31(4), 443 [cit. 2020-05-06]. ISSN 01281283.
3. ASADPOUR, Ghasem, Maryam GHORBANI a Mahmoud DAVOUDI. *Effect of thermal modification on the practical properties of horn beam bark flour-polypropylene composites*. 2016, 31(2), 280-293 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.22092/ijwpr.2016.105775. ISSN 17350913.
4. ASTM D1107-96. *Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013
5. BAAR, a GRYC. *The analysis of tropical wood discoloration caused by simulated sunlight*. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2017. s. 263-269
6. BARCÍK, Š., KMINIAK, R., ŘEHÁK, T. and KVIETKOVÁ, M. *The influence of selected factors on energy requirements for plain milling of beech wood*. *Journal of Forest Science* 56(5), 243-250, 2010.
7. BARCÍK, Š.; *Technika pre výrobu nábytku*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. ISBN: 978-80-228-2055-4, 2009.
8. BAYANI, Siavash. Physical and Mechanical Properties of Thermally-Modified Beech Wood Impregnated with Silver Nano-Suspension and Their Relationship with the Crystallinity of Cellulose. *Polymers* [online]. 2019, 11(10), 1538-1538 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.3390/polym11101538. ISSN 20734360.
9. BAYSAL, E., KART, S., TOKER, H., and DEGIRMENTEPE, S. "Some physical characteristics of thermally modified Oriental-beech wood," *Maderas. Ciencia y Tecnología* 16(3), 291-298. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.022.
10. BONGERS A BECKERS. *Mechanical properties of acetylated solid wood treated on pilot plant scale*. *Proceedings of the first European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium*. 2003 s. 25.

11. BOONSTRA, M. J. „*A two-stage thermal modification of wood*,“ Ph.D. dissertation in co-supervision Ghent University, Ghent, Belgium and Henri Poincaré University, Nancy, France, pp. 297, 2008.
12. BOURGEOIS, J., BARTHOLIN, M.C. and GUYONNET, R. *Thermal treatment of wood: analysis of obtained product*. Wood Sci Technol 23:303–310, 1986.
13. CAI, Chenyang, Henrik HERÄJÄRVI a Antti HAAPALA. Effects of environmental conditions on physical and mechanical properties of thermally modified wood. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. 2019, 49(11), 1434-1440 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0180. ISSN 00455067.
14. CAI, Chenyang, Muhammad Asadullah JAVED, Sanna KOMULAINEN, Ville-veikko TELKKI, Antti HAAPALA a Henrik HERÄJÄRVI. Effect of natural weathering on water absorption and pore size distribution in thermally modified wood determined by nuclear magnetic resonance. *Cellulose* [online]. 2020, 27(8), 4235-4247 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1007/s10570-020-03093-x. ISSN 09690239.
15. CANDAN, Zeki, Suleyman KORKUT a Oner UNSAL. Thermally Compressed Poplar Wood (TCW): Physical and Mechanical Properties. *Wood Industry / Drvna Industrija* [online]. 2013, 64(2), 107-111 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.5552/drind.2013.1216. ISSN 00126772.
16. CORBETT, S.; 2001 REBO PRODUCTIONS CZ, spol. s r.o. *Práce se dřevem*. USA: Lorenz Books, 2001. ISBN 80-7234--212-6.
17. ČABALOVÁ, I., KAČÍK, F., LAGAŇA, R., VÝBOHOVÁ, E., BUBENÍKOVÁ, T., ČAŇOVÁ, I., and ĎURKOVIČ, J. *Effect of thermal treatment on the chemical, physical, and mechanical properties of pedunculate oak (Quercus robur L.) wood*. BioRes.13(1), 157-170, 2018
18. DARMAWAN, W., GOTTLÖBER, C., OERTEL, M., WAGENFÜHR, A., and FISCHER, R. „*Performance of helical edge milling cutters in planning wood*,“ European journal of Wood and Wood Products 69(4), 565-572. 2011. DOI: 10.1007/s010-0517-8
19. DAVIM, J. P. *Surface Integrity in Machining*. 1. vyd. London: Springer. 2010. 215 s. ISBN 978-1-84882-973-5.
20. DE MOURA, L.F., BRITO, J.O., NOLASCO, A.M. and ULIANA, L. R. *Effect of thermal rectification on machinability of Eucalyptus grandis and Pinus caribaea var. Hondurensiswoods*. Eur. J. Wood Prod. 69 (4): 641-648. 2011.
21. DEHEJIA a HARSHA V. *The sacred tree*. 2011. s. 54.
22. DORNYAK, O.R. *Modeling of the rheological behavior of wood in compression processes*. J Eng Phys Thermophys, 2003. 76(3):648–654

23. ESTEVES BM, DOMINGOS IJ, PEREIRA HM. *Pine wood modification by heat treatment in air*. *Bioresources* 2008;3:142.
24. GALMIZ, O., R. TALVISTE, R. PANÁČEK a D. KOVÁČIK. Cold atmospheric pressure plasma facilitated nano-structuring of thermally modified wood. *Wood Science and Technology: Journal of the International Academy of Wood Science* [online]. 2019, 53(6), 1339-1352 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1007/s00226-019-01128-6. ISSN 00437719.
25. GSÖLS, I., RÄTZSCH, M. AND LADNER, C. *Interactions between wood and melamine resins - effect on dimensional stability properties and fungal attack. Proceedings of the first European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium*. s. 221-225.
26. GUNDUZ, G., D., AYDEMIR, KARAKAS, G. *The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (Pyrus elaeagnifolia Pall.) wood and changes in physical properties*. 2009. pp. 4391–4395.
27. HERRERA, René, Ainhoa ARRESE, Pedro L. DE HOYOS-MARTINEZ, Jalel LABIDI a Rodrigo LLANO-PONTE. Evolution of thermally modified wood properties exposed to natural and artificial weathering and its potential as an element for façades systems. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 172, 233-242 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.157. ISSN 09500618.
28. HILL, C.A.S., HALE, M. AND FORSTER, S.C. *Investigations of the role of cell wall moisture content and micropore blocking in the decay protection mechanism of anhydride modified wood*. Presentation given at the Final Conference of COST Action. 2004. s. 65.
29. HORAČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2008. s. 124. ISBN 80-7157-347-7.
30. HUMAR, Miha, Boštjan LESAR a Davor KRŽIŠNIK. Moisture Performance of Façade Elements Made of Thermally Modified Norway Spruce Wood. *Forests* [online]. 2020, 11(3), 348-348 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.3390/f11030348. ISSN 19994907.
31. KACIK, F., SMIRA, P., KACIKOVA, D., VELKOVA, V., NASSWETTROVA, A., and VACEK, V. *Chemical alterations of pine wood saccharides during heat sterilisation*, *Carbohydrate Polymers* 117, 681-686. 2011. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.10.065
32. KAČÍKOVÁ D.; KAČÍK F. *Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011, ISBN 978-80-228-2249-7.
33. KAMPERIDOU, Vasiliki a Panagiotis BARMPOUTIS. CORRELATION BETWEEN THE CHANGES OF COLOUR AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMALLY-MODIFIED SCOTS PINE (PINUS SYLVESTRIS L.) WOOD. *Pro Ligno* [online]. 2015, 11(4), 360-365 [cit. 2020-05-06]. ISSN 18414737.

34. KUBOVSKÝ, Ivan a Stanislav URGELA. *Farba a svetlo: monografia*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2004. ISBN 80-228-1399-0.
35. KUBOVSKÝ, Ivan, Danica KAČÍKOVÁ a František KAČÍK. Structural Changes of Oak Wood Main Components Caused by Thermal Modification. *Polymers (20734360)* [online]. 2020, 12(2), 485-485 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.3390/polym12020485. ISSN 20734360.
36. MAHMOOD, MR et al. *Thermal Stability and Decay Resistance Properties of Tropical Wood Polymer Nanocomposites (WPNC)*, 2013.
37. MBURU, F., et al. Evaluation of thermally modified *Grevillea robusta* heartwood as an alternative to shortage of wood resource in Kenya: *Characterisation of physicochemical properties and improvement of bio-resistance*
38. BRAUN, M. Modeling and simulation of an industrial indirect solar dryer for Iroko wood (*Chlorophora excelsa*) in a tropical environment [online]. 2017 [cit. 2020-05-06].
39. MUBAROK, Mahdi, Stéphane DUMARCAY, Holger MILITZ, Kévin CANDELIER, Marie France THEVENON a Philippe GÉRARDIN. Comparison of different treatments based on glycerol or polyglycerol additives to improve properties of thermally modified wood. *European Journal of Wood and Wood Products: Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2019, 77(5), 799-810 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1007/s00107-019-01429-4. ISSN 00183768.
40. MVONDO, Rachel Raïssa Ngoni, Jean Claude DAMFEU, Pierre MEUKAM a Yves JANNOT. Influence of moisture content on the thermophysical properties of tropical wood species. *Heat and Mass Transfer: Wärme- und Stoffübertragung* [online]. 2020, 56(4), 1365-1378 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1007/s00231-019-02795-8. ISSN 09477411.
41. NOVÁK, P.; *Tepelná modifikace dřeva: Úvod do problematiky*. V: Dřevostavitel: Online svět dřevostaveb [online]. 2011 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.drevostavitel.cz/clanek/tepelna-modifikace-dreva-1-dil>
42. OLUFEMI, Babatola. *Physical and mechanical properties of torrefied Ceiba pentandra WOOD*. Pro Ligno [online]. 2016, 12(3), 19-27 [cit. 2020-05-06]. ISSN 18414737.
43. PETRIČ, Marko, Angela BALZANO, Miha HUMAR, Jernej KRIŽAN, Davor KRŽIŠNIK, Matjaž PAVLIČ a Jure ŽIGON. *Treatment of thermally modified wood with a suspension of titania nanoparticles to improve its selected properties*. Pro Ligno [online]. 2019, 15(4), 252-259 [cit. 2020-05-06]. ISSN 18414737.
44. POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1997. s. 485. ISBN 80-07-00960-4.

45. POŽGAJ, A.; CHOVANEC D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M.; 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vydání. Bratislava, Príroda, 1997.
46. Praktik: Terasa podle přání. Praha: Pražská vydavatelská společnost, s.r.o., 2014, XIX, Květen. ISSN 1211-5533.
47. REINPRECHT L., VIDHOLDOVÁ Z. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. vyd. Technická univerzita vo Zvolene. 2008. s. 28. ISBN 978-80-228-1920-6.
48. REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.
49. SHUKLA, S. R. Evaluation of dimensional stability, surface roughness, colour, flexural properties and decay resistance of thermally modified. *Acacia auriculiformis. Maderas: Ciencia y Tecnología* [online]. 2019, 21(4), 433-446 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.4067/S0718-221X2019005000401. ISSN 07173644.
50. SIKLIENKA, M.; ŠUSTEK, J.; 2007. *Drevorezné nástroje a obrábanie dreva*. Zborník referatov. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Metodika kvalifikácie nerovnosti při obrobenom povrchu rastlého dreva pomocou laserového profilmetra, 2007.
51. SIKORA, Adam, Štěpán HÝSEK, Milan GAFF, Petr HORAČEK a Veronika VONDROVA. SELECTED PHYSICAL PROPERTIES OF THERMALLY MODIFIED SPRUCE WOOD. *Pro Ligno* [online]. 2017, 13(4), 123-132 [cit. 2020-05-06]. ISSN 18414737.
52. SIMO-TAGNE, Merlin, André ZOULALIAN, Romain REMOND, Yann ROGAUME a Beguidé BONOMA. Modeling and simulation of an industrial indirect solar dryer for Iroko wood (*Chlorophora excelsa*) in a tropical environment. *Maderas: Ciencia y Tecnología* [online]. 2017, 19(1), 95-112 [cit. 2020-05-06]. ISSN 07173644.
53. TALGATTI, Maiara. Thermal modification and technological characteristics of wood of *Eucalyptus cloeziana*. *Pesquisa Florestal Brasileira* [online]. 2017, 37(90), 183-188 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.4336/2017.pfb.37.90.1288. ISSN 18093647.
54. TALVISTE, R., O. GALMIZ, M. STUPAVSKÁ a J. RÁHEL'. Effect of DCSBD plasma treatment distance on surface characteristics of wood and thermally modified wood. *Wood Science and Technology: Journal of the International Academy of Wood Science* [online]. 2020, , 1-15 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1007/s00226-020-01175-4. ISSN 00437719.
55. RODD T.,STACKHOUSE J. *Trees: A Visual Guide*. University of California 2008. s. 112. ISBN 978-0-520-25650-7.
56. ULRICH, ROGER B. *Roman Woodworking*. Yale University. 2008. s. 85. ISBN 9780300134605.
57. WALKER, A. *Dřevo Velká encyklopedie*. vyd. London. 2009. ISBN 978-80-247-2858-2.

58. WANG, Wang, Yangyang RAN a Jiamin WANG. Improved performance of thermally modified wood via impregnation with carnauba wax/organoclay emulsion. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 247 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118586. ISSN 09500618.
59. WINANDY JE, LEBOW PK. *Modeling strength loss in wood by chemical composition*. Part I. An individual component model for southern pine. *Wood and Fiber Science* 2001;33:239.
60. XU, Jiajia, YU ZHANG, YUNFANG SHEN, Cong LI, Yanwei WANG, Zhongqing MA a Weisheng SUN. New Perspective on Wood Thermal Modification: Relevance between the Evolution of Chemical Structure and Physical-Mechanical Properties, and Online Analysis of Release of VOCs. *Polymers* [online]. 2019, 11(7), 1145-1145 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.3390/polym11071145. ISSN 20734360.
61. Yan, YT. *Enhancement of mechanical and thermal properties of Poplar through the treatment of glyoxal-urea/nano-SiO₂*. 2015. s. 42-50, 2015.
62. YILDIZ S, GEZER ED, YILDIZ UC. *Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat*. *Building and Environment* 2006;41:1762. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.017
63. ZEPHYRUS A. *The tropical rain forest*. Marietta College. 2012.
64. ČSN 49 0117: *Drevo. Rázová húževnatost' v ohybe*. 18. 6. 1979.
65. ČSN EN ISO 6506-1: *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. 08/2005.
66. EN 1534: *Wood flooring. Determination of resistance to indentation. Test method*. 30 November 2010.
67. ISO 11664-2: *Colorimetry -- Part 2: CIE standard illuminants*. 2007.
68. ISO 11644: *Specifies a method for measuring the adhesion of the finish to leather or the adhesion between two adjacent layers of the finish*. 2009.
69. ISO 11664-6: *Specifies the method of calculating colour differences according to the CIEDE2000 formula*. 2014.
70. ISO 13061-2: *Physical and mechanical tests on small clear wood specimens*. 2014.
71. ISO 13061-1: *Physical and mechanical tests on small clear wood specimens*. 2014.
72. GAFF, Milan, František KAČÍK a Miroslav GAŠPARÍK. Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood. *Composite Structures* [online]. 2019, 216, 80-88 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.091. ISSN 02638223.

73. SIKORA, Adam, František KAČÍK, Milan GAFF, Veronika VONDROVÁ, Tatiana BUBENÍKOVÁ a Ivan KUBOVSKÝ. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. *Journal of Wood Science: Official Journal of the Japan Wood Research Society* [online]. 2018, 64(4), 406-416 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1007/s10086-018-1721-0. ISSN 14350211.